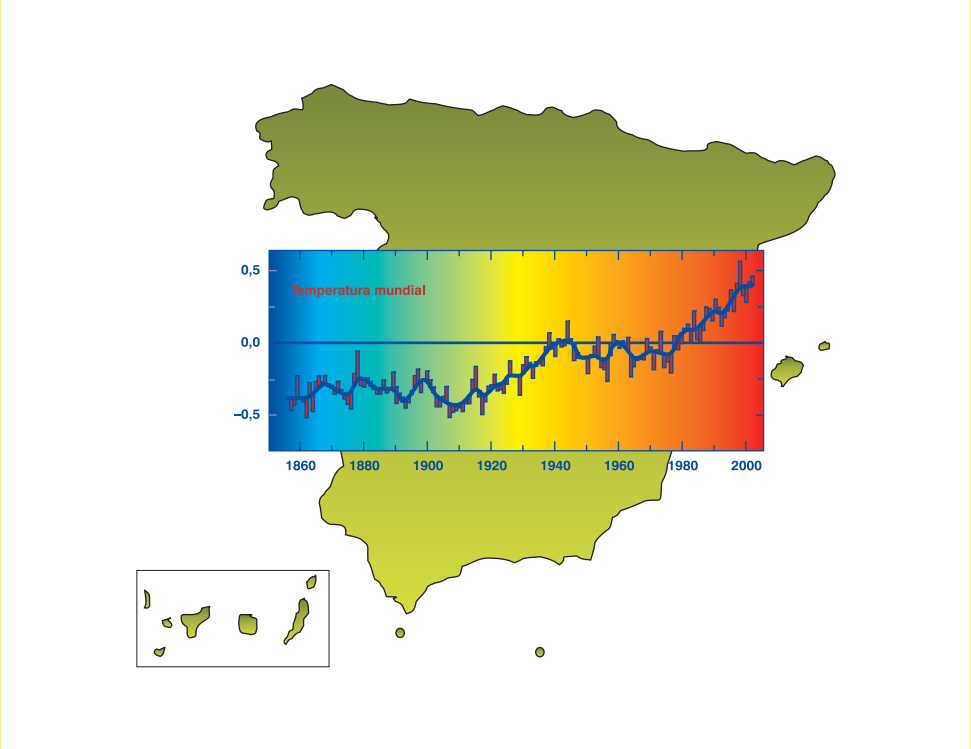
Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

UCLM

Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático

Proyecto ECCE - INFORME FINAL

Realizado al amparo del Convenio de colaboración entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Universidad de Castilla-La Mancha en materia de investigación sobre una "Evaluación preliminar general sobre los impactos en España por efecto del cambio climático"

Director/Coordinador

José Manuel Moreno Rodríguez
Universidad de Castilla-La Mancha

Autores

J. M. Moreno, E. Aguiló, S. Alonso, M. Álvarez Cobelas, R. Anadón, F. Ballester, G. Benito, J. Catalán, M. de Castro, A. Cendrero, J. Corominas, J. Díaz, F. Díaz-Fierros, C. M. Duarte, A. Esteban Talaya, A. Estrada Peña, T. Estrela, A. C. Fariña, F. Fernández González, E. Galante, F. Gallart, L. D. García de Jalón, L. Gil, C. Gracia, A. Iglesias, R. Lapieza, J. Loidi, F. López Palomeque, R. López-Vélez, J. M. López Zafra, E. de Luis Calabuig, J. Martín-Vide, V. Meneu, M. I. Mínguez Tudela, G. Montero, J. Moreno, J. C. Moreno Saiz, A. Nájera, J. Peñuelas, M. T. Piserra, M. A. Ramos, D. de la Rosa, A. Ruiz Mantecón, A. Sánchez-Arcilla, L. J. Sánchez de Tembleque, F. Valladares, V. R. Vallejo, C. Zazo

Unidad de apoyo

A. Cruz Treviño (Responsable)
A. M. Zaragoza

Comité de seguimiento del convenio

C. Martínez Lope (OECC), J. Mora Alonso-Muñoyerro (DGA), J.R. Picatoste Ruggeroni (DGB), J. M. Moreno Rodríguez (UCLM), F. Fernández González (UCLM), A. Cruz Treviño (UCLM),

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE

2005

Edita: Centro de Publicaciones.
Secretaría General Técnica.
Ministerio de Medio Ambiente ©

I.S.B.N.: 84-8320-303-0
NIPO: 310-05-024-2
Depósito Legal: M-18.756-2005

Imprime: Sociedad Anónima de Fotocomposición

Impreso en papel reciclado al 100% totalmente libre de cloro

Esta publicación refleja la opinión de los autores y no necesariamente la del Ministerio de Medio Ambiente

PRESENTACIÓN

Esta evaluación preliminar sobre los posibles impactos del cambio climático en los diferentes ecosistemas y sectores socioeconómicos españoles representa un paso más de los esfuerzos que, desde el Ministerio de Medio Ambiente, se vienen haciendo para avanzar en la lucha contra el cambio climático.

Todos somos conscientes de que los cambios en el clima que se están produciendo han afectado ya a muchos sistemas físicos y biológicos y que los riesgos proyectados del cambio climático son muy altos, por lo que la adaptación a las futuras condiciones climáticas es inevitable. Las necesidades de adaptación, a corto y largo plazo, deben estar enmarcadas en un contexto más amplio del desarrollo sostenible y ser integradas en las políticas sectoriales. La prontitud con que se realice una adaptación planificada puede disminuir la vulnerabilidad a los impactos así como reducir los costes.

Las actuaciones para la adaptación tienen que contemplarse desde una doble vertiente: por una parte, la aplicación de medidas para minimizar los efectos en los sectores socioeconómicos y los ecosistemas más susceptibles de ser afectados por el cambio climático; por otra, la prevención del riesgo de los fenómenos climáticos extremos y sus efectos. Todo ello sin olvidar que la mejor forma de combatir el cambio climático es mitigarlo, es decir, reducir las emisiones de aquellos gases que lo producen.

España, por su situación geográfica y características socioeconómicas, es muy vulnerable al cambio climático y se está viendo ya afectada por los recientes cambios. Los impactos del cambio climático pueden tener consecuencias especialmente graves, entre otras, en lo referente a la disminución de los recursos hídricos y la regresión de la costa, pérdidas de la diversidad biológica y ecosistemas naturales, aumentos en los procesos de erosión del suelo y pérdidas de vidas y bienes derivadas de la intensificación de sucesos adversos asociados a fenómenos climáticos extremos, tales como inundaciones, incendios forestales y olas de calor.

Los resultados de esta evaluación preliminar, realizada por cincuenta autores, en colaboración con otros expertos, pertenecientes a una amplia gama de universidades y centros de investigación españoles, constituye sin duda un elemento básico y pieza clave, por una parte para seguir profundizando en el conocimiento de la vulnerabilidad de nuestros ecosistemas y sectores a los impactos del cambio climático, y por otra, para acometer el desarrollo y establecimiento de políticas de adaptación, que permitan la adopción de medidas, por parte de las Administraciones Públicas y el sector privado.

Desde mi responsabilidad, como Ministra de Medio Ambiente, no cesaré en el empeño de impulsar -en coordinación y cooperación con las Comunidades Autónomas y con el apoyo de nuestra comunidad científica y académica- las políticas que el desafío del cambio climático nos exige.

Cristina NARBONA RUIZ
Ministra de Medio Ambiente

PRÓLOGO

El informe Evaluación Preliminar de los Impactos en España por efecto del Cambio Climático es el esfuerzo de un numeroso grupo de expertos para intentar valorar cuáles pueden ser los cambios que ocurrirán a lo largo de este siglo XXI en el clima de España como consecuencia del calentamiento global del planeta y cómo tales cambios pueden impactar al medio natural, sus recursos, a algunos de los principales sectores productivos y a la salud humana en nuestro país. El análisis realizado ha seguido los procedimientos al uso por el IPCC o, en el caso de Europa, por el proyecto ACACIA. Para ello, se formó un grupo de expertos en distintos campos del saber, procedentes de diferentes instituciones y puntos geográficos de España. Además del clima, se seleccionaron quince áreas temáticas de impacto. A cada uno de los temas fueron asignados tres expertos, con el encargo de hacer una revisión exhaustiva de los conocimientos existentes acerca de las interacciones entre el clima y el campo objeto de estudio y, basándose en esto, y en las proyecciones de clima futuro, aventurar cuáles podrían ser las consecuencias del cambio climático conforme discurra el siglo. Para asegurar una visión lo más amplia y contrastada de cada tema, los redactores de cada capítulo fueron instados a recabar la opinión de otros expertos, bien en el proceso de redacción, bien en el de revisión, añadiendo, en este caso, a expertos de fuera de España.

El capítulo de clima aborda las tendencias de cambio recientes y el clima futuro. Los restantes capítulos han sido estructurados en diez apartados: 1) introducción, 2) relación con el clima actual, 3) impactos previsibles del cambio climático, 4) zonas más vulnerables, 5) principales opciones adaptativas frente al cambio climático, 6) repercusiones de cada sistema o sector sobre los demás, 7) lagunas de conocimiento existente, 8) posibilidades de detectar el cambio, 9) implicaciones para las políticas, 10) principales necesidades de investigación.

El marco de referencia climático o socioeconómico del futuro ha sido el disponible del IPCC. En algunos casos se han utilizado proyecciones basadas en modelos climáticos regionales. Dado que los estudios específicos sobre los impactos del cambio climático en España son escasos, en la mayoría de casos el juicio que se expresa es el de la opinión de los expertos. Esto es, de cómo creemos que, conociendo las relaciones del clima con los procesos que nos interesan, y en virtud de los cambios esperables, pueden discurrir las cosas a lo largo de este siglo. La falta de conocimiento existente hace difícil concretar el detalle de los impactos. En todo caso, los impactos que se presume ocurran son tantos y de tan variada naturaleza que de ninguna manera la falta de conocimiento detallado puede servir de excusa para no actuar, aquí y ahora. Antes bien, eventos extremos, como la ola de calor de 2003, muestran que las sorpresas del cambio climático pueden ser insospechadas. El tiempo de espera para actuar simplemente se ha acabado. El informe provee elementos suficientes para pensar en lo que debemos hacer para adaptarnos y mitigar las consecuencias del cambio climático en el que, todo indica, estamos inmersos.

El informe se ha escrito en español y traducido al inglés. Agradezco la colaboración de los autores, contribuyentes, revisores y personal técnico de apoyo y de la Oficina Española de Cambio Climático que ha posibilitado la realización del proyecto ECCE que ha dado luz al informe.

José Manuel MORENO RODRÍGUEZ
Departamento de Ciencias Ambientales
Universidad de Castilla-La Mancha

Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático

Contenido

Presentación *i*

Prólogo *iii*

Resumen, y principales conclusiones y recomendaciones *vii*

1. El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI 1

2. Impactos sobre los ecosistemas terrestres 65

3. Impactos sobre los ecosistemas acuáticos continentales 113

4. Impactos sobre los ecosistemas marinos y el sector pesquero 147

5. Impactos sobre la biodiversidad vegetal 183

6. Impactos sobre la biodiversidad animal 249

7. Impactos sobre los recursos hídricos 303

8. Impactos sobre los recursos edáficos 355

9. Impactos sobre el sector forestal 399

10. Impactos sobre el sector agrario 437

11. Impactos sobre las zonas costeras 469

12. Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático 525

12.1 Riesgo de crecidas fluviales 527

12.2 Riesgo de inestabilidad de laderas 549

12.3 Riesgo de incendios forestales 581

13. Impactos sobre el sector energético 617

14. Impactos sobre el sector turístico 653

15. Impactos sobre el sector del seguro 691

16. Impactos sobre la salud humana 727

Anexo I. Listado de autores, revisores y miembros del comité de seguimiento del convenio 773

Anexo II. Glosario de términos científicos 787

Anexo III. Listado de acrónimos utilizados en el texto 815

Resumen y principales conclusiones y recomendaciones

El clima de España

El clima de España es enormemente variado debido a su compleja topografía y situación geográfica. La variabilidad climática interanual es muy elevada, estando condicionada en buena medida, en concreto en lo que a las precipitaciones se refiere, por los patrones de circulación de la atmósfera en el hemisferio Norte, en particular por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO).

Durante el siglo XX las temperaturas en España han aumentado de forma general y en magnitud superior a la media global. Esto es más acusado en invierno. Las precipitaciones durante este periodo han tendido a la baja, sobre todo en la parte meridional y Canarias, aunque su alta variabilidad impide un juicio más taxativo. Esta tendencia se corresponde en parte con un aumento en el índice de la NAO.

Las tendencias del clima futuro dependen de los escenarios socioeconómicos que se utilicen y varían según los modelos generales de clima que se usen. El incremento térmico que se proyecta para la Península Ibérica según que se utilicen escenarios más o menos favorables (menos o más emisiones, respectivamente) es uniforme a lo largo del siglo XXI, con una tendencia media de 0,4 ºC/década en invierno y de 0,7 ºC/década en verano para el escenario menos favorable (A2 según el IPCC), y de 0,4 ºC y 0,6 ºC/década, respectivamente, para el escenario más favorable (B2 del IPCC).

Por lo que respecta a las precipitaciones, las tendencias de cambio a lo largo del siglo no son por lo general uniformes, con notables discrepancias entre los modelos globales, lo que resta fiabilidad al resultado. No obstante, todos ellos coinciden en una reducción significativa de las precipitaciones totales anuales, algo mayor en el escenario A2 que en el B2. Dichas reducciones resultan máximas en la primavera y algo menores en el verano.

La aplicación de modelos regionales permite ampliar el detalle de las proyecciones climáticas. Los resultado de uno de estos modelos (*PROMES*) para el último tercio del siglo arrojan los siguientes datos: la temperatura aumentará entre 5 y 7ºC en verano y 3 a 4ºC en invierno, siguiendo algo menor en las costas que en el interior, y menor también (aprox. 1º) para el escenario B2 que el A2.

Los cambios en las precipitaciones son más heterogéneos, acentuando el gradiente Noroeste-Sureste en invierno y otoño, con ligeros aumentos en uno y disminuciones en el otro. En primavera y, sobre todo, en verano, la disminución de las precipitaciones es generalizada. Estas variaciones son más acusadas en el escenario A2 que en el B2.

La frecuencia y amplitud de anomalías térmicas mensuales se incrementa a lo largo de todas las estaciones y en los dos escenarios, si bien existe una importante variabilidad geográfica. Los cambios en las anomalías mensuales de la precipitación no son concluyentes.

La frecuencia de días con altas temperaturas aumenta en primavera y otoño, si bien en las islas no es concluyente. Los días con temperaturas mínimas tienden a disminuir.

Considerando el conjunto de resultados del cambio climático proyectado a lo largo del siglo XXI para España por los diferentes modelos climáticos considerados en este informe, es posible ordenar su grado de fiabilidad en sentido decreciente de la siguiente manera: 1º Tendencia progresiva al incremento de las temperaturas medias a lo largo del siglo. 2º Tendencia a un

calentamiento más acusado cuanto mayor es el escenario de emisiones. 3º Los aumentos de temperatura media son significativamente mayores en los meses de verano que en los de invierno. 4º El calentamiento en verano es superior en las zonas del interior que en las costeras o en las islas. 5º Tendencia generalizada a una menor precipitación acumulada anual. 6º Mayor amplitud y frecuencia de anomalías térmicas mensuales. 7º Más frecuencia de días con temperaturas máximas extremas en la Península, especialmente en verano. 8º Para el último tercio del siglo, la mayor reducción de precipitación en la Península se proyecta en los meses de primavera. 9º Aumento de precipitación en el oeste de la Península en invierno y en el noreste en otoño. 10º Los cambios de precipitación tienden a ser más significativos en el escenario de emisiones más elevadas.

Principales impactos del cambio climático en España

Ecosistemas terrestres

El cambio climático afectará a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas terrestres, alterará la fenología y las interacciones entre especies, favorecerá la expansión de especies invasoras y plagas, y aumentará el impacto de las perturbaciones tanto naturales como de origen humano. Las zonas y sistemas más vulnerables al cambio climático son las islas y los ecosistemas aislados, como son las islas edáficas y los sistemas de alta montaña, y los ecotonos o zonas de transición entre sistemas.

Ecosistemas acuáticos continentales

Con un gran nivel de certeza se puede asegurar que el cambio climático hará que parte de los ecosistemas acuáticos continentales españoles (EACE) pasen de ser permanentes a estacionales; algunos desaparecerán. La biodiversidad de muchos de ellos se reducirá y sus ciclos biogeoquímicos se verán alterados. La magnitud de estos cambios aún no puede precisarse. Los ecosistemas más afectados serán: ambientes endorreicos, lagos, lagunas, ríos y arroyos de alta montaña (1600-2500 metros), humedales costeros y ambientes dependientes de las aguas subterráneas.

Ecosistemas marinos y el sector pesquero

Los efectos del cambio climático diferirán para ecosistemas de afloramiento o de zonas estratificadas, así como de zonas costeras u oceánicas. Se prevé una reducción de la productividad de las aguas españolas, dadas sus características de mares subtropicales o templados cálidos. Los cambios afectarán a muchos grupos de organismos, desde fitoplancton y zooplancton a peces y algas. Habrá cambios en las redes tróficas marinas, afectando a las especies recursos, sobre todo en su fase larvaria y en el reclutamiento. La distribución de las especies cambiará, con aumento de especies de aguas templadas y subtropicales y disminución de especies boreales. Es posible un aumento de especies invasoras. Los cultivos marinos no subsidiados con alimento pueden verse afectados por la reducción de la productividad marina. Son esperables incrementos en la aparición de especies de fitoplancton tóxico o de parásitos de especies cultivadas, favorecidas por el incremento térmico de las aguas costeras. Las zonas y sistemas más vulnerables al cambio climático son las comunidades bénticas, siendo las praderas de fanerógamas de las más afectadas.

Biodiversidad vegetal

Los impactos directos del cambio climático sobre la diversidad vegetal se producirán a través de dos efectos antagónicos: el calentamiento y la reducción de las disponibilidades hídricas. La "mediterraneización" del norte peninsular y la "aridización" del sur son las tendencias más significativas. Los impactos indirectos más importantes son los derivados de cambios edáficos, cambios en el régimen de incendios y ascenso del nivel del mar. Las interacciones con otros componentes del cambio global y la modificación de las interacciones entre especies constituyen otra fuente potencial de impactos sobre los que empiezan a acumularse evidencias. La vegetación de alta montaña, los bosques y arbustedas caducifolios sensibles a la sequía estival, los bosques esclerofilos y lauroides del sur y suroeste peninsular y la vegetación litoral se cuentan entre los tipos más vulnerables. La simplificación estructural de la vegetación y el predominio de las extinciones locales sobre las recolonizaciones son tendencias recurrentes de los distintos impactos. Las pérdidas de diversidad florística tienen una relevancia especial en el caso español, puesto que nuestro país alberga una proporción muy elevada de la diversidad vegetal europea.

Biodiversidad animal

España es posiblemente es el país más rico en especies animales de la UE, y es el que posee el mayor número de endemismos. El cambio climático producirá: 1) Cambios fenológicos en las poblaciones, con adelantos (o retrasos) en el inicio de actividad, llegada de migración o reproducción; 2) desajustes entre predadores y sus presas debidos a respuestas diferenciales al clima; 3) desplazamiento en la distribución de especies terrestres hacia el Norte o hacia mayores altitudes, en algunos casos con una clara reducción de sus áreas de distribución; en ríos, desplazamiento de especies termófilas aguas arriba y disminución de la proporción de especies de aguas frías; en lagunas y lagos, la altitud, la latitud y la profundidad tienen efectos similares sobre las comunidades en relación con la temperatura; 4) mayor virulencia de parásitos, y 5) aumento de poblaciones de especies invasoras.

Recursos hídricos

Los recursos hídricos sufrirán en España disminuciones importantes como consecuencia del cambio climático. Para el horizonte de 2030 son esperables, disminuciones medias de aportaciones hídricas, en régimen natural, entre un 5 y un 14%, mientras que para el 2060 se prevé una reducción global de los recursos hídricos del 17% como media de la Península. Estas cifras pueden superar el 20 a 22% para los escenarios previstos para final de siglo. Junto la disminución de los recursos se prevé un aumento de la variabilidad interanual de los mismos. El impacto se manifestará más severamente en las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares.

Recursos edáficos

Una parte importante de la superficie del territorio español está amenazada actualmente por procesos de desertificación, especialmente por el impacto de los incendios forestales, la pérdida de fertilidad de suelos de regadío por salinización y la erosión. Las proyecciones del cambio climático agravarían dichos problemas de forma generalizada y especialmente en la España de clima mediterráneo seco y semiárido. Las proyecciones de cambio climático probablemente producirán una disminución del carbono de los suelos españoles, lo cual afectaría de forma negativa a las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

Sector forestal

Plagas y enfermedades forestales pueden jugar un papel fundamental en la fragmentación de las áreas forestales. Algunas especies perforadoras o defoliadoras pueden llegar a completar dos ciclos biológicos en un año ó aumentar su área de colonización como consecuencia de los inviernos más benignos. La fisiología de la mayor parte de especies forestales se puede ver profundamente afectada. Existe un riesgo elevado de que muchos de nuestros ecosistemas forestales se conviertan en emisores netos de carbono durante la segunda mitad del presente siglo. Las zonas culminales de las montañas, los ambientes más xéricos, y los bosques de ribera son algunas de las zonas que pueden resultar más vulnerables al cambio climático.

Sector agrario

Los cambios en las concentraciones de CO_2, en los valores de las temperaturas del aire (y de suelo), así como las variaciones en las precipitaciones estacionales, tendrán efectos contrapuestos y no uniformes en los sistemas agrarios españoles. El cambio climático puede afectar a la ingestión y el bienestar de los animales y, en consecuencia, a la rentabilidad de las ganaderías. Desde el punto de vista de sanidad animal, cabe esperar que los efectos del cambio climático se observen en todas aquellos procesos parasitarios e infecciosos cuyos agentes etiológicos o sus vectores, tengan una estrecha relación con el clima.

Zonas costeras

Los principales problemas del cambio climático en las zonas costeras españolas se relacionan con el posible ascenso del nivel medio del mar (NMM). Las proyecciones de los modelos varían entre 10 y 68 cm para final de siglo. Para finales de siglo es razonable esperar un aumento de 50 cm en el NMM, con 1 m como escenario más pesimista. Ante una subida generalizada del NMM mar las zonas más vulnerables son los deltas y playas confinadas o rigidizadas. Esto podrá causar pérdidas de un número importante de playas, sobre todo en el Cantábrico. Buena parte de las zonas bajas costeras se inundarán (deltas del Ebro, Llobregat, Manga del Mar Menor, costa de Doñana), parte de las cuales puede estar construida.

Riesgos naturales de origen climático

Riesgo de crecidas fluviales

La variabilidad hidrológica en las cuencas atlánticas aumentará en el futuro debido a la intensificación de la fase positiva del índice NAO. Esto puede hacer que la frecuencia de avenidas disminuya, aunque no su magnitud. En las cuencas mediterráneas y del interior la mayor irregularidad del régimen de precipitaciones ocasionará un aumento en la irregularidad del régimen de crecidas y de crecidas relámpago.

Riesgo de inestabilidad de laderas

Los deslizamientos y aludes se concentran en las principales cordilleras montañosas, especialmente en los Pirineos, la Cordillera Cantábrica y las Cordilleras Béticas. La inestabilidad de laderas produce, en la actualidad, pérdidas de cientos de millones de euros anuales, sobre todo en vías de comunicación y, en menor medida, en núcleos de población. El número de víctimas mortales por deslizamientos se ha reducido en las últimas décadas, pero el producido por aludes de nieve ha aumentado debido a una mayor frecuentación de la montaña. A la espera de confirmación por modelos climáticos más afinados, el aumento de la

torrencialidad conllevará un mayor número de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios, cuyos efectos pueden verse exacerbados por los cambios de uso del suelo y un menor recubrimiento vegetal. Como consecuencia de ello, se espera un aumento de la erosión en las laderas y la pérdida de calidad de las aguas superficiales, por el aumento de la turbidez, y un mayor ritmo de colmatación de los embalses.

Riesgo de incendios forestales

Las temperaturas y la falta de agua en el suelo aumentarán, lo que inducirá a una mayor y más duradera desecación de los combustibles. Por lo tanto, la inflamabilidad de los combustibles aumentará. Los índices medios de peligro aumentarán y, en particular, la frecuencia de situaciones extremas. La duración media de la temporada de peligro aumentará. Las igniciones causadas por rayos aumentarán así como las causadas por negligencias. La frecuencia, intensidad y magnitud de los incendios aumentará.

Sector energético

Bajo un escenario de incremento de temperaturas y disminución de precipitaciones se prevé un incremento de la demanda eléctrica que deberá cubrirse sin poder recurrir a energía hidráulica, pues ésta se reducirá; se prevé asimismo un incremento de la demanda de petróleo y de gas natural, y una reducción del aporte (actualmente escaso) de la biomasa. Sólo la energía solar (en sus diversas formas) se vería beneficiada por el plausible incremento de las horas de insolación. Caso de producirse un incremento de los episodios de viento fuerte, podrían darse incrementos en la producción de electricidad de origen eólico.

Sector turístico

Los impactos del cambio climático sobre el espacio geográfico-turístico pueden producir alteraciones en sus ecosistemas. La escasez de agua provocaría problemas de funcionalidad o viabilidad económica de ciertos destinos. El incremento de las temperaturas puede modificar los calendarios de actividad, aumentando los viajes en las interestaciones. La elevación del nivel del mar amenazaría la localización actual de determinados asentamientos turísticos y de sus infraestructuras. Estos impactos tendrán peor incidencia en aquellas zonas más deterioradas y con mayor conjunción de los diferentes efectos climáticos. Sobre los turistas pueden disminuir la estancia media en cada destino, retrasar el momento de la decisión del viaje y cambiar la dirección de sus visitas hacia otros lugares, los turistas extranjeros quedándose en sus propios países y los nacionales con desplazamientos hacia las costas del norte o el interior.

Sector del seguro

La detección de los efectos del cambio climático en el seguro español se centra en el análisis de la siniestralidad de las coberturas de inundaciones, tormentas, heladas, granizo y sequía, siendo el ramo más afectado el de Daños. Las tormentas y las inundaciones los eventos más numerosos y de mayor factura. Las indemnizaciones por inundaciones en el período 1971-2002 se han incrementado, seguramente por el aumento del índice de aseguramiento, de las exposiciones y de los capitales asegurados. Las estadísticas del seguro agrario demuestran que la mitad oriental de la península es la zona más sensible a un cambio climático.

Salud humana

Desde el punto de vista de los posibles impactos en salud humana habría que considerar los efectos que sobre la morbi-mortalidad van a tener las temperaturas extremas, fundamentalmente a través de las olas de calor, que se apuntan como más frecuentes en intensidad y duración en los próximos años. Por otro lado el aumento previsible de las partículas finas y del ozono serían los principales impactos relacionados con la contaminación atmosférica. A estos impactos en salud habría que añadir la extensión geográfica a nuestro país de vectores ya establecidos o por la implantación e instalación de vectores sub-tropicales adaptados a sobrevivir a climas menos cálidos y más secos.

Principales recomendaciones para las políticas en una España de cambio climático

Ecosistemas terrestres

La gestión de los ecosistemas terrestres debe implicar a la sociedad en su conjunto y buscar fórmulas creativas para la financiación de actividades de mitigación de efectos, restauración e investigación. La conservación de los ecosistemas terrestres en un escenario de cambio climático entra en conflicto con numerosas actividades humanas sobre todo en relación al uso de recursos naturales como el agua. Es precisa una gestión integrada de los múltiples bienes y servicios que nos prestan los ecosistemas terrestres.

Ecosistemas acuáticos continentales

Las posibilidades de adaptación de los EACE al cambio climático son limitadas. Para paliar los efectos, hacen falta políticas de ahorro de agua, mejora de su calidad e intensificación de las medidas de conservación de los ambientes terrestres que los rodean. Puesto que se prevén nuevos conflictos por el agua debidos al cambio climático, hay una certeza razonable de que la conservación de los EACE será la prioridad más fácil de ignorar. Los cambios que verosímilmente experimentarán los EACE afectarán a la conservación ambiental y a los sectores del turismo, la protección civil, el abastecimiento de aguas y la pesca continental.

Ecosistemas marinos y el sector pesquero

La gestión de los ecosistemas marinos costeros y de las especies marinas, debe ser considerada desde un punto de vista multiespecífico y ecosistémico. Debe favorecerse la búsqueda de soluciones que mitiguen los efectos generados por la actividad humana directa, y el seguimiento a medio o largo plazo de las actuaciones.

Biodiversidad vegetal

Evitar las pérdidas de biodiversidad causadas por los impactos del cambio climático, requiere respuestas globales. Las estrategias sectoriales que se elaboren requieren un marco geográfico más amplio que el de las administraciones regionales o locales de las que dependen en la actualidad. La red de espacios protegidos y la política de conservación, la restauración ecológica, la gestión forestal, la regulación de los usos ganadero y cinegético, la ordenación del territorio, la evaluación ambiental y la educación ambiental son las políticas más involucradas en el reto de aportar respuestas a los impactos del cambio climático.

Biodiversidad animal

Las zonas más vulnerables al cambio climático son las zonas costeras, humedales, y cursos de agua permanentes que pasarán a estacionales y estacionales que tendrán un caudal más irregular o incluso desaparecerán, zonas de alta montaña y pastizales húmedos. Ni el desplazamiento de áreas de distribución (hipótesis I) ni la adaptación rápida a nuevas condiciones ecológicas (hipótesis II) parecen soluciones viables para la mayoría de las especies estudiadas. Las principales soluciones de gestión deben incluir el diseño de reservas y parques naturales con la inclusión de corredores biológicos entre ellas. La red de áreas protegidas debería incorporar gradientes latitudinales y altitudinales para proteger a poblaciones en vías de desplazamiento geográfico debido al cambio climático. Las zonas o áreas especialmente sensibles al cambio climático deben identificarse, sobre todo para especies que no tengan opción para desplazar su hábitat.

Recursos hídricos

El cambio implicará necesariamente la remodelación y redefinición de nuevas políticas como la científica tecnológica, hidráulica, energética, agrícola, medioambiental y planificación del territorio. Es recomendable continuar con el hábito de medidas establecido en España mediante los sistemas de control, que en general están bien implantados o en vía de mejora. Se resalta, sin embargo, la conveniencia de diseñar e implantar, o mejorar claramente la implantación, de las redes de control de usos del agua, superficial y subterránea, y de la red de medidas de caudales en fuentes y surgencias.

Recursos edáficos

La reforestación de tierras marginales y yermas, y la práctica de una agricultura orientada a la conservación del suelo y al aumento del contenido de carbono orgánico y la mejora de la fertilidad edáfica ofrecen grandes posibilidades de contrarrestar los efectos negativos del cambio climático**.** La reforma de la PAC (Agenda 2000) ofrece posibilidades de aplicación de dichos principios. La calidad del suelo debería tomarse en consideración en los planes urbanísticos y en cualquier reclasificación de usos. La elaboración de la *Estrategia Europea de Conservación de Suelos* debe poner las bases para el desarrollo de normativas europeas sobre conservación y uso sostenible de suelos.

Sector forestal

Ante los cambios previsibles, es aconsejable aplicar una gestión adaptativa. El resalveo de los montes bajos reduciendo la densidad de pies demuestra ser un eficaz tratamiento que mejora la respuesta de estos montes al cambio climático. El control y la adecuación de los turnos e intensidades de aprovechamiento, deben ser considerados para optimizar la respuesta del bosque. Igualmente resulta importante la cuidadosa selección de las procedencias de las semillas en las repoblaciones para una gestión adecuada de la diversidad genética.

Sector agrario

En los sistemas agrícolas se deberá favorecer la extensificación o forestación en las zonas con incremento de la inestabilidad, o la intensificación o estabilización por riego en otras áreas y el establecimiento de cultivos alternativos o zonas de barbecho obligado, así como un nuevo diseño de control integrado de plagas y enfermedades. En la ganadería favorecer la reducción de la carga animal y los cambios necesarios en el manejo del pastoreo; así como ayudar a la

suplementación y adaptación de las instalaciones. La explotación de razas autóctonas y control de vectores deben ser consideradas por sus repercusiones sobre las patologías previsibles.

Zonas costeras

Deba actuarse de inmediato sobre factores los humanos relacionados con la estabilidad del litoral, como el mantenimiento de descarga y aportes sólidos de los ríos como solución al "origen" del problema (la falta de material sedimentario). Como solución a los "síntomas" del problema (retroceso o movilidad excesiva de la costa) pueden mencionarse la estabilización de playas y dunas, la construcción de obras para limitar la capacidad de transporte del oleaje incidente y las aportaciones artificiales de sedimento. La protección de valores naturales (ordenación rigurosa del territorio para asegurar el mantenimiento y recuperación de zonas valiosas) es perentoria. Es preciso también delimitar e inventariar las áreas y elementos afectables por el ascenso del nivel del mar, a fin de definir donde aplicar estrategias de abandono y retroceso, o de protección.

Riesgos naturales de origen climático

Riesgo de crecidas fluviales

Mejorar la cuantificación del riesgo y prevención en relación con la climatología y la ordenación territorial, sobre todo en las zonas urbanas y centros turísticos, particularmente en los mediterráneos; mejorar los sistemas de predicción de cuenca.

Riesgo de inestabilidad de laderas

La planificación territorial y urbana evitando las áreas más susceptibles a la inestabilidad de laderas es la mejor y más económica herramienta adaptativa.

Riesgo de incendios forestales

Las políticas de lucha contra incendios, de ordenación territorial y forestal y de formación e información al público deben ajustarse a las nuevas condiciones. Los esquemas de gestión basados en la exclusión total del fuego deben modificarse abriendo a la posibilidad de incorporar el fuego como herramienta para reducir la peligrosidad de ciertas áreas. Los planes de conservación de la biodiversidad o de lucha contra la desertificación deben incorporar los nuevos escenarios de peligro creciente. La gestión de los espacios públicos para su uso recreativo deberá tener en cuenta el peligro creciente que se avecina.

Sector energético

Parece que estamos en el buen camino respecto a las políticas energéticas, tanto en la UE como en nuestro país, pero sin embargo, nuestro desarrollo energético dista de ser sostenible. Por ello, se ha de profundizar aún mas en estas políticas para adoptar medidas adicionales y concretas que implementen las estrategias, con el fin de que nuestro desarrollo energético pueda llegar a ser sostenible, máxime en el contexto del marco de reducción de emisiones.

Sector turístico

Las implicaciones para las políticas públicas desde la incorporación de ayudas financieras, fiscales e inversiones en infraestructuras específicas, hasta la modificación de la legislación existente en materia de ordenación y delimitación del territorio y sus usos, de transporte e incluso de calendario escolar. Todo ello, mediante la implantación de políticas que refuercen las inversiones en infraestructuras turísticas que capitalicen nuevas oportunidades de mercado en nuevas áreas, además de la necesaria reconversión de determinados destinos y productos tradicionales. Con el imprescindible liderazgo público, también es precisa la incorporación activa de todas las empresas del sector turístico.

Sector del seguro

Se recomienda seguimiento en cada autonomía, de las siguientes medidas analizadas e implantadas desde el nivel nacional: 1) Revisión de las Normas Básicas de Construcción y Diseño, y Revisión de la Planificación Territorial y Usos del Suelo, acorde con la peligrosidad climática de cada zona y su evolución previsible. 2) Promoción de la educación en la prevención desde la educación primaria. 3) Promoción del seguro como instrumento de prevención 4) Esfuerzo de adaptación del mercado asegurador a las posibles demandas en un nuevo escenario de peligro climático. 5) Análisis de viabilidad de política agraria en los escenarios climáticos futuros.

Salud humana

Serían precisos planes de actuación en salud pública basados en sistemas de alerta temprana que permitan la identificación de situaciones de riesgos antes de que estas se produzcan, lo que lleva aparejado un registro de morbi-mortalidad ágil y fiable. Es precisa la aplicación y seguimiento de las Directivas Europeas en todos aquellos aspectos que puedan tener una incidencia en la salud humana tanto a corto como a largo plazo. Además sería de vital importancia fomentar y desarrollar programas de vigilancia y control específicos en enfermedades de transmisión vectorial, así como la puesta en marcha de actividades dirigidas a aumentar la concienciación y participación ciudadana en todas las actividades relacionas con el cambio climático y sus implicaciones en la salud humana.

Principales necesidades de investigación y de datos para la detección del cambio climático

Ecosistemas terrestres

Entre las principales necesidades de investigación destaca la consolidación de redes de seguimiento ecológico a largo plazo, aprovechando en lo posible las ya existentes y favoreciendo la participación interdisciplinar de la comunidad científica, el estudio de las interacciones tanto entre factores ambientales como entre especies y niveles tróficos, y la determinación de valores mínimos de tolerancia (climáticos, estructurales, funcionales) en sistemas vulnerables al cambio climático.

Ecosistemas acuáticos continentales

Las lagunas en el conocimiento se deben a: 1º) carencia de series de datos fiables a largo plazo; 2º) información aún escasa sobre el estado ecológico y la biología de las especies más importantes 3º) desconocimiento de los procesos de histéresis, y 4º) desconocimiento de los efectos que sobre los EACE pueden tener los cambios abruptos o graduales de las comunidades vegetales terrestres y de la geología de las cuencas hidrográficas en que se enclavan. Las necesidades de investigación son grandes, pues prácticamente no se ha abordado aún el conocimiento de los EACE en relación con el cambio climático.

Ecosistemas marinos y el sector pesquero

Consolidar las redes de seguimiento ambiental y ecológico a largo plazo, aprovechando y mejorando las ya existentes. Se deben potenciar las bases de datos accesibles. Se debe potenciar la participación española en programas internacionales y promover planes de investigación dedicados a conocer los impactos generados por el cambio oceánico en especies y ecosistemas, tanto desde un punto de vista retroactivo como prospectivo.

Biodiversidad vegetal

Las tres líneas principales de investigación que deben fomentarse son: el seguimiento de los cambios en curso, incluyendo programas a largo plazo de medidas sobre el terreno; las respuestas de las especies y comunidades a los cambios, y la elaboración de modelos predictivos, basados en la información suministrada por las anteriores y en las proyecciones de los modelos del clima.

Biodiversidad animal

Es necesario potenciar la investigación en taxonomía y la que incluya series temporales largas, tanto a nivel específico como de comunidades. Se requiere un mayor y mejor conocimiento de la diversidad faunística y de su distribución para el estudio de patrones eco/geográficos de biodiversidad. No debe permitirse el deterioro o progresiva desaparición de fuentes de información como la base fenológica de plantas y animales (aves e insectos) que se inició en 1940 por el Servicio de Meteorología Agrícola del Instituto Nacional de Meteorología (INM).

Recursos hídricos

Ante el cambio climático se perfilan como importantes y necesarias las investigaciones tendentes a mejorar las previsiones de precipitaciones y temperaturas y su distribución espacial y temporal, las tendentes a definir métodos de generación de series de datos climáticos basadas en los escenarios, las que propicien mejores y mas fiables métodos de evaluación de evaporaciones y evapotranspiraciones, juego de agua en el suelo, interceptación y reserva de agua utilizable por las plantas, las destinadas a conocer con mas fiabilidad la recarga de acuíferos y el desarrollo de modelos para automatización de calculo de aportaciones y modelos de gestión en cuencas.

Recursos edáficos

Una primera necesidad básica sobre los recursos edáficos es el inventariado de los mismos a una escala útil a la gestión (al menos 1:50.000), sobre el cual plasmar la evaluación de su

estado, planificar su gestión y proyectar las tendencias de cambio. Sería de gran utilidad la recopilación de la información existente, dispersa en instituciones a distintas escalas y formatos, y su homogeneización e informatización utilizando los criterios de la base de datos de FAO-CSIC. Deberían promoverse estudios básicos a largo plazo para intentar detectar las tendencias en la evolución de los suelos y sus respuestas a las perturbaciones y al cambio climático, especialmente en relación con los eventos de baja periodicidad.

Sector forestal

Entre las necesidades más apremiantes destacan la necesidad de disponer de un conocimiento más preciso sobre las biomasas subterráneas de nuestras especies forestales, el establecimiento o consolidación de redes de observación y análisis de los factores ecofisiológicos que determinan la regeneración y, en conjunto, la respuesta del bosque a los cambios ambientales y potenciar el desarrollo y aplicación de los modelos de crecimiento forestal, para prever las respuestas del bosque a cambios ambientales o patrones de gestión.

Sector agrario

El desarrollo e implementación de modelos dinámicos de simulación de los distintos cultivos que permitan describir la intercepción de radiación solar por las hojas, la generación de biomasa (parte aérea y raíces), los balances de agua y de nitrógeno, y la generación del rendimiento. Datos sobre la respuesta agrícola y ganadera a cambios climáticos en series temporales largas que permitan la predicción del efecto sobre el rendimiento productivo de las distintas explotaciones. El desarrollo de modelos de simulación que expliquen el comportamiento de distintos agentes patógenos con respecto al clima, la capacidad de adaptación al biotopo y la dinámica estacional de los distintos procesos.

Zonas costeras

Se precisa conocer con detalle la evolución de los procesos pasados (a ser posible con resolución anual o decenal). Por otro lado, es necesario profundizar en el conocimiento que los cambios climáticos, en particular del NMM y otros factores impulsores como el oleaje, junto con el correspondiente cambio morfodinámico que pueden tener los ecosistemas litorales sensibles. Se requiere también disponer de modelos de las unidades morfodinámicas más sensibles. Es necesario poner en marcha sistemas de seguimiento y toma de datos sistemática de parámetros que permitan establecer relaciones empíricas o la elaboración y validación de modelos. Es preciso conocer los impactos del cambio climático sobre el régimen de viento, oleaje y patrones de circulación que afectan a cada zona.

Riesgos naturales de origen climático

Riesgo de crecidas fluviales

Desarrollo de modelos regionales acoplados clima-hidrología que permitan obtener escenarios fiables para los extremos hidrológicos teniendo en cuenta las particularidades de las cuencas atlánticas y mediterráneas. Reconstrucción de crecidas del pasado y estudio de las series de aforo refiriéndolas a condiciones naturales.

Riesgo de inestabilidad de laderas

Es necesario disponer de un inventario completo de deslizamientos y una mejor estimación de los daños, que son muy superiores a las cifras conocidas. Es necesario profundizar en las relaciones entre los eventos lluviosos y los distintos tipos de deslizamiento para que puedan ser integradas adecuadamente en los modelos hidrológicos y mecánicos.

Riesgo de incendios forestales

Es preciso conocer con más detalle las interacciones entre sequía, peligro de incendio, ocurrencia de los mismos y la respuesta de la vegetación en situaciones adversas. Debemos conocer las situaciones sinópticas propicias para desencadenar eventos extremos, anticipando así la prevención y lucha contra el fuego. Se precisa disponer de escenarios climáticos con resolución espacial y temporal adecuada, así como de modelos de la respuesta de la vegetación. Debemos profundizar en el conocimiento de la sociología de los incendios. La detección del cambio en la ocurrencia de incendios requiere mantener la base de datos EGIF de incendios forestales de España, así como disponer de una cartografía de los incendios para verificar cambios en los patrones espaciales o temporales de los mismos.

Sector energético

Es necesario conocer con más profundidad el efecto que el cambio climático puede tener sobre la demanda de energía a nivel regional y por sectores económicos. Y todo ello por distintas razones: los escenarios generalistas de cambio climático pueden llevar a pérdidas muy importantes de información; así, deberíamos conocer si el previsible incremento de la temperatura media será homogéneo, o si bien afectará más a ciertas regiones y menos a otras; esto afecta obviamente a las distintas infraestructuras locales; y respecto del elenco de indicadores propuesto para la detección del cambio climático en relación con el sector energético, se precisa la elaboración de modelos que desagreguen los distintos elementos que influyen en la evolución de aquellos.

Sector turístico

Las necesidades de investigación se centran en las áreas críticas de desconocimiento: 1) Estudio del papel del clima actual en el sistema turístico español y los impactos que supondría el cambio climático por zonas y productos más vulnerables, integrando las diferentes escalas de manifestación del fenómeno. 2) Creación de sistemas de indicadores sobre la relación cambio climático- turismo para su medición y detección. 3) Diseño de modelos de gestión para optimizar las principales opciones adaptativas y las implicaciones en las políticas turísticas. Esto supone abrir y mantener una línea específica de financiación de proyectos de investigación, con programas explícitos sobre este tema, que se integre en el Plan Nacional de I+D+i.

Sector del seguro

Mayor disponibilidad, en tiempo y forma adecuada a las necesidades del sector, de datos meteorológicos y climáticos. Explicaciones didácticas sobre los escenarios diseñados por el IPCC y sus consecuencias. Estudios experimentales de vulnerabilidad de estructuras y cultivos en las distintas áreas geográficas, a los principales fenómenos meteorológicos y climáticos en sus manifestaciones más extremas. Estadísticas detalladas y prolongadas en el tiempo, de los datos de siniestralidad para el mercado asegurador español, tanto por áreas como por eventos

catastróficos. Desarrollo de modelos catastróficos que combinen riesgo y los parámetros financieros del seguro y reaseguro, para recrear eventos históricos y estimar pérdidas futuras.

Salud humana

Es imprescindible la realización de forma mas extensa a la aquí llevada a cabo de la evaluación del posible impacto en salud del cambio climático en España, al igual que se ha realizado en otros países. Esta evaluación debería incluir la estimación cuantitativa del impacto en salud teniendo en cuenta los distintos escenarios del cambio climático y las predicciones en la estructura demográfica en nuestro país. Sería pues seguir las recomendaciones y la metodología que la Organización Mundial de la Salud ha desarrollado para la elaboración de la vulnerabilidad en salud humana y la adaptación en salud pública al cambio climático.

1. EL CLIMA DE ESPAÑA: PASADO, PRESENTE Y ESCENARIOS DE CLIMA PARA EL SIGLO XXI

Manuel de Castro, Javier Martín-Vide y Sergio Alonso

Contribuyentes

J. Abaurrea , J. Asín, M. Barriendos, M. Brunet, J. Creus, E. Galán, M.A. Gaertner, C. Gallardo, J.C. González-Hidalgo, J. A. Guijarro, Y. Luna, A.D. Pozo-Vázquez, J. Quereda, F.S. Rodrigo, C. Rodríguez-Puebla, A. Rosell-Melé

Revisores

C. Almarza, E. Zurita

RESUMEN

Por su compleja orografía y su situación geográfica, España posee una notable variedad climática. Las diferencias espaciales de los valores térmicos medios anuales superan los 18ºC en el territorio peninsular y el rango de precipitación anual promedio abarca desde apenas 150 mm a más de 2500 mm.

A ello hay que añadir la elevada variabilidad climática interanual y la notable amplitud de valores diarios extremos. Así, por ejemplo, la variabilidad pluviométrica alcanza coeficientes superiores al 20% en las regiones mediterráneas y el archipiélago canario, y las secuencias de días consecutivos sin lluvia llegan a rebasar los 4 meses en la mitad meridional. La variabilidad interanual está fundamentalmente condicionada por diversos patrones de la circulación general de la atmósfera en el hemisferio norte, entre los que destaca la llamada Oscilación del Atlántico Norte (índice NAO). Por otra parte, los valores térmicos diarios extremos abarcan un intervalo de –40ºC a +50ºC y los máximos de precipitación diaria llegan a superar los 500 mm.

Los análisis sobre las tendencias recientes de la temperatura permiten confirmar que se ha producido una elevación bastante general de la temperatura media anual desde mediados de los años 70 del siglo XX, en una cuantía ligeramente superior a la observada globalmente, siendo el calentamiento más evidente en invierno. Por otra parte, el complejo reparto espacial de la precipitación y su alta variabilidad temporal no permiten vislumbrar una tendencia general definida. No obstante, los resultados abundan en una tendencia a la baja en el sur de la Península Ibérica y en Canarias en la segunda mitad del siglo XX, lo que parece concordar con la tendencia positiva del índice NAO observada en las últimas décadas. Tampoco hay resultados concluyentes sobre la evolución del número de días de precipitación copiosa.

La tendencia del clima futuro que resulta de la aplicación de modelos climáticos globales está condicionada por diversas fuentes de incertidumbre. Entre ellas destaca la propia evolución de las emisiones antropogénicas globales de gases de efecto invernadero (GEI) y de aerosoles azufrados. Por esta razón, el IPCC ha establecido un conjunto de escenarios de emisiones (SRES), en función de diversos supuestos acerca del crecimiento de la población, de la evolución de las actividades socio-económicas y del progreso tecnológico a lo largo del siglo XXI. En este informe solo se han considerado los escenarios conocidos por las siglas A2 y B2. El primero corresponde a una evolución de emisiones de GEI más creciente que el segundo. Así, en el A2 la concentración global de CO_2 llegaría en el año 2100 a unos 850 ppm, un 120% más que la actual, y en el B2 a unos 760 ppm, aproximadamente el doble que la actual.

Teniendo en cuenta los resultados promedio de conjunto de seis modelos globales de clima, se proyectan incrementos de la temperatura en la Península Ibérica esencialmente uniformes a lo largo del siglo XXI, con una tendencia media de 1.2ºC cada 30 años en invierno y de 2ºC cada 30 años en verano para el escenario A2, y de 1.1ºC y 1.8ºC respectivamente para el escenario B2. Por lo que respecta a las precipitaciones, las tendencias de cambio a lo largo del siglo no son por lo general uniformes, con notables discrepancias entre los modelos globales, lo que resta fiabilidad al resultado. No obstante, todos ellos coinciden en una reducción significativa de las precipitaciones totales anuales, algo mayor en el escenario A2 que en el B2. Dichas reducciones resultan máximas en la primavera y algo menores en verano.

La baja resolución espacial de los modelos globales de clima no permite una discriminación espacial de las proyecciones de cambio climático en el territorio de España a causa de su relativamente pequeña extensión geográfica. Por ello, se han considerado los resultados ofrecidos por un modelo regional de clima, con una resolución de 50x50 km^2, anidado en uno de los anteriores modelos globales. No obstante, hay que señalar que las proyecciones con el modelo regional que aquí se presentan se refieren solamente al último tercio del siglo (2070-

2100) y corresponden a la regionalización del cambio climático simulado por un solo modelo global. Por esta razón, aunque presentan un mayor detalle espacial y los resultados coinciden en esencia con el de otros ocho modelos regionales europeos anidados en el mismo modelo global, la fiabilidad de los resultados debe considerarse en teoría inferior al de los del promedio de conjunto de los seis modelos globales.

Los cambios más relevantes proyectados por el modelo regional para el último tercio de siglo en relación con el clima actual, se pueden resumir en los siguientes puntos:

a) En el interior peninsular los incrementos de temperatura con respecto al clima actual en el escenario A2 alcanzan valores de 5ºC a 7ºC en verano y de 3ºC a 4ºC en invierno. En el escenario B2 la distribución del calentamiento es similar a la del escenario A2, pero generalmente 1ºC menos intenso. En la periferia de la Península e Islas Baleares, el calentamiento proyectado es del orden de 2ºC menor que en el interior, y en Canarias de unos 3ºC menor que en el interior en verano y de 2ºC menor en invierno.
b) Los cambios proyectados para la precipitación acumulada son más heterogéneos espacialmente. En invierno resultan leves incrementos en el noroeste y leves disminuciones en el suroeste en ambos escenarios de emisiones. En primavera resultan mayores disminuciones de forma generalizada, aunque algo superiores en el escenario A2 que en el B2. En verano el descenso de precipitación es máximo en todo el territorio, excepto en Canarias. En otoño se proyecta para el escenario A2 un ligero incremento en el noreste y una disminución en el suroeste, resultando ambos menos intensos en el escenario B2.
c) Se proyecta un aumento en la amplitud y frecuencia de las anomalías térmicas mensuales en el clima futuro en relación con el clima presente. Aunque este incremento no se observa de forma regular en todo el territorio, en todas las estaciones del año y en los dos escenarios de emisiones, los incrementos en la amplitud se mantienen en torno al 20%. Por otra parte, no se aprecian alteraciones significativas en la frecuencia de anomalías mensuales de precipitación, aunque esta conclusión resulta notablemente más cuestionable.
d) La frecuencia de días con temperaturas máximas extremas en la Península Ibérica tiende a incrementarse muy significativamente en primavera y en menor medida también en otoño, mientras que en Baleares y Canarias no se observan cambios apreciables, al igual que ocurre en las otras dos estaciones del año en todo el territorio. La frecuencia de días con temperaturas mínimas extremas en la Península tiende a disminuir.

Considerando el conjunto de resultados del cambio climático proyectado a lo largo del siglo XXI para España por los diferentes modelos climáticos considerados en este informe, es posible ordenar su grado de fiabilidad en sentido decreciente de la siguiente manera: 1º Tendencia progresiva al incremento de las temperaturas medias a lo largo del siglo. 2º Tendencia al calentamiento más acusada en el escenario de emisiones más aceleradas (A2). 3º Los aumentos de temperatura media son significativamente mayores en los meses de verano que en los de invierno, con valores intermedios en los demás. 4º El calentamiento en verano es superior en las zonas del interior que en las cercanas a las costas o en las islas. 5º Tendencia generalizada a una menor precipitación acumulada anual en ambos escenarios de emisiones a lo largo del siglo. 6º Mayor amplitud y frecuencia de anomalías térmicas mensuales en relación al clima actual. 7º Más frecuencia de días con temperaturas máximas extremas en la Península, especialmente en verano. 8º La mayor reducción de precipitación en la Península se proyecta en los meses de primavera en ambos escenarios de emisiones para el último tercio del siglo. 9º Aumento de precipitación en el oeste de la Península en invierno y en el noreste en otoño. 10º Los cambios de precipitación tienden a ser más significativos en el escenario de emisiones más aceleradas (A2).

1.1. LA EVOLUCIÓN CLIMÁTICA EN EL PASADO

A escalas de miles de años, decenas de miles y aún superiores el clima de España ha seguido los patrones generales marcados por las fluctuaciones y los cambios climáticos globales por causa natural. Los períodos glaciales -los cambios mejor conocidos del pasado geológico- han dejado numerosas huellas visibles en el paisaje y variados registros paleoclimáticos. Los cambios climáticos han tenido, no obstante, expresiones locales que son el resultado de la modulación del cambio global por los factores geográficos y las variables fisiográficas de las distintas regiones españolas. Numerosos registros palinológicos en lagos atestiguan cambios en la vegetación, como, por ejemplo, los obtenidos en Padul (Granada) (Pons y Reille 1988), Banyoles (Gerona) (Pérez-Obiol y Julià 1994) y Sanabria (Zamora) (Sobrino *et al.* 2004). Estos análisis han demostrado que el clima en España ha cambiado de forma repetida debido a procesos naturales, como ha ocurrido en el resto del planeta, y que en algunos períodos del pasado se han dado condiciones climáticas radicalmente diferentes de las actuales. Así, y a modo de ejemplo, a través del estrecho de Gibraltar entraron en el Mediterráneo aguas polares y probablemente icebergs en bastantes ocasiones durante el último período glacial (Cacho *et al.* 1999).

Los periodos glaciales, que debieron caracterizarse por unas temperaturas de varios grados centígrados por debajo de las actuales, fueron mucho más largos que los interglaciales, y durante ellos se produjeron oscilaciones climáticas abruptas a escala geológica, como serían los ciclos cálidos *Dansgaard-Oeschger* durante la última glaciación (entre 110 000 y 10 000 años BP). Estas oscilaciones rápidas tuvieron su origen en el cambio de las corrientes oceánicas, que causó un impacto abrupto en el ámbito ibérico, como reflejan los cambios profundos en la vegetación (Burjachs y Julià 1994). La relevancia de estos episodios demuestra la existencia de cambios súbitos en el clima, que, aun teniendo un origen lejano, pueden propagarse globalmente. De hecho, las condiciones ambientales de la Península Ibérica y de la cuenca mediterránea han sido muy sensibles a la variabilidad climática de la región del Atlántico Norte. La variabilidad climática peninsular ha estado estrechamente acoplada a cambios en la circulación marina, aunque diferentes áreas han mostrado respuestas más o menos atenuadas en función de su localización (Sánchez-Goñi *et al.* 2002).

Las transiciones de los periodos glaciales a los interglaciales han sido rápidas a escala geológica y salpicadas de abruptos retrocesos a condiciones cuasiglaciales, como ocurrió durante el episodio del *Younger Dryas* (entre 13 000 y 11 600 años BP) en la mayor parte de Europa, aunque esta oscilación pudo no haber afectado a toda la Península Ibérica (Pérez-Obiol y Julià 1994, Allen *et al.* 1996, Carrión 2002). Los periodos interglaciales, como en el que nos encontramos desde hace 10000 años (el Holoceno) son, en comparación con los glaciales, además de más cálidos, climáticamente más regulares, aunque haya habido algunas breves fluctuaciones (Leira y Santos 2002).

Las condiciones climáticas durante el Holoceno tampoco han permanecido absolutamente constantes, demostrando diversos estudios que en líneas generales los climas ibéricos se han vuelto más áridos y las temperaturas se han incrementado gradualmente (Araus *et al.* 1997; Jalut *et al.* 1997, Jalut *et al.* 2000, Davis *et al.* 2003, Rimbu *et al.* 2003). Algunos de estos autores apuntan a que esa tendencia probablemente ha sido contrapuesta a la ocurrida en otras zonas de Europa y del Atlántico Norte.

El escenario climático de algo más del último milenio en la Península Ibérica está caracterizado, en líneas generales, por la presencia de un episodio cálido en la Edad Media, entre los siglos IX y XIII-XIV, acompañado por unas precipitaciones relativamente abundantes y regulares. Al calentamiento medieval le sucedió un episodio de relativo enfriamiento y de aumento de la irregularidad pluviométrica entre los siglos XIV y XIX. Estudios dendroclimáticos realizados en el ámbito peninsular español han permitido reconstruir, de forma puntual desde el siglo XII y más continuada desde el siglo XV, valores de temperatura y precipitación media

anual en varios puntos del territorio. El análisis temporal de la variabilidad de estas series, incluyendo la mayor o menor presencia de valores extremos, ha puesto de manifiesto la alternancia de períodos con características climáticas muy diferenciadas (Creus *et al.* 1997, Saz y Creus 1999, Saz 2003) (Figura 1.1). Así, el clima de los primeros siglos del milenio se caracterizó por elevados valores de precipitación y temperatura, con un régimen de gran regularidad que se prolongó hasta bien avanzado el siglo XIV, momento en que una y otra variable inician un notable descenso y un aumento de la frecuencia de valores extremos. Tal comportamiento preludia el comienzo de una fase de clima muy variable, y especialmente fría, que alcanza su momento álgido en el siglo XVII y se manifiesta hasta finales del XVIII y primeras décadas del XIX. Corresponde a la fase conocida como Pequeña Edad del Hielo (PEH), durante la cual la variabilidad climática fue muy elevada, a la vez que tenían lugar pulsaciones de distinta intensidad que agravaban sus características. La PEH ha sido también identificada en la Península Ibérica a partir de registros marinocosteros (Luque y Julià 2002), lacustres (Desprat *et al.* 2003) y documentales, usando en este caso noticias de rogativas y daños por inundación (Martín-Vide y Barriendos 1995, Barriendos y Martín-Vide 1998). Una de las pulsaciones más notables durante la PEH, con aumento de las sequías y las precipitaciones torrenciales en la vertiente mediterránea oriental, tuvo lugar a finales del siglo XVIII (Barriendos y Llasat 2003).

Respecto a los riesgos climáticos, en algunos períodos de la PEH fueron más frecuentes y de mayor magnitud que durante el siglo XX, con un impacto destacado en las sociedades de la época. El período reciente, desde mediados del siglo XIX hasta la actualidad ha supuesto, en una visión plurisecular y con la referencia de la PEH, una vuelta a condiciones de mayor regularidad climática.

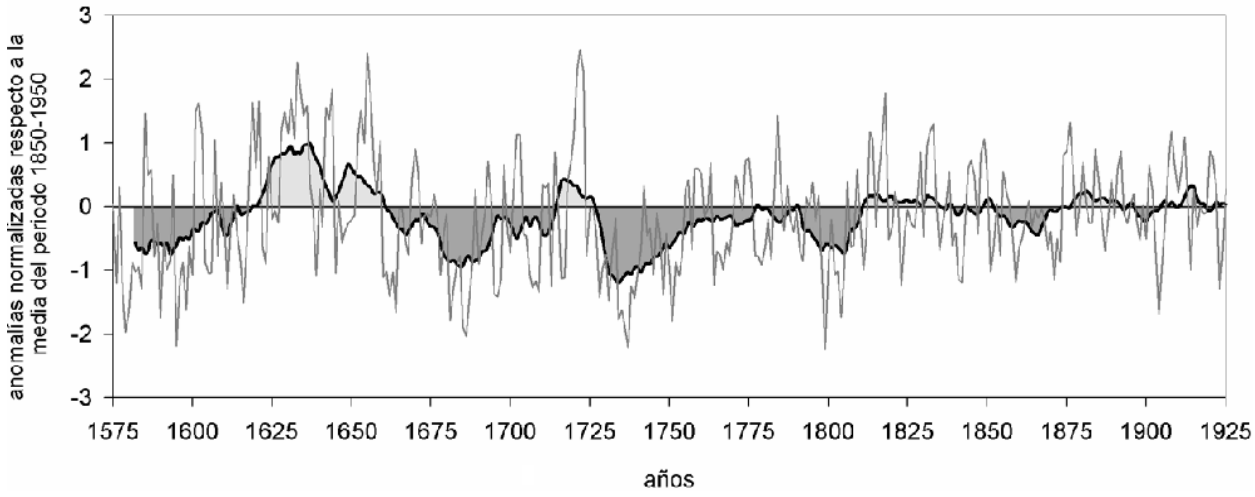


Fig. 1.1. *Anomalías de la precipitación anual del NW de España (1575-1925) –suavizado con media móvil de 15 años- (Elaborado por J.Creus).*

1.2. EL CLIMA ACTUAL

1.2.1. La temperatura

a) Temperatura media anual

Aunque la distribución de las isotermas medias anuales reproduce bastante bien el mapa hipsométrico, las diferencias de latitud entre el norte y el sur de España, aun sin tener en cuenta Canarias, y las diferentes características del océano Atlántico y del mar Mediterráneo introducen algunos matices. Los valores y las pautas espaciales principales de la temperatura

media anual en la España peninsular y Baleares son los siguientes: 1) el valor al nivel del mar varía entre poco menos de 14ºC en puntos de la costa cantábrica hasta algo más de 18ºC en la surmediterránea y en la suratlántica; 2) a lo largo del litoral mediterráneo oriental la temperatura media anual varía entre 15ºC en algunos sectores de la costa catalana a 18ºC en la almeriense, mientras que en Baleares los valores junto al mar quedan comprendidos entre 16 y 18ºC; 3) la temperatura media anual puede ser negativa por encima de unos 2800 m de altitud en la mitad norte peninsular (Pirineos) y en umbrías a partir de unos 3100 m en la sur (sierra Nevada); 4) la meseta septentrional presenta valores entre 10 y 12,5ºC y la meridional entre 12,5 y 15ºC, en general; 5) las tierras bajas de la cuenca del Ebro tienen temperaturas medias anuales algo superiores a los 14ºC, las del valle del Guadalquivir entre 17 y 18ºC y las extremeñas superan ligeramente los 16ºC; 6) los valores disminuyen desde los litorales hacia el interior; 7) los valores aumentan de norte a sur, a igualdad de altitud; 8) en el interior los valores disminuyen de poniente a levante (Figura 1.2).

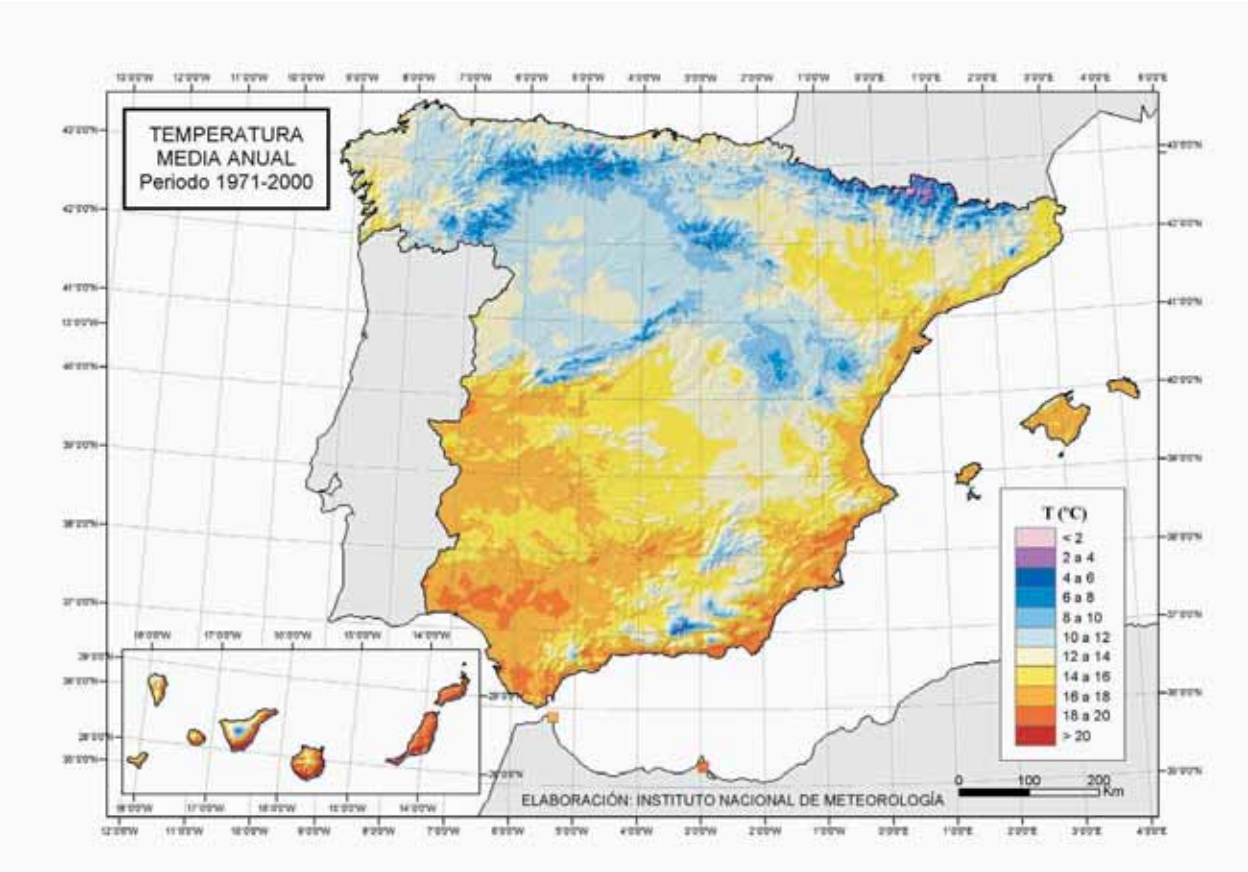


Fig. 1.2. *Temperatura media anual (ºC)(1971-2000) (Elaborado por el INM).*

Los algo más de 4ºC de diferencia entre las temperaturas medias anuales de las costas septentrional y meridional de la Península Ibérica suponen un gradiente latitudinal ligeramente superior a 1ºC/200 km. En la costa norteafricana, Ceuta y Melilla presentan valores comparables a los del litoral meridional ibérico. En Canarias las temperaturas son apreciablemente superiores a las del resto de España a igualdad de altitud, superándose los 20ºC, e incluso llegándose a los 21ºC, en las costas. En resumen, las temperaturas medias anuales no se alejan del promedio del planeta, pero muestran contrastes considerables entre sus tierras más elevadas y septentrionales y las más bajas y meridionales.

b) Temperaturas medias de enero y julio

Enero es el mes que presenta la menor temperatura media mensual, con la excepción de algunos lugares de Canarias y algún cabo gallego, en que febrero puede quedar alguna décima por debajo del primer mes del año. En cambio los promedios mensuales más altos no son exclusivos de julio, sino que en buena parte de los observatorios litorales, Baleares, Canarias, Ceuta y Melilla se registran en agosto, por causa de la inercia térmica de las aguas marinas, aunque con escasa diferencia respecto al mes precedente. Las características principales del mapa de isotermas del mes de enero pueden resumirse en las siguientes: 1) la isoterma de 6ºC engloba toda la mitad norte peninsular, con la excepción de la franja litoral y prelitoral por debajo de unos 500 m de altitud; 2) la misma isoterma abraza, en la mitad sur peninsular, Madrid, gran parte de Castilla-La Mancha, sierra Morena, alguna comarca del interior de la Comunidad Valenciana, las principales sierras Béticas y Penibéticas, así como los espacios más elevados de Extremadura, Mallorca y Tenerife; 3) la isoterma de 12ºC aparece en la costa surmediterránea y suratlántica, Ceuta, Melilla y por debajo de unos 700 m en Canarias.

Las características principales del mapa de isotermas del mes de julio pueden resumirse en las siguientes: 1) la isoterma de 24ºC engloba una amplia área en la mitad meridional de la España peninsular, exceptuando una franja oriental de Castilla-La Mancha, junto con la cordillera Ibérica, algunas tierras valencianas interiores, las principales sierras Béticas y algunas alineaciones de los montes de Toledo y Sierra Morena; 2) los 24ºC son también superados, dentro de la mitad septentrional, en las tierras más bajas de la cuenca del Ebro; 3) la isoterma de 16ºC sólo aparece en la cordillera Cantábrica y en los niveles más altos del macizo Galaico y los Montes de León, de los Pirineos, de las cordilleras Ibérica y Central, de sierra Nevada y del Teide; 4) la costa cantábrica no alcanza los 20ºC. Sólo en las cordilleras más elevadas y en la costa cantábrica el verano es fresco, mientras que en gran parte de la mitad sur puede calificarse de muy caluroso. En el curso medio del Guadalquivir, entre Jaén y Sevilla, se llegan a rebasar los 27ºC como promedio mensual.

c) Temperaturas extremas

Resulta bien conocido que el umbral de los 40ºC se rebasa casi todos los veranos en algunas capitales andaluzas, tales como Córdoba y Sevilla, así como en otros lugares de la mitad sur de España. Incluso el citado valor se ha superado en ocasiones sobradamente. Así, Écija (Sevilla) ha registrado en diversas ocasiones 47ºC (7 de julio de 1959, varias jornadas en julio de 1967, etc.). Igualmente, en Sevilla se han alcanzado los 47ºC (6 de agosto de 1946). Durante la “ola de calor” de julio de 1995, Sevilla y Córdoba llegaron a los 46,6ºC. El récord de 51ºC anotado el 30 de julio de 1876 en Sevilla es dudoso, así como otros valores superiores a los 50ºC en observatorios menores. Sin embargo, hay que contemplar, a la vista de los registros existentes, que en alguna ocasión hayan podido alcanzarse los 50ºC en algún lugar de la cuenca del Guadalquivir.

Aunque con menor frecuencia, los 40ºC no son exclusivos de las tierras andaluzas, porque se han alcanzado y rebasado en Castilla-La Mancha, Extremadura y Murcia, y, más raramente, en las tierras bajas y medias navarras, riojanas y aragonesas, Valencia, Alicante, Mallorca, interior de Cataluña, tierras bajas de Orense y algún punto de las Rías Bajas, poblaciones de Madrid, Tenerife e islas orientales de Canarias. Incluso la temperatura máxima absoluta de Bilbao ha superado los 40ºC, bajo situaciones del sur. La isoterma de 45ºC puede considerarse exclusiva del valle del Guadalquivir. Aunque la situación atmosférica más general y clara de “ola de calor” con registros superiores a los 40ºC es la de advección de aire de origen sahariano en las capas bajas de la troposfera, en algunos lugares de España el citado umbral se ha alcanzado bajo otras situaciones (poniente de tipo *föhn* en la costa valenciana, sur también de tipo *föhn* en la costa vasca, etc.).

En cuanto a las temperaturas mínimas absolutas, en el litoral mediterráneo, peninsular y balear, el litoral suratlántico y las tierras bajas de Canarias las heladas son poco frecuentes o, incluso, inexistentes. En cambio, la continentalidad y la altitud de las tierras interiores peninsulares y de las cordilleras permiten en ocasiones registros mínimos rigurosos. Los observatorios de las dos Castillas llegan a registrar temperaturas mínimas por debajo de los –10ºC y, en algunos lugares, inferiores a los –20ºC, en un treintenio. Menos de –10ºC pueden también medirse en la cuenca del Ebro, las hoyas intrabéticas, como la de Granada, el interior de Galicia y de Cataluña, y hasta en la costa guipuzcoana. Igualmente, en los niveles altos de las principales cordilleras las temperaturas han caído por debajo de los umbrales citados. En el último período internacional los aeródromos de los Llanos (Albacete), a sólo 704 m de altitud, ha registrado –24,0ºC, Villafría (Burgos), -22,0ºC, Vitoria, a poco más de 500 m, -21,0ºC, y Matacán (Salamanca), -20,0ºC. El récord oficial de temperatura mínima de España lo tiene Estany Gento, en el Pirineo de Lérida, a 2120 m de altitud, con –32ºC, el 2 de febrero de 1956, durante una de las "olas de frío" más crudas del siglo XX. Probablemente en las más altas cimas del Pirineo aragonés se hayan alcanzado alguna vez los –40ºC. En un área de la cordillera Ibérica a caballo entre Zaragoza, Teruel y Guadalajara se localizan algunas de las tierras más frías de España en invierno, si se tiene en cuenta su relativamente modesta altitud, de entre 850 y 1100 m. Así, los observatorios de Calamocha y Molina de Aragón han llegado a registrar valores de –28ºC a –30ºC.

d) Amplitud térmica media anual y la continentalidad

La amplitud media anual (diferencia entre las temperaturas medias de los meses más cálido y más frío), que constituye un buen índice de la continentalidad, es notablemente elevada en la Meseta, en especial la meridional, y la cuenca del Ebro. En algunos lugares de la Meseta sur llega a haber una amplitud media anual de más de 20ºC. Valores de 18ºC y aún más son comunes en las tierras bajas del valle del Ebro y sus afluentes y entre 16 y 17ºC en la Meseta norte. Por el contrario, las tierras litorales canarias tienen las mínimas amplitudes medias anuales, debido a su insularidad y baja latitud. Así, en las costas canarias el mes más cálido sólo se diferencia del más frío en 5ºC a 7ºC. En la España peninsular la menor continentalidad, o la mayor oceanidad, la tienen las costas coruñesas, con unos 9ºC. En cambio, el litoral mediterráneo oriental y el balear presentan una relativamente elevada amplitud, de unos 14ºC, por la influencia de un mar casi cerrado y rodeado por altas tierras.

1.2.2. La precipitación

a) Precipitación media anual

La precipitación es el elemento climático más importante en España, tanto desde un punto de vista climático como en su consideración de recurso, dadas su modesta cuantía en gran parte del territorio y su elevada variabilidad temporal y espacial. El total medio anual ha servido tradicionalmente para distinguir tres grandes áreas: las Españas lluviosa, seca y semidesértica. La divisoria entre la España lluviosa y la seca suele establecerse en la isoyeta de 800 mm, y, en algún caso, en la de 600 mm o la intermedia. La divisoria entre la España seca y la semidesértica, a veces también denominada semiárida o árida, la marcan los umbrales de los 300 ó 350 mm. Estas tres categorías no tienen una representación espacial perfectamente separada, sino que se presentan en numerosos sectores intercaladas. Así, el mapa de precipitación media anual de España es muy complejo, con muchos enclaves de alta o baja pluviometría relativa insertos en comarcas de signo opuesto (Figura 1.3).

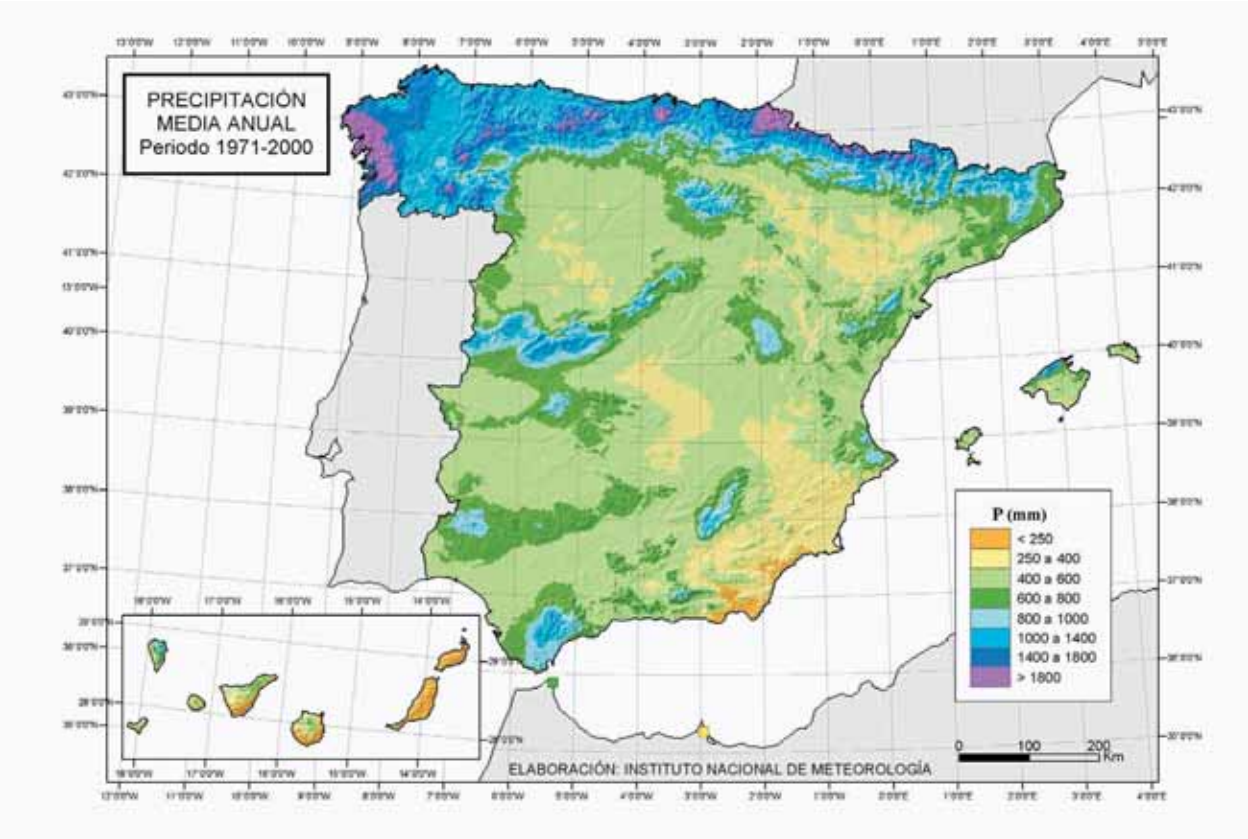


Fig. 1.3. *Precipitación media anual (mm)(1971-2000) (Elaborado por el INM).*

La España lluviosa ocupa fundamentalmente, y con continuidad, casi todo el norte y noroeste del país. Los valores medios superan en la mayoría de los casos los 1000 mm, y se llegan a rebasar los 2000 mm en los sectores mejor expuestos a los flujos húmedos marítimos. Al margen de ella, son numerosos los sectores peninsulares, e incluso insulares, que rebasan el umbral de los 800 mm, casi siempre cordilleras o sierras. La España seca, la más extensa, ocupa un amplísimo espacio central en la Península Ibérica, que abarca las tierras llanas de las dos Mesetas, las bajas de la cuenca del Ebro, la depresión del Guadalquivir, así como buena parte de la fachada oriental ibérica, excepto el Sureste, y los litorales surmediterráneo y suratlántico. También pertenecen a la España seca las islas Baleares, excepto la sierra de Tramuntana, en Mallorca, algunas de las tierras más altas y otras de las medianías del archipiélago canario, Ceuta y Melilla. Valores cercanos a los 500 mm son bastante frecuentes en la España seca. La España semidesértica tiene su principal representación en el Sureste peninsular, esto es, buena parte de la provincia de Almería y sectores de Murcia, Granada y Alicante. Al margen, quedan algunos enclaves, superficialmente reducidos, en las cuencas del Ebro y del Duero, así como Lanzarote, Fuerteventura y las tierras bajas de las restantes islas Canarias, excepto la Palma.

A una escala de conjunto, la precipitación anual en la Península Ibérica disminuye de norte a sur y de oeste a este, por lo que en la diagonal imaginaria que une Galicia y Almería se produce el contraste pluviométrico extremo. En Canarias la precipitación también disminuye de norte a sur, en cada isla, y de poniente a levante en el archipiélago. En Baleares la precipitación aumenta, en general, de suroeste a noreste.

En la España peninsular el volumen medio anual de precipitación durante el treintenio 1961-1990 se estima en 327.286 $x10^6$ m^3, lo que equivale a una altura media de 665 mm. El valor más bajo de la España peninsular corresponde al cabo de Gata (Almería), entre 125 y 150 mm,

dependiendo del período analizado, mientras que en algunos sectores bien expuestos de la España lluviosa han de rebasarse los 2500 mm. Ello supone multiplicar por más de 20 la primera cantidad para obtener la segunda. En Baleares, los valores extremos son de unos 1400 mm, en la sierra de Tramuntana, y de poco más de 300 mm en algunos puntos de Formentera. En Canarias el rango de valores lo marcan cantidades estimadas de entre 1100 y 1300 mm, en el noreste de la Palma, y de menos de 100 mm en sectores de Lanzarote, Fuerteventura y en el sur de las otras islas, excepto la Palma.

b) Variabilidad pluviométrica interanual

Consustancial con los climas mediterráneos, la pluviometría de gran parte de España se caracteriza por su elevada variabilidad interanual. El umbral del 20% para el coeficiente de variación anual permite establecer la divisoria entre los climas mediterráneos y el marítimo templado en la Península Ibérica. En el mar Menor y en algún otro lugar de la costa oriental el coeficiente de variación anual alcanza el 40%, lo que significa una variabilidad interanual muy alta. En Canarias también se rebasa este último valor (Figura 1.4).

c) Régimen pluviométrico estacional

Uno de los hechos climáticos más sorprendentes de la España peninsular es la extraordinaria variedad de regímenes pluviométricos estacionales. No hay, de este modo, una estación lluviosa general en el país, ni incluso una seca, aunque, en este caso, un alto porcentaje de las tierras españolas padece veranos secos o muy secos. En los dos archipiélagos sí que, además de un mínimo estival sin excepción, el máximo está bien definido, en otoño en Baleares y en invierno en Canarias.

Los regímenes pluviométricos estacionales permiten dibujar un complejo y variado mosaico espacial. En España aparecen representados nada menos que 13 regímenes pluviométricos estacionales de los teóricos 24 posibles, que resultan de la ordenación decreciente de las cantidades medias de las cuatro estaciones (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. *Conclusiones globales sobre los regímenes pluviométricos estacionales en España (Martín Vide y Olcina 2001).*

Conclusiones	*Regímenes representados*	*Áreas principales de distribución*
Máx. invernal ⇒ mín. estival	IPOV, IOPV	Vertientes atlántica, cantábrica y Surmediterránea, y Canarias
Máx. estival ⇒ mín. invernal	VOPI, VPOI	Pirineo catalán y un sector de la Cordillera Ibérica (Jiloca-Guadalaviar)
Máx.otoñal⇒mín.no primaveral	OPIV, OPVI, OIPV, OVPI	Vertiente mediterránea oriental y Baleares
Máx.primaveral⇒mín.no otoñal	POIV, POVI, PIOV, PVOI, PVIO (excepción)	Interior peninsular
	Equilibrado	Valle de Arán

I: invierno (DEF); P: primavera (MAM); V: verano (JJA); O: otoño (SON).

En el valle de Arán la precipitación se reparte de modo tan equidistributivo entre las cuatro estaciones, que puede hablarse de un régimen equilibrado. Los regímenes del primero y del segundo grupo son contrapuestos, suponiendo los que presentan máximo estival la inversión total del régimen mediterráneo típico y del marítimo de costas occidentales. La escasez de lluvia en invierno en regiones del este peninsular es un rasgo singular de los regímenes estacionales españoles. El verano es extremadamente seco en el sur de España, incluida Canarias. El porcentaje de precipitación estival respecto a la total anual es inferior al 3% en el estrecho de Gibraltar y en casi todo el archipiélago canario.

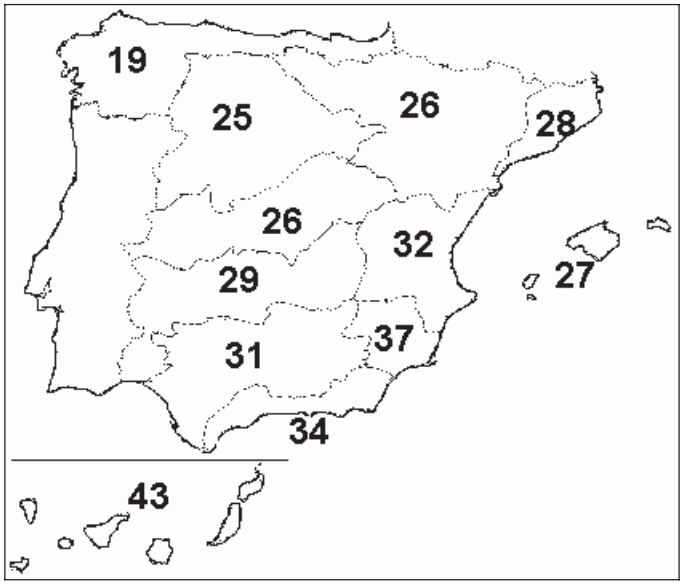


Fig. 1.4. *Coeficiente de variación medio de referencia (%) de la precipitación anual por cuencas hidrográficas, a partir de 274 estaciones (período básico 1949-1989) (Martín-Vide 1996).*

d) Frecuencia de la precipitación y secuencias secas

Para la España peninsular pueden establecerse los siguientes valores y pautas espaciales sobre el número medio anual de días con precipitación apreciable: 1) disminuye con claridad de norte a sur; 2) disminuye algo, en general, de oeste a este; 3) presenta máximos relativos sobre los principales macizos montañosos; 4) supera los 100 días, casi sin excepción al norte del paralelo 40ºN, en Galicia, los montes de León, el litoral septentrional y la cordillera Cantábrica, los sectores pirenaicos, prepirenaicos y de las cordilleras Central e Ibérica más elevados, La Rioja y buena parte de la Meseta norte; 5) no alcanza los 50 días en el sector más árido del Sureste peninsular; 6) apenas llega a 20 días en puntos del sur de Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife; y 7) el máximo se localiza en el extremo oriental de la franja cantábrica (San Sebastián 188,0 días, en el período 1951-1990).

En general, gran parte de España, si se exceptúan la franja septentrional lluviosa y las áreas semidesérticas, tiene un porcentaje anual de días de precipitación comprendido entre un 15 y un 35 %. Si se usa el umbral de 1 mm para considerar un día de precipitación, parte del Sureste peninsular contabiliza menos de 30 días al año, mientras que en el norte llegan aún a sobrepasarse los 140 días. En consecuencia, la frecuencia de la precipitación en gran parte de España, excepción hecha de Galicia, la franja cantábrica, los Pirineos occidentales y sectores próximos, puede calificarse de relativamente baja a muy baja.

El reparto estacional de los días con precipitación muestra mayor regularidad y generalidad que el de las cantidades. En conjunto, el invierno y la primavera son las estaciones con mayor frecuencia de la precipitación y el verano la que cuenta con menos días lluviosos. A menor latitud, menor frecuencia de la lluvia en verano.

Las secuencias constituidas por días secos consecutivos alcanzan duraciones muy altas en el sur de España, no sólo en la mitad cálida del año, lo que refleja la gravedad de las sequías (Figura 1.5). En el período 1951-1990, con el umbral 0.1mm, se han registrado rachas secas de más de 4 meses en observatorios andaluces, extremeños y castellano-manchegos, habiendo rebasado alguna los 5 meses en Málaga, Almería y Huelva.

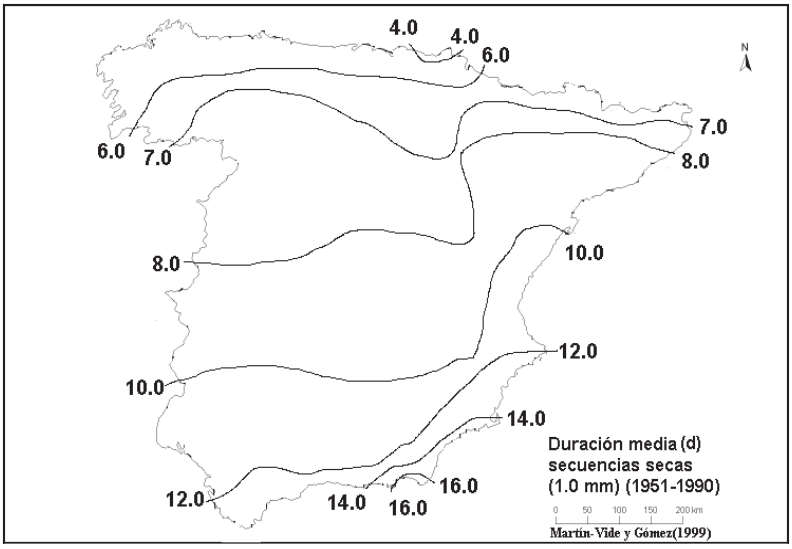


Fig. 1.5. *Duración media (d) de las secuencias de días secos, con el umbral de 1.0 mm, en el período 1951-1990 (Martín-Vide y Gómez 1999).*

La nieve es un fenómeno poco frecuente en gran parte de España; sólo en las grandes cordilleras peninsulares el número de días de nieve adquiere relevancia. En conjunto, las pautas espaciales y los valores más señalados del promedio anual de días de nieve son: 1) la altitud es el factor más decisivo, de manera que, mientras al nivel del mar la nieve es un fenómeno raro, con menos de 5 días de ocurrencia, a partir de unos mil metros, en la Península Ibérica y las Baleares, y de unos 2000 m, en Canarias, el hidrometeoro sólido no falta ningún invierno varios días, rebasando en promedio la decena; 2) todo el litoral español, excepto las costas cantábrica, parte de la catalana y la menorquina, ve la nieve menos de un día al año; 3) la nieve es prácticamente desconocida en las tierras más bajas y meridionales de Cádiz, en Ceuta y Melilla, y por debajo de unos 1200 m en Canarias; 4) la nieve es más frecuente en la mitad norte peninsular que en la meridional; a partir de unos 1800 m de altitud en la primera y de unos 2300 m en la segunda el número de días de nieve rebasa al de lluvia; 5) en Baleares sólo en las cimas de la sierra de Tramuntana, en Mallorca, la nieve tiene una cierta presencia; y 6) en Canarias la nieve sólo aparece en los niveles más altos de Tenerife, La Palma y Gran Canaria.

El número de días en que la nieve cuaja alcanza valores pequeños, excepto en las cordilleras más elevadas, donde el manto nivoso puede persistir, además, bastantes días. El Pirineo es, con diferencia, el área con una mayor abundancia y persistencia de los mantos de nieve, que, por encima de los tres mil metros, no se funden en verano, permitiendo la existencia de pequeños glaciares. El calendario de la nieve señala al invierno como la estación con mayor frecuencia. En la mitad norte peninsular a partir de unos mil metros sólo queda a salvo de la precipitación en forma de nieve el trimestre estival. En las cimas pirenaicas la nieve puede llegar a verse caer en pleno verano.

El granizo es un fenómeno poco frecuente, con una ocurrencia media inferior a 5 días al año en la mayor parte de España, aunque no por ello sin consecuencias económicas graves en el agro. Incluso promedios inferiores a un día son comunes en Andalucía y en Canarias, las regiones menos afectadas. El norte de España es, por el contrario, el área con mayor número de días con granizo 10 ó más en La Coruña, Asturias y Cantabria, aunque algunas comarcas del interior de la Comunidad Valenciana y del valle del Ebro con cultivos hortofrutícolas muy sensibles al granizo y al pedrisco sean más castigadas en cuanto a pérdidas económicas. El

calendario del granizo en España es dual: en gran parte del país son los meses cálidos del año, desde la primavera al otoño, los que concentran un mayor número de días de granizo, producto de las tormentas, mientras que en la franja más septentrional los meses fríos muestran una mayor frecuencia, relacionada con frentes fríos.

e) Intensidad pluviométrica

La intensidad pluviométrica diaria es elevada en buena parte de España, siendo las cantidades máximas en un día estimadas para un período de retorno de 10 años superiores a los 100 mm en un alto porcentaje de las tierras del litoral y prelitoral mediterráneo peninsular, en puntos de Baleares, en otros de los niveles medios y altos de Canarias, en numerosos sectores de Galicia y las regiones cantábricas, en macizos del Pirineo, en las vertientes meridionales occidentales de la cordillera Central y en sectores de Andalucía occidental. Los espacios centrales de las dos Mesetas son, por el contrario, los de intensidades más moderadas, que quedan incluso por debajo del medio centenar de milímetros para el período de retorno considerado. En todo caso, la dependencia de la precipitación mensual y anual de un escaso número de días lluviosos en gran parte de España es manifiesta.

El calendario de mayor riesgo de ocurrencia de precipitaciones torrenciales distingue el final del verano y el otoño en una franja litoral y prelitoral en la vertiente mediterránea oriental de la Península Ibérica, desde Cataluña hasta Andalucía oriental, englobando, por el interior, la cuenca del Ebro hasta Zaragoza y, por el norte, áreas pirenaicas, y extendida hacia el este hasta las Baleares. En un área que comprende la parte oriental de la Meseta, La Rioja y parte de Navarra los valores máximos diarios no es raro que ocurran en un mes de verano, mientras que en el área occidental se producen sobre todo en invierno.

Los records de precipitación diaria en España confirman la existencia de registros superiores a 500 mm, casi siempre otoñales. Tal cantidad en una jornada, aun repartida a lo largo de la misma, supone intensidades horarias considerables. En una ocasión pudo sobrepasarse los 800 mm, el 3 de noviembre de 1987 en Oliva (Valencia), con 817 mm., aunque este dato hoy se considera dudoso, pudiendo ser el total acumulado de la citada jornada y de la precedente. El área de mayor intensidad diaria de la precipitación en España es la que componen las comarcas de la Safor, en el sur de Valencia, y su vecina la Marina Alta, en el norte de Alicante. Para un período de retorno de 10 años en algún lugar de esta área cabe esperar que se alcancen o se rebasen los 250 mm en un día. Igualmente, en algunas sierras (Grazalema, Cádiz; de Gata, Cáceres) los valores estimados son muy altos.

La contribución porcentual de los días más lluviosos a los totales anuales es considerable en la fachada oriental de la Península Ibérica: el 25% de los días con cantidades más altas aporta más del 70% del total anual (Figura 1.6).

En buena parte de la franja más próxima a las aguas del Mediterráneo, así como en puntos de montaña, las intensidades de la precipitación en cortos períodos de tiempo (horarios o minutales) pueden alcanzar valores muy elevados, que evocan algunos climas tropicales húmedos, aun sin alcanzar sus récords. Las cantidades máximas esperadas en una hora para un período de retorno de 10 años rebasan los 50 mm en amplios sectores del litoral y prelitoral mediterráneo oriental de la Península Ibérica, y en otros de los citados anteriormente. Muchos chubascos en Cataluña, la Comunidad Valenciana, Murcia, Baleares y comarcas andaluzas superan en algún momento intensidades de 1 mm/min. Tales aguaceros, aunque suelen durar poco, producen a menudo inundaciones o problemas de drenaje. En casos excepcionales ha habido en algunos lugares de España de las regiones citadas puntas de intensidad instantánea superiores a los 5 mm/min. Uno de los récords es el de la población valenciana de Manuel donde se totalizaron 119 mm en una hora, el 1 de julio de 1993, no bajando de 4 mm/min la intensidad durante 20 minutos seguidos).

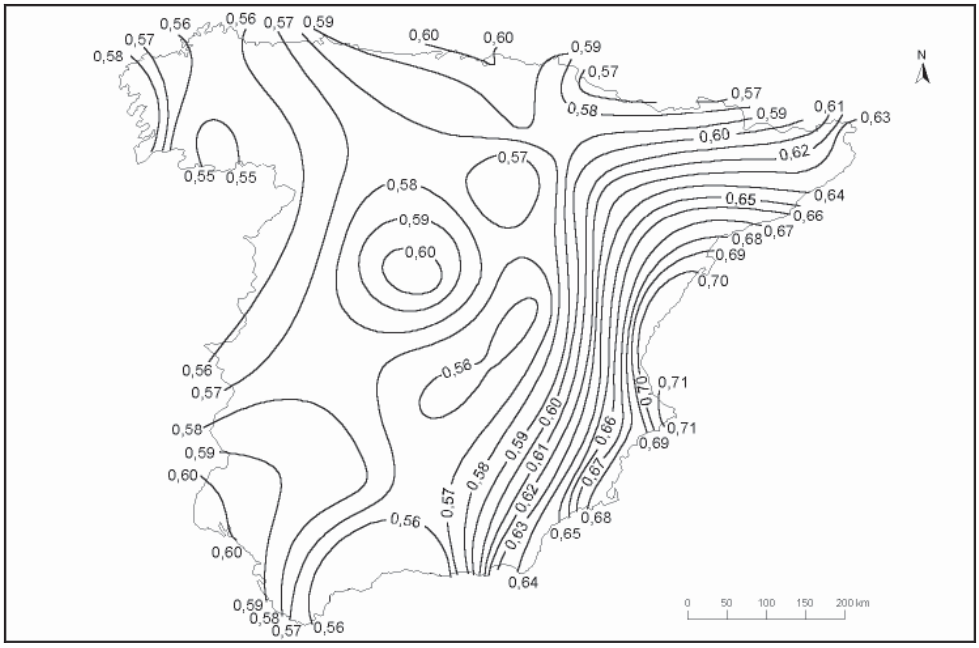


Fig. 1.6. *Índice de concentración de la precipitación diaria -el valor 0.61 corresponde, aproximadamente, a un aporte del 70% de la cantidad anual por parte del 25% de los días más lluviosos- (Martín-Vide 2004).*

1.2.3. Otros elementos climáticos

a) Radiación solar

España recibe una apreciable cantidad de radiación solar, con valores inferiores a los que se registran en las latitudes tropicales bajo las altas presiones homónimas, pero similares a los que se observan en la zona ecuatorial. Las series disponibles de radiación solar, que se mide en muy pocos lugares (en 1998 eran 29 los observatorios que componían la red radiométrica nacional), permiten concluir: 1) la irradiación global diaria media es inferior a 15 MJ/m^2 en la franja cantábrica y buena parte de Galicia, los Pirineos y el valle del Ebro, no alcanzándose 12 MJ/m^2 en los sectores más umbrosos de la vertiente norte de la cordillera Cantábrica y en la costa vasca; 2) la mitad sur peninsular, Ibiza y gran parte de las tierras canarias superan los 16 MJ/m^2; 3) en sectores de la costa andaluza, así como en parte de Canarias, se rebasan los 18 MJ/m^2. Mensualmente, los máximos de la irradiación global diaria se alcanzan en junio y julio, con más de 20 MJ/m^2, excepto en la franja cantábrica, y hasta más de 25 MJ/m^2 en la mitad sur peninsular, Ibiza y sectores de Canarias. Los mínimos se concentran en diciembre, seguido por enero, con valores inferiores a 10 MJ/m^2, excepto en tramos de la costa andaluza y en Canarias, quedando por debajo de los 5 MJ/m^2 en Galicia, las regiones del Cantábrico, los Pirineos y parte de las cuencas del Duero y del Ebro.

b) Insolación

A partir de los registros de insolación de 88 observatorios para el período internacional 1961-1990, puede establecerse que los valores extremos se dan en Izaña, con 3448 horas de sol al año, en la atmósfera diáfana por encima del mar de nubes, y en el aeropuerto de Bilbao, con 1525 horas. En la España peninsular la insolación media anual presenta también una amplia variación, pues los valores prácticamente se duplican entre Bilbao y Cádiz, observatorio que rebasa las 3000 horas de sol al año. En conjunto, el área menos asoleada de España es la

cornisa cantábrica, que no alcanza las 1750 horas, mientras que la que dispone de un mayor número de horas de sol es la costa de la Luz, entre Cádiz y Huelva, que raya o sobrepasa ligeramente el umbral de las 3000 horas.

La isohelia de las 2000 horas, umbral a partir del cual los usos de la energía solar pueden cubrir razonablemente muchas necesidades domésticas, se ciñe prácticamente a Asturias, Cantabria, el País Vasco, una franja no atlántica de Galicia y algún sector pirenaico. El resto del país dispone de una abundante insolación. Toda la mitad sur de la España peninsular, las Baleares, gran parte de Canarias e, incluso, amplias áreas de la mitad norte peninsular, como es el caso de la parte occidental de la cuenca del Duero, Aragón y el sur de Cataluña, tienen más de 2500 horas de sol al año. En Canarias, localmente y en las medianías septentrionales, entre unos 700 y 1200 m, se dan valores de insolación relativamente bajos.

c) Nubosidad

Con los datos de insolación y de número de días de cielo despejado y de cielo cubierto de 88 observatorios españoles del período 1961-1990, el número medio anual de días despejados está comprendido entre sólo 25,8 en el aeródromo de Vitoria y 176,2 en Izaña. En la España peninsular los contrastes son también muy acusados, como ejemplifica el máximo citado y los 155,8 días de Cádiz, lo que supone multiplicar por seis el primer valor. El área con un menor número de días despejados, inferior a 40, comprende Asturias, Cantabria, el País Vasco y el interior de Galicia. Por contra, el área que registra más días de este tipo la integran el valle del Guadalquivir y la costa onubense y atlántica de Cádiz, además de lugares de Canarias, con más de 120 días.

El número medio anual de días cubiertos está comprendido entre tan sólo 13,4 en el aeropuerto del Hierro y 170,1 y 169,9, en San Sebastián y el aeródromo de Vitoria, respectivamente. En la España peninsular los contrastes son también muy marcados. En Cádiz sólo se registran 53,3 días, menos de una tercera parte de los que se producen en las capitales vascas citadas. En Baleares, los aeropuertos de Palma de Mallorca y de Ibiza no llegan al medio centenar de días. El mapa del número de días cubiertos muestra menos de 60 días en el litoral mediterráneo, desde Valencia hasta Málaga, el sur de Mallorca, Ibiza, algún punto del noreste de Cataluña, la costa atlántica gaditana, Lanzarote, Fuerteventura y el sur de las restantes islas Canarias, así como niveles elevados del mismo archipiélago. En cambio, se rebasan los 120 días cubiertos en Galicia, excepto las Rías Bajas, Asturias, Cantabria, País Vasco, el alto Ebro hasta Logroño, el norte de Castilla y León, parte de las cordilleras Ibérica, Central y Pirenaica y lugares húmedos de las Canarias.

d) Humedad del aire

Los valores de la humedad relativa media anual del período 1961-1990 para 90 observatorios principales varían entre 88 % en el monte Hacho de Ceuta, expuesto al aire húmedo que circula por el estrecho de Gibraltar, y 49 % en Izaña, a 2367 m, sumido en el aire muy seco que cubre la inversión del alisio. En la misma isla de Tenerife y en otras montañosas del archipiélago canario a unas altitudes inferiores a las del citado observatorio el característico y persistente mar de nubes da valores medios muy elevados. Al margen de los lugares mencionados, los valores medios anuales de la humedad relativa superan el 70% en Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, los Pirineos, el tercio norte de Castilla y León, Baleares, el nordeste de Cataluña, el mar Menor, la costa gaditana, Ceuta, Melilla y las medianías y puntos costeros de Canarias. En Galicia y las regiones del Cantábrico llegan a acercarse al 80 %. En resumen, es el norte de la España peninsular y los litorales los espacios con mayor humedad relativa; por el contrario, son las tierras más alejadas del mar, Madrid y sus alrededores, las de menor promedio anual.

Sobre el régimen anual de la humedad relativa pueden establecerse las siguientes pautas: 1) los valores medios mensuales presentan una amplia variación en el interior de la Península Ibérica, con máximo invernal (75-80%) y mínimo estival (40-50%); 2) la oscilación anual es, por el contrario, baja o muy baja en los litorales y las islas (menos de un 15%); 3) en algunos observatorios litorales del norte de España los máximos se producen en verano y los mínimos en invierno. En efecto, en el interior de España los valores máximos, en diciembre, enero u otro mes próximo, rebasan el 75 % y, en bastantes lugares, el 80 %, mientras que en julio y agosto no es raro que queden por debajo del 50 e, incluso, del 40 %. El trimestre estival es el de humedad relativa más alta en los litorales gallego septentrional, asturiano y cántabro, aunque con poca diferencia sobre las otras estaciones.

e) Presión atmosférica

La presión atmosférica muestra en una buena parte de España su máximo mensual en invierno, casi siempre en enero, y los valores más bajos en primavera, sobre todo abril, y verano, patrón que puede parecer el opuesto al esperado. Hay, de todos modos, observatorios en la Meseta norte en los que, con pequeñas diferencias con respecto a los meses invernales, el máximo ocurre en un mes estival. El comportamiento estacional general se debe al predominio de bajas presiones relativas en las tierras interiores de la Península en verano, fruto del fuerte caldeamiento del aire, con la consiguiente caída de la presión atmosférica (1015-1017 hPa), mientras que en la fachada cantábrica se extiende una faja de presión alta (1020 hPa) en relación con el anticiclón de Azores, prolongado en dorsal hacia el norte de España; y al predominio en invierno de altas presiones térmicas en el interior peninsular (1020-1022 hPa) y un área ciclónica en Galicia, visitada con frecuencia por borrascas frontales y frentes fríos.

f) Vientos

El carácter peninsular de buena parte de España, la compleja orografía y la insularidad del resto del territorio favorecen la existencia de vientos regionales y locales que se constituyen en elementos de significación climática en las áreas en que soplan. Como vientos regionales pueden destacarse, entre otros, el cierzo, la tramontana, el levante, el poniente y el ábrego. El alisio es típico de Canarias. Al margen de ellos, el régimen de brisas marinas caracteriza la atmósfera de los litorales durante la mitad cálida del año y en otras jornadas estables.

Los valores del recorrido del viento más bajos se registran en algunos observatorios de la Meseta sur, así como en ciertas comarcas a resguardo del viento (Bierzo, valles orensanos, Llanada alavesa, interior de Cataluña), mientras que el más elevado, para el período 1961-1990, lo ostenta Tarifa, seguido por dos observatorios de montaña, Izaña y Turó de l'Home (Montseny, Barcelona). Las cimas montañosas son más ventosas que las depresiones; ciertos cabos y sectores costeros presentan recorridos elevados.

En cuanto a las rachas máximas, en el citado período, la más veloz se registró en Izaña, con 200 km/h, habiendo sobrepasado la gran mayoría de los observatorios españoles alguna vez los 100 km/h. Mientras que el recorrido del viento no muestra una pauta general en su distribución temporal a lo largo del año, es casi general que la racha máxima se produce en los meses de octubre a marzo. Al combinar elevados recorridos del viento y rachas máximas, las áreas más ventosa del país son las proximidades del estrecho de Gibraltar, algunos cabos coruñeses, la costa guipuzcoana, el norte de Navarra, algunas muelas del valle del Ebro, los litorales norte y sur de Cataluña, los barloventos al alisio en Canarias y las cimas y portillos de las cordilleras principales.

1.2.4. Regionalización climática

El amplio rango de valores de los elementos climáticos y su compleja distribución espacial entraña dificultades para establecer una regionalización climática de España definitiva, que siempre contará con numerosos subtipos (Linés 1970, Font Tullot 2000, Capel Molina 2000, Martín Vide y Olcina 2001) (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. *Regionalización climática de España (Martín Vide y Olcina 2001).*

Tipo	*Subtipos*	*Variedad*	*P (mm)*	*Reg.pluv.est*	*T (ºC)*	*ΔT (ºC)*	*Otras caract.*
OCEÁNICO	ATLÁNTICO	Gallego	1000-2500	Máx. invernal y min. estival	11-15	8,5-12	Abundante Nubosidad y Elevada Humedad Ambiental
		Asturiano y cántabro	900-1500		12-14	10-11	
		Vasco litoral	1100-2000		12-14	10-12	
	DE MONTAÑA	-	1000-2500	-	<12	-	
MEDITERRÁNEO	SUBMEDI-TERRÁNEO	-	700-900		11-14	14,5-16	-
	CONTINENTAL	Meseta Norte	350-550	Máx. invernal o primaveral y mín. estival	10-12,5	16-18	Heladas frec.en inv.
		Meseta Sur	350-550		12-15	18-20,5	Temp.máx Estiv.altas
		Valle del Ebro	300-550	Máximos Equinocciales	13-15	18-20	Viento NW seco
	DE FACHADA ORIENTAL	Catalán	550-750	Máx. otoñal y mín. estival	14-17	14-17	Precipitac. Torrenciales en otoño
		Valenciano	400-850		15,5-17,5	13,5-16,5	
		Balear	400-800		16-18	13,5-15,5	
	MERIDIONAL	Litoral	400-750	Máx. invernal y mín. estival	17-18,5	10-13,5	Heladas excepcion.
		Valle del Guadalquivir	550-650		17-18,5	15-18,5	Temp.máx.estiv.muy altas
		Extremeño	450-600		16-16,5	16,5-18	Temp.máx.estiv altas
	ÁRIDO O DEL SURESTE	-	150-350	Mín. estival	14,5-18,5	13,5-17,5	Extrema aridez
	DE MONTAÑA	-	600-2000	-	<14	-	-
SUBTROP. / TROPICAL (canario)	LITORAL	-	75-350	Máx. Invernal y mín. estival	18-21	5-7,5	Alisios en N y extrema aridez en S
	DE MAR DE NUBES	-	500-1000		13-16	6-8	Elevada humedad ambiental
	DE ALTURA	-	450-700		<12	12-14	Aire muy seco

P, precipitación media anual (mm); *Reg.pluv.est.*, régimen pluviométrico estacional; *T*, temperatura media anual (ºC); *ΔT*, amplitud térmica media anual (ºC).

1.2.5. Tendencias climáticas recientes

Entraña una notable dificultad realizar una síntesis global y con carácter comparativo de los resultados obtenidos en los diversos análisis y estudios sobre las tendencias recientes de las variables climáticas en España. La razón estriba fundamentalmente en la utilización de distintos períodos de observación, la variedad de métodos con que se aborda el tratamiento estadístico de los datos, la diferente cobertura espacial y la propia complejidad del territorio. Aun así, no cabe duda de una elevación bastante general de la temperatura en España durante el último cuarto de siglo, mientras que la precipitación no ha mostrado tendencias claramente definidas.

a) Aumento de la temperatura

El incremento de la temperatura media anual planetaria en superficie durante el último siglo, y más concretamente a partir del segundo lustro de los años 70 del siglo XX, se ve confirmado en los análisis realizados a partir de series regionales obtenidas mediante interpolación de los observatorios que cubren diferentes regiones españolas, como también de las series individuales más largas existentes en España (Raso 1997). Aunque el conocimiento a largo plazo de la temperatura del aire en España dista aún de ser completo a una escala espacial de detalle, hay algunos estudios recientes sobre el conjunto del país o de su parte peninsular. Así, en un análisis preliminar para el período 1864-1999 de series regionales homogeneizadas de promedios mensuales de temperaturas máximas, mínimas y medias a partir de 98 observatorios que cubren el conjunto de España, se ha constatado un incremento estadísticamente significativo de las tres variables, tanto anual como estacionalmente, más marcado en invierno que en verano (Brunet *et al.* 2001a). Con una explícita corrección del efecto urbano, una investigación sobre 45 observatorios ibéricos 27 de ellos con series que comienzan en 1869, ha llegado a las siguientes conclusiones: 1) Las temperaturas máximas han crecido significativamente desde los años 70 del siglo XX, excepto en Galicia, a razón de 0.6ºC/década, como valor medio, aunque con apreciables variaciones regionales; 2) las temperaturas mínimas han experimentado un ascenso similar; y 3) el calentamiento ha sido detectado principalmente en invierno (Staudt 2004). En conjunto, es el norte y noroeste peninsular la zona con variaciones más suaves (Oñate y Pou 1996). Aunque en la España peninsular el año de inicio del calentamiento reciente puede establecerse algo antes del a menudo utilizado a escala global -1976-, las tendencias en las series de temperatura media anual españolas analizadas en el *European Climate Assessment (ECA)* desde ese año (Badajoz-Talavera, Salamanca, San Sebastián, Roquetes-Tortosa y Valencia) muestran, como la mayoría de las restantes europeas, un aumento de al menos 0,3ºC/década, en el período 1976-1999 (Klein Tank *et al.* 2002). Esto contrasta con tendencias negativas en el treintenio anterior 1946-1975. En Badajoz, Tortosa y Valencia existe una tendencia significativa, a lo largo del período 1946-1999, tanto en el número de días cálidos y de días de verano (positiva), como en el número de días fríos (negativa).

Diversos estudios sobre regiones españolas coinciden en un hecho esencial: el calentamiento a partir de la década de los años 70 es visible y significativo. Así, varios trabajos sobre 9 estaciones de la Meseta norte han revelado una tendencia creciente significativa de las temperaturas mínimas medias anuales de 0.051ºC/año, en el período 1972-1994, no existiendo en el intervalo temporal mayor 1945-1994 (Labajo *et al.* 1998, Labajo y Piorno 2001), así como de las máximas medias anuales (Labajo y Piorno 1998). El alza en las temperaturas mínimas y en las medias, pero no en las máximas, ya había sido constatado anteriormente en 5 ciudades de la misma región (incluyendo Madrid), con series que en dos casos empezaban en 1869 y acababan en 1992 (Esteban-Parra *et al.* 1995).

El análisis de las variaciones y tendencias de las temperaturas máxima y mínima media anual en la Meseta Meridional en el período 1909-1996, previa homogeneización mediante el test SNHT de las series de 21 estaciones y posterior elaboración de una serie regional, muestra como resultados más relevantes: 1º) Las temperaturas máximas anuales han registrado un significativo incremento, cifrado en 0.71ºC durante el citado periodo, mientras que la tendencia de las mínimas, también positiva, carece de significación estadística; y 2º) La evolución temporal muestra fases paralelas a las planetarias, estando caracterizada la del tramo final 1972/73-1996 por un significativo incremento tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas, de 1.62ºC y 1.49ºC, respectivamente (Galán *et al.* 2001). Resultados similares se obtuvieron sobre 7 observatorios de primer orden de la región (Cañada *et al.* 2001).

Para Aragón, Navarra y La Rioja el análisis de las series homogeneizadas de valores medios estacionales de las temperaturas máxima y mínima diarias en 15 observatorios, durante los períodos 1921-1997 y 1938-1997, respectivamente, dio los siguientes resultados: 1) Desde

comienzos de la década de los años 70 se registra un calentamiento generalizado que no es homogéneo estacionalmente, dado que no se detecta en otoño, pero es muy claro en particular en las temperaturas máximas de primavera, 0.143ºC/año (1975-1997), y de verano, 0.096ºC/año (1973-1996); 2) en primavera el incremento de la amplitud térmica diaria es significativo; y 3) exceptuando el otoño, se ha producido una disminución general de la variabilidad desde mediados de los años 70, de manera que las anomalías registradas no sobrepasan las observadas anteriormente (Abaurrea *et al.* 2001).

Los análisis de 23 estaciones de la cuenca del Segura para el período 1940-1997 coinciden en la significación de su tendencia creciente desde los años 70. Del mismo modo, es la primavera la estación que muestra un mayor calentamiento, 0.123ºC/año para las máximas (1970-1997). Los mayores aumentos en las máximas se dan en las áreas de montaña, mientras que son las tierras bajas las que han mostrado un mayor incremento de las mínimas (Horcas *et al.* 2001).

Otras series regionales de temperatura máxima, mínima y media a resolución estacional y anual para Cataluña, construidas a partir de 23 estaciones, localizadas preferentemente en sectores no urbanos, y con las verificaciones de homogeneidad del test SNHT, han permitido establecer las pautas temporales en la región sobre un período superior a un siglo (1869-1998). Se distinguen tres fases: un aumento térmico entre 1869 y 1949, de 0.01ºC/año; un corto paréntesis frío, aunque también significativo, a razón de -0.03ºC/año, desde mediados de siglo hasta mediados de la década de los 70; y la marcada alza de la temperatura desde entonces hasta el final del período, de 0.07ºC/año (Brunet *et al*. 2001b)(Figura 1.7). Para el período completo el aumento es de 0.89ºC, siendo el invierno, con 1.78ºC, la estación que ha experimentado el mayor calentamiento, y el verano la de aumento más suave, con 0.59ºC. Las series de temperaturas máximas y mínimas medias anuales y estacionales confirman pautas similares, con un ligero mayor incremento en las primeras (0.96ºC) que en las segundas (0.82ºC) (Brunet *et al*. 2001c). Para el observatorio Fabra (Barcelona) sendos análisis de las temperaturas máximas y mínimas diarias han confirmado el comportamiento diferenciado entre ellas y la tendencia general al alza (Serra *et al.* 2001).

En un trabajo sobre 23 observatorios de la Comunidad Valenciana y de Murcia, con el período común 1940-1996, se detectó una llamativa discrepancia en la evolución de la amplitud térmica diaria de los observatorios urbanos y rurales, lo que condujo a concluir que buena parte del calentamiento observado en las series térmicas de los primeros era consecuencia de la influencia urbana (Quereda y Montón 1999), efecto que muy recientemente se ha tratado de evaluar mediante teledetección (Quereda *et al.* 2004). Por otra parte, se aprecia un cambio en la variabilidad día a día en la serie de temperaturas diarias de Cádiz-San Fernando a lo largo de un período que se extiende desde el primer cuarto del siglo XIX hasta la última década del XX (Moberg *et al.* 2000).

b) Tendencia no definida en la precipitación

La tendencia a la disminución de los totales pluviométricos en latitudes subtropicales apuntada en el tercer informe del IPCC (IPCC 2001) no resulta de fácil verificación en el caso de España, dada la complejidad de las distribución espacial de la precipitación, no sólo en su cuantía, sino también en su reparto estacional y en su concentración temporal, lo que obliga al empleo de un número considerable de series climáticas, en pocos casos disponibles con la necesaria longitud. No existe un estudio exhaustivo que permita cubrir a una resolución espacial detallada el conjunto del país. Además, la elevada variabilidad temporal de la precipitación en buena parte de España, inherente a su condición mediterránea, exige series largas, preferiblemente centenarias. Las 10 series españolas de precipitación media anual analizadas en el *ECA* (Badajoz-Talavera, Madrid, Málaga-aeropuerto, Navacerrada, Salamanca, San Sebastián, Torrevieja, Roquetes-Tortosa, Valencia y Zaragoza-aeropuerto) sobre el período 1946-1999, no muestran, a diferencia de un cierto número de series europeas, un aumento de los totales,

acorde con el previsible incremento general de la precipitación planetaria. Tampoco se aprecia en el caso de los mismos observatorios de España tendencia significativa en el número anual de días lluviosos (≥1mm). Sobre la evolución de las cantidades de lluvia por encima de determinados umbrales y la aportación porcentual de los días más lluviosos al total anual, que podrían reflejar variaciones en la intensidad pluviométrica, sólo Madrid muestra una tendencia negativa en el primer caso y, junto con Tortosa, en el segundo (Klein Tank *et al.* 2002).

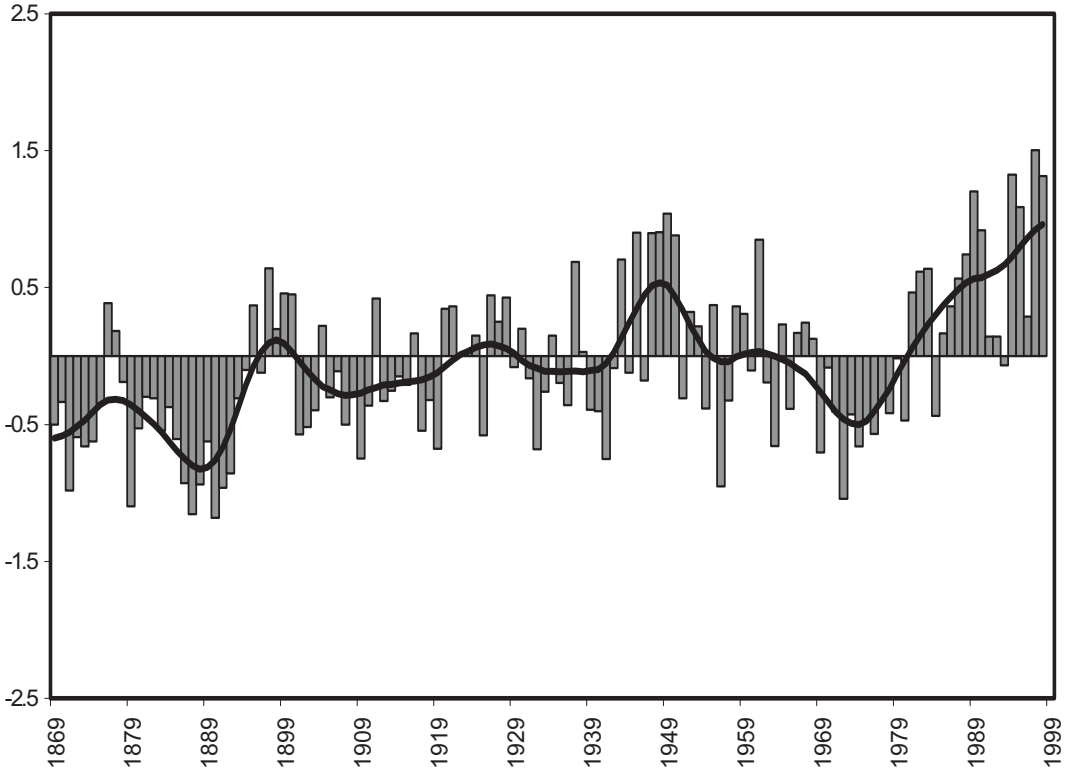


Fig. 1.7. *Anomalías absolutas de la temperatura media anual con respecto a la media del período 1961-1990 en el NE de España (ºC)(1869-1998) –suavizado con un filtro gaussiano de 13 términos- (Modificada a partir de Brunet et al. 2001b).*

En un contexto plurisecular, las series pluviométricas anuales más largas de la Península Ibérica, que comienzan en el siglo XIX (Gibraltar, a finales del XVIII 1791), no muestran tendencias significativas, a excepción de algunas meridionales (Gibraltar, San Fernando) con tendencia estadísticamente significativa a la baja (Wheeler y Martín-Vide 1992, Quereda y Montón 1997). Una investigación sobre las 53 series pluviométricas anuales más largas disponibles hasta 1990, incluidas algunas de Baleares y Canarias, dio como resultado un mapa con un amplio espacio central, de Extremadura a la Comunidad Valenciana y Cataluña, además de Baleares y Canarias, carente de una tendencia definida; el norte y noroeste peninsular, con una cierto apunte al alza; y el sur y el sureste peninsular, con tendencia decreciente (Milián 1996). También en otro análisis sobre 40 observatorios peninsulares y de Baleares, durante el período 1880-1992, se aprecia el comportamiento diferenciado entre la franja norteña ibérica, con tendencia al alza, del interior y la fachada mediterránea, a la baja (Esteban-Parra *et al.* 1998). En otros trabajos con series de longitud algo inferior al siglo (Serrano *et al.* 1999, García *et al.* 2002, Muñoz-Díaz y Rodrigo 2004) o con datos de rejilla del período 1900-1996 (Rocha 1999) no se detectan tendencias anuales claras, aunque sí que parece consistente una reducción pluviométrica primaveral.

Regionalmente, una serie de precipitación anual areal para las cuencas hidrográficas del Sureste y Levante que cubre el período 1864-2000 no presentó tendencia significativa (Chazarra y Almarza 2002). Casi una treintena de series anuales de la cuenca del Ebro, en el período 1920-2000, que han permitido una regionalización según la evolución temporal, no muestran tendencias monótonas en ninguna de las áreas consideradas (Abaurrea *et al.* 2002). Tampoco se detectó en la Meseta meridional a partir de 6 observatorios (Galán *et al.* 1999). En Cataluña, a partir de 121 estaciones, no se apreció tendencia significativa en la precipitación anual del último siglo y medio, aunque sí en la de primavera, con una reducción de más de un 25% (Saladíe 2004). Otros análisis también sobre series de longitud próxima o superior al siglo detectan ciertas anomalías pluviométricas y algunos períodos lluviosos, apareciendo, entre otros hechos generales, el período inicial de las series, hasta finales del siglo XIX o principios del XX, como lluvioso, al igual que los años 60 y 70 de este último siglo, mientras que, en comparación, a finales de los años 70 se inicia un período seco (Rodríguez *et al.* 1999, Rodrigo *et al.* 2000, Ramos 2001, etc.). En el contexto plurisecular del último medio milenio, la cantidad de precipitación, reconstruida a partir de *proxy data*, muestra una reducción en los últimos decenios del siglo XX tanto en el sur peninsular (Rodrigo *et al.* 1999) (Figura 1.8), como en el norte (Saz 2003).

Cuando el análisis refiere al último tercio del siglo XX se aprecia una reducción significativa de la cantidad de precipitación en algunas comarcas y rejillas que cubren la España peninsular y Baleares. Así ocurre en el período 1963-1985 en las partes oriental y pirenaica de la cuenca del Ebro (Abaurrea *et al.* 2002). En algunos estudios tal disminución se debe, especialmente, a la merma de lluvias invernales y -como se ha dicho anteriormente- primaverales, que se ha puesto en relación con el aumento de la presión atmosférica en el Mediterráneo occidental desde los años 70 del siglo XX, producto, por una parte, del reforzamiento del modo positivo de la Oscilación del Mediterráneo (Dünkeloh y Jacobeit 2003) y, por otra, de la ocurrencia de una fase positiva de la NAO (Oscilación del Atlántico Norte). En las regiones españolas con fachada mediterránea, desde Andalucía a Cataluña, incluida Baleares, la reducción pluviométrica en el treintenio 1964-1993, al comparar sus dos subperíodos de 15 años, se ha producido en buena parte de Andalucía y Cataluña, en Menorca y en el noroeste de Mallorca, mientras que la variación es positiva en gran parte de la Comunidad Valenciana y Murcia, según han puesto en evidencia los análisis realizados sobre 410 estaciones meteorológicas (Romero *et al.* 1998, Guijarro 2002). La tendencia a la baja durante el último período internacional (1961-1990) es confirmada para el sur de la España peninsular en otros trabajos (Rodrigo *et al.* 1999). En la Comunidad Valenciana casi un centenar de estaciones pluviométricas avalan la reducción de la precipitación anual y un aumento de la variabilidad interanual durante el último período internacional (1961-1990), aunque con diferencias espaciales muy notables (De Luis *et al.* 2000).

Sobre la variabilidad pluviométrica interanual, que muestra en la España peninsular una notable complejidad (Rodríguez-Puebla *et al.* 1998), la hipótesis de un aumento de la misma no encuentra un aval claro en un contexto plurisecular. Así, las anomalías pluviométricas del siglo XX tienen un comportamiento similar a las de los cuatro siglos anteriores en Andalucía (Rodrigo *et al.* 2000), aunque la segunda mitad del siglo XX destaca por su alta variabilidad (Pita *et al.* 1999). En las últimas décadas la variabilidad interanual también se ha elevado en otras regiones, incluso en la Meseta meridional la tendencia creciente cubriría el siglo XX (Galán *et al.* 1999).

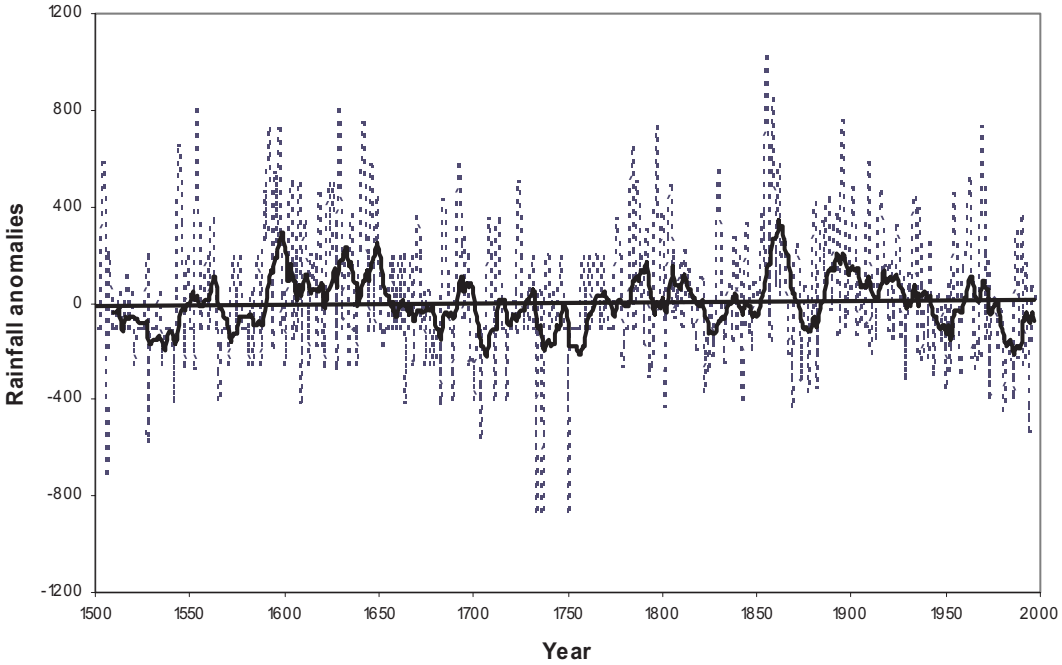


Fig. 1.8. *Anomalías absolutas de la precipitación anual en Andalucía (mm) (1500-2000) –suavizado con medias móviles de 10 años- (Rodrigo et al. 1999, 2000).*

Los posibles cambios en el reparto estacional de la precipitación, con implicaciones ecológicas y socioeconómicas, apuntan a comportamientos heterogéneos en el espacio. Un análisis inédito sobre 55 observatorios ibéricos para el período 1949-2003 ha demostrado una disminución de la precipitación invernal en la cornisa Cantábrica (Bilbao 2,22 mm/año) y de la primaveral en las regiones más meridionales (Sevilla 1,4 mm/año) (Rodríguez-Puebla, com.pers.), no habiendo tendencias en verano y otoño. Un índice de estacionalidad aplicado a más de 400 estaciones pluviométricas del este y sur de España ha mostrado un aumento del mismo a lo largo del período 1964-1993 en Andalucía y el interior de Cataluña, con la coincidencia de un incremento de la pluviometría de octubre (Sumner *et al.* 2001). En la Comunidad Valenciana se ha producido una disminución pluviométrica invernal, e incluso otoñal, acompañada por una mayor variabilidad interanual en el último período internacional (González-Hidalgo *et al.* 2001). Un índice de concentración intranual de la precipitación ha mostrado tendencia creciente en San Fernando y Madrid durante períodos que empiezan a mediados del siglo XIX y acaban a finales del XX (López 1999).

Las pautas temporales de la precipitación a resolución diaria son del máximo interés en el ámbito de los climas españoles, dada la alta concentración temporal de la lluvia, con los consiguientes problemas de drenaje y erosivos. Sin embargo, son muy pocos los estudios al respecto. Los análisis publicados no permiten inferir una elevación de la intensidad diaria de la precipitación, es decir, un mayor peso de los días con cantidades elevadas sobre el total de días de precipitación. Así, para el período 1958-1997, y a partir de 18 observatorios ibéricos, en gran parte del territorio, excepto en el Sureste, se ha producido una tendencia hacia un menor número de días con cantidades de precipitación elevadas (Goodess y Jones 2002). Tampoco en la Comunidad Valenciana son claras las tendencias de los 10 días más lluviosos, ni de su contribución porcentual a los totales anuales, con ligeras tendencias a la baja los primeros y al alza el segundo (González-Hidalgo *et al.* 2003). En todo caso, el análisis cronológico de las series pluviométricas diarias muestra comportamientos bastante diferenciados entre los distintos observatorios (López 2001). En Barcelona un análisis que cubre desde 1917 hasta el final del siglo XX ha detectado un aumento de la cantidad acumulada por los días con registros iguales o superiores al percentil 95% (29.5 mm), en un contexto de disminución de los días

lluviosos (Burgueño *et al.* 2004). En el ámbito del archipiélago canario se ha detectado una marcada disminución pluviométrica durante la segunda mitad del siglo XX debida fundamentalmente a la reducción de las cantidades diarias más cuantiosas (García-Herrera *et al.* 2003).

1.2.6. Los patrones de variabilidad de baja frecuencia

El dipolo constituido por el anticiclón de las Azores y la depresión de Islandia, que compone la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, *North Atlantic Oscillation*), tiene una notable incidencia en la pluviometría invernal del centro y suroeste de la España peninsular. La correlación entre el índice NAO y la precipitación mensual en los meses fríos es significativa y negativa en el área citada, siendo abundantes las lluvias, a menudo asociadas a borrascas próximas al golfo de Cádiz. En su fase positiva recibe, por el contrario, cantidades de precipitación claramente inferiores a las normales, dada la proximidad del alta de Azores.

Del creciente número de estudios que relacionan los patrones de variabilidad de baja frecuencia con el comportamiento de las variable climáticas en España pueden inferirse algunas pautas de cambio en ellas. Así, la clara tendencia positiva del índice NAO desde mediados de los años 60 (Gámiz-Fortis *et al.* 2002), que se ha puesto en relación con la disminución pluviométrica antes reseñada, habría implicado también una tendencia creciente de la presión atmosférica. Un análisis de la evolución de la circulación sinóptica sobre la Península Ibérica en el siglo XX ha empezado a mostrar que el patrón subtropical se ha ido haciendo más frecuente, en detrimento de la circulación del oeste (Fernández y Rasilla 2001). El patrón noratlántico está, en todo caso, modulado por otros, como el EU-2 para las sequías ibéricas (Vázquez López 1999). La influencia de la NAO, y de otras teleconexiones, tales como SCAN ó EA, que muestra cambios de fase en 1976, influye en la variabilidad pluviométrica en Galicia (Taboada *et al.* 2002). Sin embargo, las oscilaciones decadales de la NAO y sus tendencias no se manifiestan claramente en los registros de temperaturas ibéricos, mucho más sensibles a la localización del centro meridional del dipolo que al gradiente bárico en el Atlántico norte (Castro-Díez *et al.* 2002). Precisamente la posición de la Península Ibérica hace que en ella no se manifiesten con claridad ciertos patrones de variabilidad de baja frecuencia, siendo así que durante el invierno sus temperaturas en períodos superiores a 15 años muestran sólo la variabilidad hemisférica, fundamentalmente radiativa (Pozo-Vázquez 2000).

La duración de la insolación se correlaciona positivamente con el índice NAO en el sur de Europa, por lo que una fase positiva del citado patrón implica anomalías del mismo signo (Pozo-Vázquez *et al*. 2004). La variabilidad de la precipitación del trimestre primaveral en el Mediterráneo occidental es explicada en un 50% por los patrones NAO y EA (Martín *et al.* 2004), lo que puede avalar su tendencia a la baja en algunas regiones españolas. Los períodos secos y lluviosos en la misma estación están influidos por la AO, la EA/WR y el índice de la Oscilación del Sur, pudiendo estimarse la reducción en primavera en un 10% durante un episodio El Niño (Rodó *et al.* 1997, Rodríguez-Puebla *et al.* 2001, Mariotti *et al.* 2002). La disminución del número de días ciclónicos y del número de días con anomalía de presión negativa en el bimestre marzo-abril en la cuenca del Mediterráneo occidental tras episodios ENSO (Laita y Grimalt 1997), así como la variabilidad observada en la temperatura (Pozo-Vázquez *et al.* 2001), podría estar relacionada con la mayor frecuencia, intensidad y persistencia de El Niño desde hace poco más de 20 años. En cambio, no existe relación entre El Niño y los temporales de mar en la costa catalana (Camuffo *et al.* 2000). El nítido aumento del número de días de lluvia de barro en Elche, en los últimos años del período 1949-1994, pudiera reflejar un aumento de la circulación meridiana (Quereda *et al.* 1996). La actividad baroclínica y la precipitación invernal están bien relacionadas en el Cantábrico oriental (Sáenz *et al.* 2001).

Los datos diarios de diferentes variables del observatorio de Roquetes-Tortosa del período 1910-1994 permiten concluir que su clima ha tendido a ser más cálido y seco (Piñol *et al.* 1998). Así, el aumento de la temperatura media anual de 0.10ºC/década ha conllevado un incremento de la evapotranspiración potencial anual estimada de 13 mm/década. Al no haberse producido cambio pluviométrico significativo, ha habido una tendencia creciente del déficit de agua. Además, en el cuatrimestre junio-septiembre del período 1941-1994 la humedad relativa diaria mínima se ha reducido en 0.8%/década. Todo ello ha conllevado una elevación de los índices de riesgo de incendio forestal.

1.3. CLIMA FUTURO

1.3.1. Modelos globales del clima

Para realizar proyecciones del cambio climático relacionado con la creciente acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero (en adelante GEIs) y de aerosoles emitidos por actividades humanas, se utilizan actualmente modelos climáticos globales. Un modelo climático consiste en una representación matemática de los procesos que tienen lugar en el "sistema climático", cuyo estado define el clima. El sistema climático se considera compuesto por cinco componentes: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera (Peixoto y Oort 1992). Entre ellos se producen enormes intercambios de materia, calor y momento e incesantes interacciones mediante multitud de procesos físicos, químicos y biológicos, lo que hace que el sistema climático terrestre sea extremadamente complejo. Los modelos globales de clima constituyen actualmente la mejor herramienta de que se dispone para estudiar los procesos que conforman el estado del clima. Por esta razón resultan imprescindibles para derivar la respuesta del clima a las perturbaciones inducidas por actividades humanas. En consecuencia, la capacidad de los modelos para proyectar la evolución futura del clima depende básicamente del conocimiento de los procesos que gobiernan el sistema climático.

Actualmente la mayor parte de los modelos climáticos globales incluyen alguna representación de los cinco componentes del sistema climático, de los procesos que se producen en cada uno de ellos y de los que determinan los intercambios mutuos. En los modelos de clima actuales se consideran de forma explícita los procesos atmosféricos y oceánicos, así como sus principales interacciones. Esto se debe a que el océano desempeña un papel crucial en el clima de la Tierra y su variabilidad. Aunque hasta hace menos de una década su función se subestimaba, ahora se reconoce que su importancia es del mismo orden de magnitud que la de la atmósfera. Así, para entender el clima global y prever su evolución es imprescindible considerar también el océano. A los modelos en que la atmósfera y el océano interactúan de forma acoplada se les conoce generalmente por las siglas AOGCM (del inglés Atmosphere-Ocean General Circulation Model), que se utilizarán de aquí en adelante para referirse a ellos.

Los AOGCM se basan en la resolución del conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan las leyes de la Física que gobiernan la dinámica de la atmósfera y el océano. Es un complejo sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales que no tiene solución analítica. Por ello, han de resolverse de forma aproximada aplicando técnicas numéricas, que requieren dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdillas tridimensionales. En cada una de ellas se asignan valores de las variables que caracterizan el estado de la atmósfera y el océano, como temperatura, movimiento, densidad etc. Dicha asignación se realiza a partir de observaciones directas o indirectas de tales variables a escala global en un determinado instante inicial. Para derivar las evoluciones temporales de las variables en cada celdilla de la malla del modelo se resuelven las ecuaciones a partir de los valores iniciales. Estas evoluciones se obtienen en intervalos temporales discretos (paso temporal), cuya duración debe estar en concordancia con el tamaño de las celdillas. Cuanto menor sea dicho tamaño, también ha de serlo el paso temporal. La resolución espacial de la parte atmosférica de los AOGCM actuales varía entre 2º y 10º de latitud y longitud en la horizontal y en la vertical se consideran de 10 a 30 capas entre

la superficie y el tope superior de la atmósfera, cada una con espesores variables, mientras que las resoluciones horizontales y verticales de la parte oceánica suelen ser similares o algo superiores a las atmosféricas.

Además, la discretización que precisan las técnicas numéricas para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales implica que con ellas no pueden resolverse aquellos procesos atmosféricos u oceánicos con escalas espaciales o temporales menores que la resolución del modelo, por ejemplo nubes individuales en los modelos atmosféricos o remolinos de escala intermedia en los modelos oceánicos. Por eso, su efecto debe calcularse mediante una representación paramétrica en función de valores de las variables básicas resueltas por el modelo. Este procedimiento se llama parametrización.

Los modelos AOGCM se combinan con representaciones matemáticas empíricas o semiempíricas de otros componentes del sistema climático, como la criosfera, la superficie del suelo o la cubierta vegetal. Los actuales modelos más completos incluyen también representaciones del ciclo del carbono, como intercambios entre la atmósfera, la biosfera y los océanos, y de procesos que afectan a los aerosoles en la atmósfera, como reacciones químicas, agregación, deposición y efectos en la formación de nubes (ver capítulos 3 a 6 del informe IPCC 2001).

Antes se ha señalado que el sistema de ecuaciones diferenciales de un AOGCM se resuelve en intervalos o “pasos” temporales discretos. Esto significa que, en cada uno de ellos, el modelo debe resolver todas las ecuaciones para calcular los valores actualizados de las variables en todas las celdillas de la malla tridimensional que abarca el globo terrestre. Esto implica tener que realizar millones de operaciones matemáticas simples en cada intervalo temporal (de 30 a 60 minutos según los modelos), hasta completar todo el periodo de integración, que normalmente se extiende a varios centenares de años. Obviamente, esto requiere el uso de los computadores más potentes disponibles.

En la actualidad existen unas pocas decenas de modelos AOGCM, desarrollados en centros climáticos y universidades merced a un extraordinario esfuerzo de investigación científica. Un ejemplo claro de ello es que en el primer informe del Grupo Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático (conocido por las siglas en inglés IPCC), que se editó en el año 1990, se presentaron resultados de solo dos AOGCM, mientras que en el último emitido (IPCC 2001) se mencionan casi una veintena de estos modelos más perfeccionados.

Los modelos AOGCM que se utilizan para cuantificar la respuesta futura del clima a perturbaciones inducidas por actividades humanas han de ser previamente evaluados. El examen de la fiabilidad que presenta un AOGCM para reproducir los principales procesos en el sistema climático, se realiza mediante una comparación sistemática entre resultados de simulaciones con condiciones de clima actual y datos climatológicos observados. Las simulaciones de clima actual con AOGCMs se llevan a cabo considerando la evolución de valores observados de concentraciones atmosféricas de GEIs. Los modelos también pueden evaluarse considerando condiciones paleoclimáticas, por ejemplo la pasada era glacial. Una vez que se ha evaluado satisfactoriamente su calidad, el modelo se utiliza para realizar simulaciones de la evolución temporal del futuro cambio climático.

En este tipo de evaluaciones se ha comprobado que la mayor parte de los actuales AOGCM han experimentado una notable mejora en los últimos diez años. Esto se atribuye a varias causas, entre las que destacan un mejor conocimiento de las características de los océanos y de los procesos de intercambio con la atmósfera, la consideración de procesos que afectan a los aerosoles azufrados en la atmósfera, y del aumento en la resolución espacial de los modelos (menor tamaño de celdillas) permitida por el impresionante incremento en la potencia de computación. De hecho, por lo general las simulaciones que reproducen de manera muy aceptable la evolución experimentada por la temperatura global a lo largo de los últimos

150 años. Tanto es así, que los ensayos realizados con diferentes evoluciones de GEIs han permitido discriminar la contribución de las actividades humanas en el cambio experimentado por el clima, con un grado de confianza aceptable (Stott *et al.* 2001).

No obstante, aún existen incertidumbres en algunos resultados de los modelos AOGCM, en gran parte asociadas a deficiencias en las parametrizaciones de algunos procesos físicos determinantes para el clima, como son las relacionadas con la formación de nubes y precipitación, la circulación termohalina en los océanos, la dinámica de los hielos marinos o los intercambios biogeoquímicos en el sistema climático, entre otros (para más detalles ver capítulo 14 del informe IPCC 2001). Además de estas deficiencias, permanece el problema de que la resolución espacial de los AOGCM es aún demasiado baja para poder reproducir detalles orográficos y costeros, que en muchas zonas del planeta determinan decisivamente el clima a escala regional. Un ejemplo ilustrativo de esto es el caso de la Península Ibérica, como se comenta más adelante.

1.3.2. Simulaciones del clima con modelos globales

Para simular la evolución futura del clima terrestre, los modelos AOGCM deben ser forzados transitoriamente con evoluciones de los niveles de GEIs y aerosoles acumulados en la atmósfera según se espera vayan cambiando las emisiones producidas por actividades humanas. Para eso es preciso realizar un ejercicio de prospectiva sobre las evoluciones futuras de emisiones antropogénicas de GEIs y aerosoles. Es decir, elaborar lo que se llaman "escenarios de emisiones". Esto se realiza considerando diversos supuestos acerca del futuro desarrollo demográfico y socio-económico en el mundo. Los escenarios de emisiones actualmente utilizados para realizar proyecciones con modelos de clima a lo largo del siglo XXI, se conocen por las siglas SRES (del inglés Special Report on Emission Scenarios). Constituyen un conjunto de escenarios de emisión elaborados por un grupo de expertos mundiales dentro del IPCC (Nakicenovic *et al.* 2000), teniendo en cuenta hipótesis coherentes sobre evoluciones futuras de crecimiento de la población mundial, la demanda de energía, la eficiencia de su consumo o el crecimiento económico global, entre otras consideraciones.

Para cada uno de estos escenarios se ha realizado una cuantificación de las emisiones antropogénicas futuras de GEIs y compuestos de azufre (IPCC 2001). A modo de ilustración, en la figura 1.9 se muestran las evoluciones de emisiones de CO_2 y SO_2 correspondientes a los seis escenarios que por ahora se han utilizado para realizar proyecciones de clima con alguno de los modelos AOGCM. En la misma figura se incluyen las evoluciones de la concentración global de CO_2 para cada uno de los escenarios de emisiones considerados, según resulta de la aplicación de modelos de balance del carbono (por ejemplo Cramer y Field 1999). De estos seis escenarios, los llamados A2 y B2 son los dos más utilizados por los modelos AOGCM. No obstante, desde un punto de vista puramente técnico, todos deben considerarse como igualmente probables. A este respecto, conviene señalar que ninguno de ellos se corresponde exactamente con los objetivos de emisión marcados en el Protocolo de Kioto.

De los AOGCM mencionados en el tercer informe del IPCC (2001), con seis de ellos se han realizado simulaciones detalladas considerando diversas evoluciones de niveles de GEIs y aerosoles azufrados a lo largo de los siglos XX y XXI (tabla 1.3). En el Centro de Distribución de Datos (DDC) del IPCC se dispone de un conjunto de resultados derivados de diversas simulaciones realizadas con estos seis AOGCM. Por lo general, estas simulaciones abarcan un periodo de 240 años, de 1860 a 2100. En los primeros 130 años (1860-2000) se consideran las concentraciones observadas en la atmósfera de GEIs, junto con estimaciones de aerosoles azufrados, y a partir de ese año tienen en cuenta diferentes escenarios de emisiones. En la tabla 1.3 se detallan los escenarios de emisiones SRES considerados en las simulaciones realizadas por cada AOGCM, cuyos resultados se pueden obtener del DDC-IPCC. La mayor parte de estos datos corresponden a valores mensuales de las variables más utilizadas en

estudios de impacto del cambio climático en superficie (temperatura, precipitación, presión, etc.), correspondientes a cada una de las celdillas de la malla del modelo que cubre toda la atmósfera terrestre.

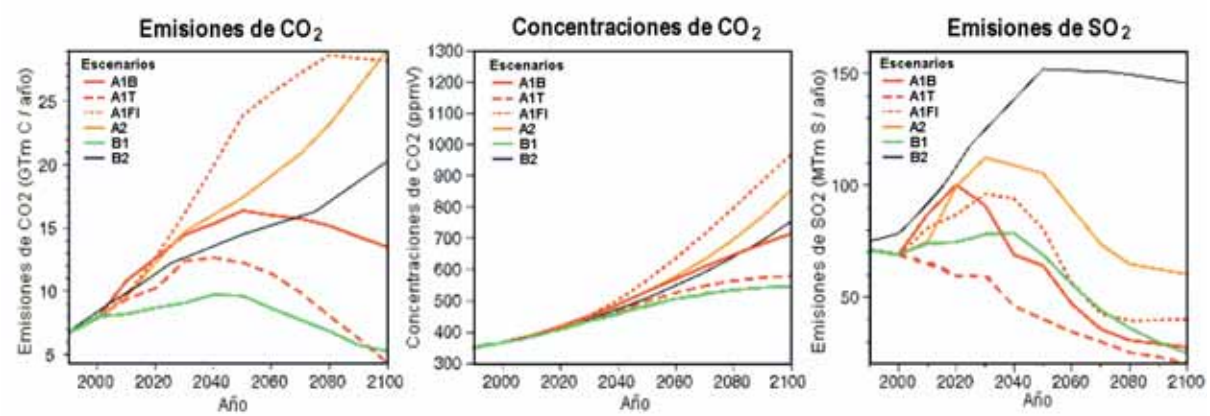


Fig. 1.9. *Evoluciones de emisiones globales de CO_2 y SO_2 a la atmósfera debidas a actividades humanas y de las concentraciones globales de CO_2 que resultarían de tales emisiones, según los diversos escenarios SRES. Tomada de IPCC (2001).*

De la evaluación de los resultados obtenidos a escala global en el conjunto de simulaciones correspondientes al siglo XX (IPCC 2001), se evidencia que la calidad de ninguno de los AOGCM destaca claramente por encima de la de los demás. De hecho, Lambert y Boer (2001) comprobaron, por ejemplo, que las distribuciones de la temperatura, presión y precipitación que resultan de realizar un promedio de conjunto con resultados de varios AOGCM, se asemejan generalmente más a las observadas que las obtenidas por cualquiera de ellos individualmente. A pesar de las diferencias entre los resultados obtenidos por cada uno de los modelos, la comparación con las observaciones permite tener una confianza razonable en que los actuales AOGCM son adecuados para simular cambios climáticos futuros, reduciendo notablemente la incertidumbre involucrada en las proyecciones climáticas (IPCC 2001).

Tabla 1.3. *Características de los AOGCM, y escenarios de emisiones SRES simulados por éstos, cuyos resultados se pueden obtener del DDC-IPCC: http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html. El tamaño horizontal de las celdillas atmosféricas y oceánicas se expresa en grados de latitud-longitud, y entre paréntesis se indica el número de niveles en la vertical.*

NOMBRE DEL MODELO	CENTRO (PAÍS)	RESOLUCIÓN ATMOSFÉRICA	RESOLUCIÓN OCEÁNICA	ESCENARIOS SRES SIMULADOS
CCSR/NIES 2	CCSR/NIES (Japón)	5.6 × 5.6 (20)	2.8 × 2.8 (17)	A1,A1FI,A1T,A2,B1,B2
CGCM 1,2	CCC (Canadá)	3.7 × 3.7 (10)	1.8 × 1.8 (29)	A2,B2
CSIRO-Mk2	CSIRO (Australia)	5.6 × 3.2 (9)	5.6 × 3.2 (21)	A1,A2,B1,B2
ECHAM4/OPYC3	MPIM (Alemania)	2.8 × 2.8 (18)	2.8 × 2.8 (11)	A2,B2
GFDL R30 c	GFDL (EEUU)	2.25 × 3.75 (14)	1.875 × 2.25 (18)	A2,B2
HadCM3	UKMO (Reino Unido)	2.5 × 3.75 (19)	1.25 × 1.25 (20)	A1,A1FI,A2,B1,B2

Aunque se ha señalado antes que ninguno de los escenarios SRES se puede suponer más probable que los demás, las proyecciones de clima que a continuación se presentan corresponden a los grupos A2 y B2, pues son los dos considerados por un mayor número de AOGCM. Esto permite percibir la diferente respuesta del clima futuro según sean las evoluciones de las emisiones antropogénicas. Por otra parte, solo se presentan resultados de los modelos que

están incluidos en el DDC-IPCC. A pesar de que estos AOGCM han sido evaluados con datos de clima actual, comprobándose que todos reproducen razonablemente bien los principales rasgos del clima en el planeta, cada simulación presenta diferencias con respecto a las otras. Así, por ejemplo, en la figura 1.10 se muestran proyecciones del cambio medio anual de la temperatura global del aire cerca de la superficie obtenidas con diversos AOGCM, para los dos escenarios de emisiones considerados. En ella se aprecia que las diferencias entre modelos sobrepasan en algunos casos el intervalo individual de los cambios climáticos proyectados. Pero, ha de advertirse que, como señala el IPCC (2001), tales diferencias no invalidan los resultados, sino que proporcionan una valiosa información pues facilitan una evaluación objetiva de la fiabilidad involucrada en cada proyección individual. De hecho, el análisis del conjunto de resultados obtenidos con diversos modelos permite señalar los rasgos del cambio climático global proyectado que resultan comunes en todas las simulaciones, que por tanto pueden considerarse más fiables. Así por ejemplo, como todos los modelos coinciden en que el incremento de temperatura es mayor en el escenario A2 que en el B2, se puede tener un elevado grado de confianza en que el futuro calentamiento global estará determinado en gran parte por el ritmo de incremento de las emisiones antropogénicas de GEIs y aerosoles.

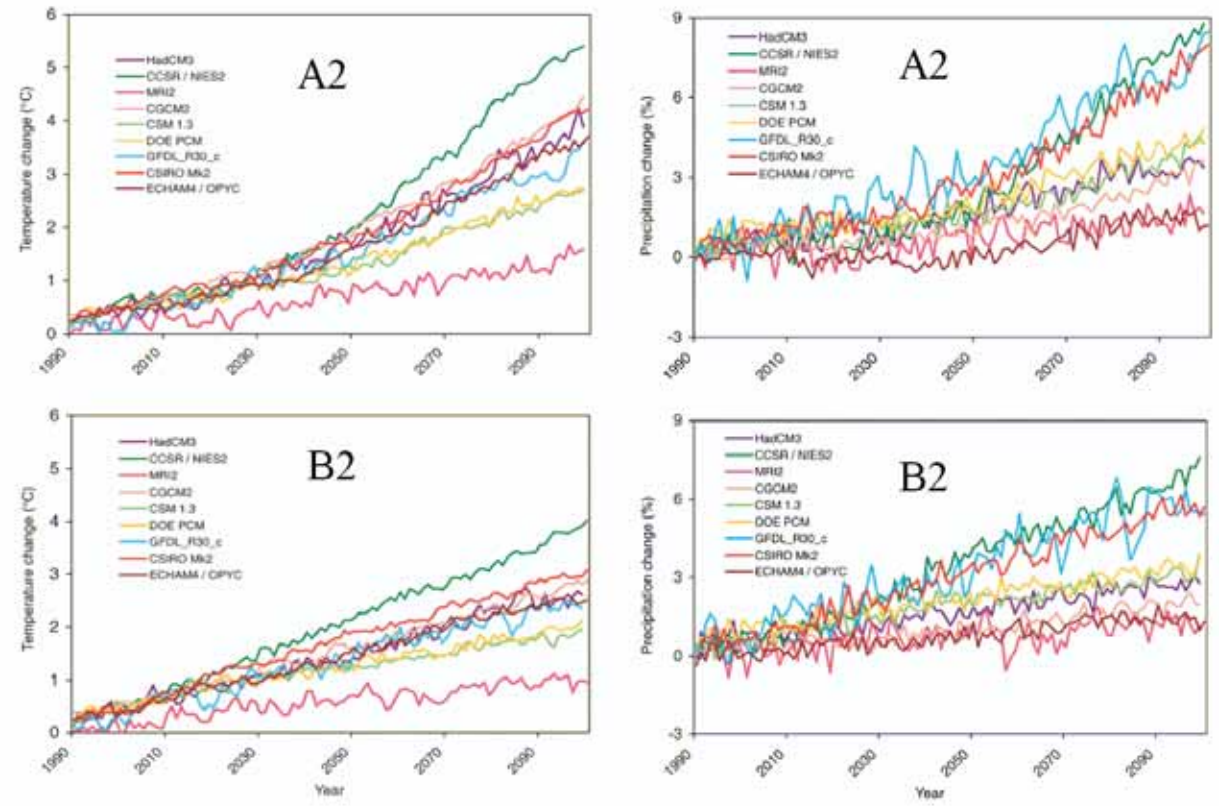


Fig. 1.10. *Evoluciones de cambios medios globales de temperatura (izquierda) y de precipitación (derecha) con respecto a los valores de 1990, simulados por diversos AOGCM considerando los escenarios de emisiones SRES-A2 (arriba) y SRES-B2 (abajo) Figura tomada del IPCC (2001).*

1.3.3. Proyecciones de clima futuro en España realizadas con modelos globales

A causa de las diferencias entre los modelos, se ha considerado conveniente mostrar primero los resultados de la distribución espacial en la Península Ibérica de proyecciones de cambio en la temperatura superficial y la precipitación a lo largo del presente siglo obtenidas con un determinado AOGCM. A continuación se presentan resultados derivados de simulaciones con varios AOGCM en una zona del interior de la Península, a fin de poder realizar una simple comparación y componer resultados de conjunto.

El AOGCM elegido para el primer análisis es el HadCM3 desarrollado en el Hadley Centre for Climate Prediction and Research (Reino Unido). Como antes se ha señalado, esta elección no debe tomarse como indicativo alguno de superioridad de dicho AOGCM frente a los otros, aunque ciertamente los resultados de las simulaciones del modelo HadCM3 relativas a clima actual (1960-90) en la Península Ibérica presentan, por lo general, un aceptable ajuste con las observaciones. Pero, el principal criterio para esta elección atendió a que se ha aplicado un método de regionalización para obtener mayor detalle de los cambios proyectados para el último tercio del siglo en la Península Ibérica, tomando como base los resultados de este AOGCM, como se presenta en el siguiente apartado.

El modelo HadCM3 es una versión mejorada del anterior HadCM2, en el que, además de aumentar la resolución, no es necesario introducir un ajuste artificial en los flujos de calor y de agua dulce para que haya correspondencia con el comportamiento observado. En Gordon *et al.* (2000) se puede encontrar una descripción completa del modelo. No obstante se incluye una breve explicación de las principales características de este AOGCM.

El submodelo atmosférico tiene una resolución horizontal de 2.5º en latitud y 3.75º en longitud cubriendo todo el globo. Esto supone que las celdillas tienen unas dimensiones horizontales de aproximadamente 300 x 300 km en latitudes medias. En la vertical se divide la atmósfera en 19 niveles con un espaciado variable entre ellos. El modelo incluye sofisticadas parametrizaciones de los intercambios de radiación solar y terrestre, incluyendo explícitamente los efectos de los GEIs y aerosoles, de los intercambios atmósfera-superficie-vegetación y de la formación de nubes y precipitación. En este submodelo también se simulan interactivamente la emisión, el transporte y deposición de compuestos de azufre.

El submodelo oceánico tiene una resolución horizontal de 1.25º en latitud y longitud y considera 20 niveles en la vertical. En este submodelo se han incluido una serie de mejoras, entre las que cabe destacar la que permite la mezcla de agua del Mediterráneo con el Atlántico a través del Estrecho de Gibraltar, a pesar de que el gran tamaño de las celdillas impide que esté explícitamente resuelta por el modelo, así como la utilización de un mejor esquema para parametrizar los procesos del hielo marino y la acumulación de nieve.

En los experimentos con el modelo HadCM3 la atmósfera y la cubierta de hielos se inician con valores disponibles y el océano se considera en estado de reposo. Con estos valores de partida, se ejecuta el modelo a lo largo de un periodo de 1000 años, con unos niveles de GEIs y aerosoles correspondientes a la era preindustrial. Este periodo tan largo es necesario para que en el modelo se alcance un acoplamiento adecuado entre la atmósfera y los océanos. Al final de este periodo el estado del clima simulado representa a las condiciones previas al año 1860. Desde ese año hasta el presente, el modelo es forzado con niveles atmosféricos crecientes de GEIs y aerosoles, deducidos de las observaciones disponibles. En los años futuros las evoluciones de GEIs y aerosoles se corresponden con los diversos escenarios de emisiones SRES. Los resultados obtenidos con el modelo en el periodo 1960-1990 se utilizan para valorar su grado de correspondencia con la climatología actual. Por ultimo, las proyecciones de cambio climático con el modelo se obtienen a partir de las diferencias entre el clima simulado para el intervalo 1960-1990 y el que resulte para cualquier periodo de 30 años a lo largo del presente siglo. En los experimentos con los demás AOGCM se sigue una secuencia similar. A continuación se presentan escenarios de cambio climático proyectados para tres periodos: 2010-2040 2040-2070 y 2070-2100.

En la figura 1.11 se muestran los resultados de las distribuciones espaciales en la Península Ibérica del cambio en la temperatura media estacional del aire en superficie (a 2 metros de altura) respecto a los valores medios simulados para el periodo 1960-1990, considerando los tres tercios del siglo 21 mencionados. La distribución espacial de los cambios se presentan de forma discretizada de acuerdo al tamaño de las celdillas del modelo HadCM3. Las proyecciones que se presentan corresponden a dos escenarios de emisiones SRES: A2 y B2.

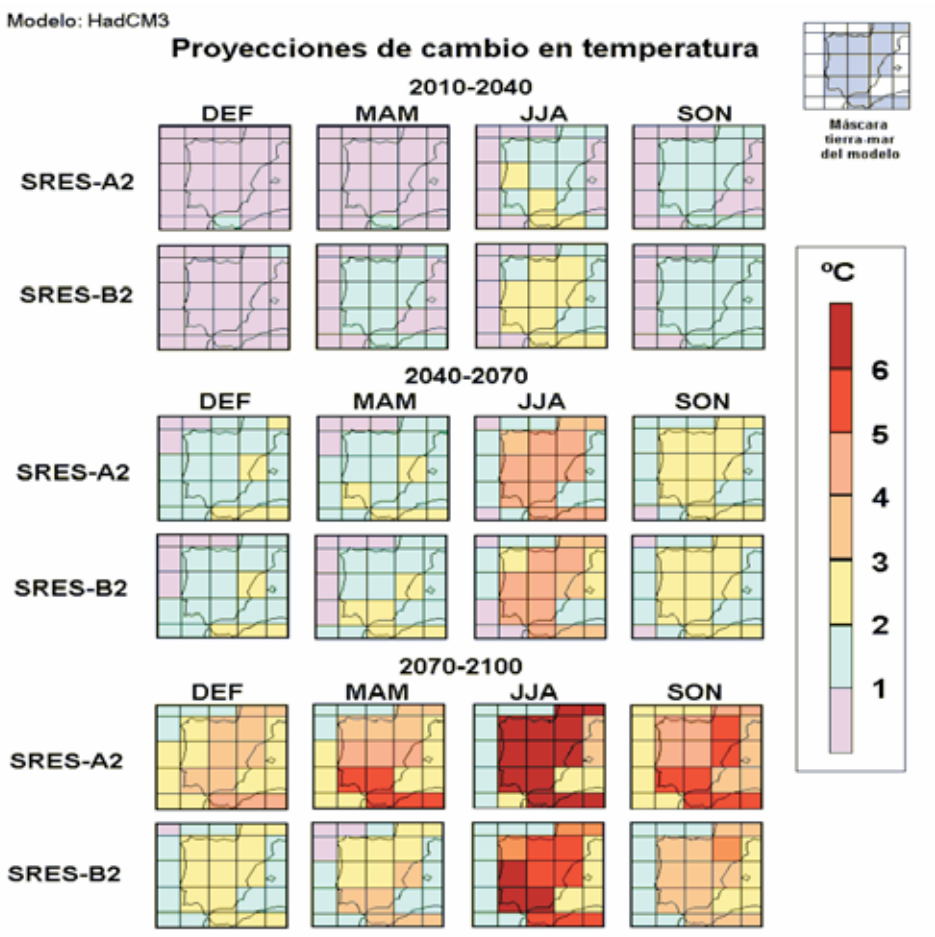


Fig. 1.11. *Proyecciones de cambio de temperatura del aire junto al suelo (a 2 m), promediadas para cada estación del año (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño), correspondientes a tres periodos del siglo 21: 2010-2040 2040-2070 y 2070-2100, y a dos escenarios SRES de emisiones (A2 y B2). Las simulaciones se realizaron con el modelo HadCM3 y los resultados se tomaron del IPCC-DDC. En la esquina superior derecha se muestra la malla del modelo sobre la Península Ibérica, donde las cuadrículas sombreadas corresponden en el modelo a superficie continental y las blancas a océano.*

Lo que se percibe de forma más clara en la figura es un progresivo calentamiento a lo largo del siglo en toda la región, aunque su intensidad y cadencia son diferentes según las zonas y los escenarios SRES. Por lo general, el calentamiento es más intenso y rápido en los meses de verano (JJA) que en los de invierno (DEF), en el escenario A2 que en el B2 y en las zonas continentales que en las oceánicas. La progresividad del calentamiento es casi lineal en todas las zonas, aunque resulta un poco más acelerado al final del siglo 21 que al principio. En la mayor parte de la Península el ritmo de aumento de las temperaturas medias es de entre 2 y 3ºC cada 30 años en los meses de verano y de entre 1 y 2ºC en los de invierno, correspondiendo los mayores valores al escenario SRES-A2. Los máximos incrementos de temperatura media estacional en el último tercio del siglo llegan a superar 6ºC en verano en toda la Península en el escenario A2, y en la parte suroccidental en el escenario B2. Sin embargo, el calentamiento medio de los meses de invierno para ese periodo se mantiene por debajo de 4ºC en el SRES-A2 y por debajo de 3ºC en el SRES-B2. Finalmente, se aprecia claramente que las diferencias en el calentamiento entre los dos escenarios de emisiones se van incrementando a lo largo del siglo.

Los cambios en la precipitación presentan en general una mayor variabilidad espacial cuando se expresan en forma de porcentaje. Esto se debe en gran parte a que en algunas zonas las precipitaciones climatológicas son tan escasas, que un pequeño cambio futuro se traduce en

un porcentaje artificiosamente elevado. Por esta razón es preferible analizar los cambios en la precipitación en función de diferencias entre valores de clima futuro y clima actual. Obviamente este tipo de análisis tiene el inconveniente de que un mismo cambio en valores absolutos tendría una mayor importancia relativa en una zona poco lluviosa que en una húmeda. Pero, por otra parte, los valores de cambio absoluto facilitan una cuantificación más directa de las alteraciones en la disponibilidad de agua en cualquiera de las zonas. Por tanto, en la figura 1.12 se presentan los cambios absolutos proyectados en las precipitaciones estacionales a lo largo del siglo con respecto al periodo climatológico 1960-1990, expresados en mm/día. Para deducir los cambios en la precipitación acumulada en cada estación habría que multiplicar los valores en mm/día por el número de días de dicho periodo, es decir 90, pues en las simulaciones con modelos climáticos los años se consideran con una duración uniforme de 360 días.

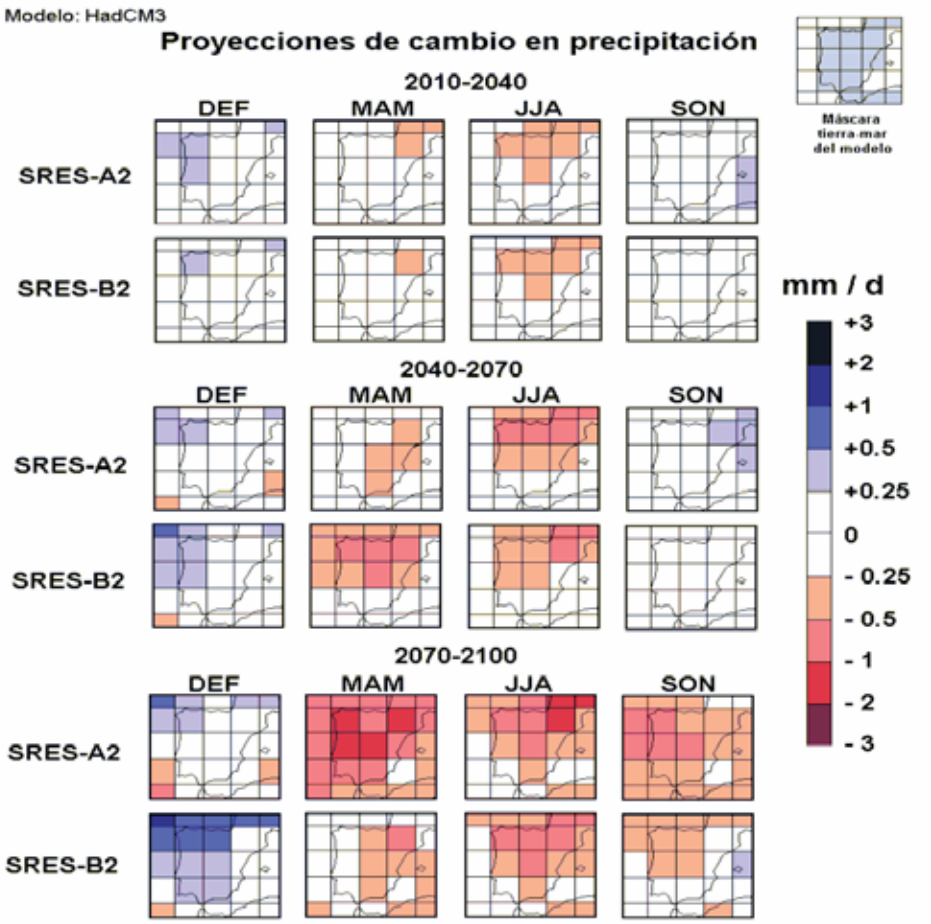


Fig. 1.12. *Proyecciones de cambio de precipitación media (en mm / día), promediadas para cada estación del año (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño), correspondientes a tres periodos del siglo 21: 2010-2040 2040-2070 y 2070-2100, y a dos escenarios SRES de emisiones (A2 y B2). Las simulaciones se realizaron con el modelo HadCM3 y los resultados se tomaron del IPCC-DDC. En la esquina superior derecha se muestra la malla del modelo sobre la Península Ibérica, donde las cuadrículas sombreadas corresponden en el modelo a superficie continental y las blancas a océano.*

En contraste con los cambios simulados para la temperatura, que siempre tienen signo positivo (calentamiento), los de precipitación no resultan del mismo signo en las diversas zonas y épocas del año. Así, los cambios de la cantidad de precipitación en los meses de invierno (DEF) tienen generalmente signo positivo en casi todas las zonas de la Península Ibérica, y esto ocurre para los dos escenarios de emisiones considerados. Sin embargo, en las demás estaciones, sobre todo en primavera y verano, predominan los cambios de signo negativo, es decir una disminución en la cantidad de precipitación en el clima proyectado con respecto al

presente. Otra característica de las evoluciones de los cambios de precipitaciones estacionales a lo largo del siglo es que no presentan generalmente tanta linealidad en la tendencia como en el caso de las temperaturas. Así, por ejemplo, en el escenario B2 la disminución en las precipitaciones de primavera es algo mayor en el tercio central del siglo que en el último tercio. Otros comportamientos no lineales en la evolución temporal del cambio de precipitaciones estacionales pueden observarse en determinadas celdillas del AOGCM situadas sobre la Península. Entre ellos destaca el caso del este y noreste peninsular en el escenario A2, donde el modelo proyecta incrementos de precipitaciones en otoño en los dos primeros tercios del siglo y disminuciones en el último tercio.

Comparando los cambios de las precipitaciones estacionales proyectados para los dos escenarios de emisiones, se comprueba que los incrementos invernales son por lo general menores y las disminuciones en primavera y verano mayores en el A2 que en el B2. No obstante, una excepción a este comportamiento general se observa muy claramente en los cambios proyectados para el tercio central del siglo durante la primavera, en que ocurre lo contrario.

Precisamente las irregularidades espaciales y temporales que se aprecian en los cambios proyectados en las precipitaciones indican la mayor incertidumbre que presentan, si se comparan con los obtenidos para el caso de las temperaturas. Esto se debe esencialmente a que la ocurrencia de precipitación en cualquier lugar y momento está ligada a procesos físicos que resultan más difíciles de simular correctamente por los modelos. Mientras que los procesos que determinan la temperatura del aire junto al suelo están más condicionados por la estacionalidad de la radiación solar que llega al planeta a lo largo del año, cuyo cálculo se realiza con mucha certidumbre. El procedimiento más razonable para reducir la incertidumbre de las proyecciones de cambios en las precipitaciones es considerar los resultados proporcionados por un conjunto de AOGCMs.

Para realizar el análisis de conjunto, se han considerado los resultados de seis AOGCM incluidos en la base de datos del DDC-IPCC (http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html). Concretamente se trata de los modelos llamados CCGM, CSIRO, HadCM3, NIES2, ECHAM4 y GFDL, cuyas características se mostraron en la Tabla 1.3. Para realizar este análisis de una manera más simple, se han considerado solamente los resultados de los cambios en la temperatura y precipitación estacionales obtenidos en la celdilla de la malla de cada modelo que incluya el centro de la Península. Hay que tener en cuenta que las mallas de los seis modelos considerados tienen resoluciones horizontales diferentes (ver Tabla 1.3). En la figura 1.13 se ilustra el tamaño comparativo y la localización de la celdilla considerada para cada AOGCM.

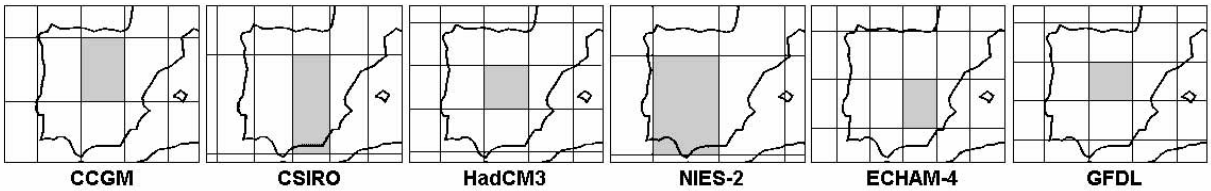


Fig. 1.13. *Ilustración de las mallas de los seis AOGCM considerados. Para realizar la comparación se han tomado los resultados simulados por cada modelo en las celdillas que incluyen el centro de la Península (sombreadas).*

Los cambios de las temperaturas medias estacionales proyectados para la parte central de la Península Ibérica en cada tercio del siglo 21, modelo y escenario de emisiones considerados se muestran en la figura 1.14. Comparando los resultados de los seis modelos se evidencian diferencias en los cambios simulados por cada uno, pero también semejanzas. Las diferencias se encuentran en los valores concretos de cambio de temperatura para cada periodo, estación

y escenario de emisión. El modelo NIES2 es el que generalmente simula calentamientos más importantes, mientras que las diferencias entre los otros son algo menores. No obstante, hay que tener en cuenta que esta falta de coincidencia en los valores de cambio de temperatura en parte podría relacionarse con la diferente resolución espacial sobre la Península Ibérica de los diversos AOGCM. En lo que coinciden todos los modelos es en el calentamiento progresivo a lo largo del siglo en relación con el periodo 1960-1990. Asimismo, en todos ellos el calentamiento máximo se proyecta para los meses de verano y el mínimo para el invierno, e igualmente se evidencia que en el escenario de emisiones A2 los incrementos de temperatura son mayores que en el B2. La coincidencia cualitativa en este conjunto de resultados es un indicativo de su elevado grado de certidumbre.

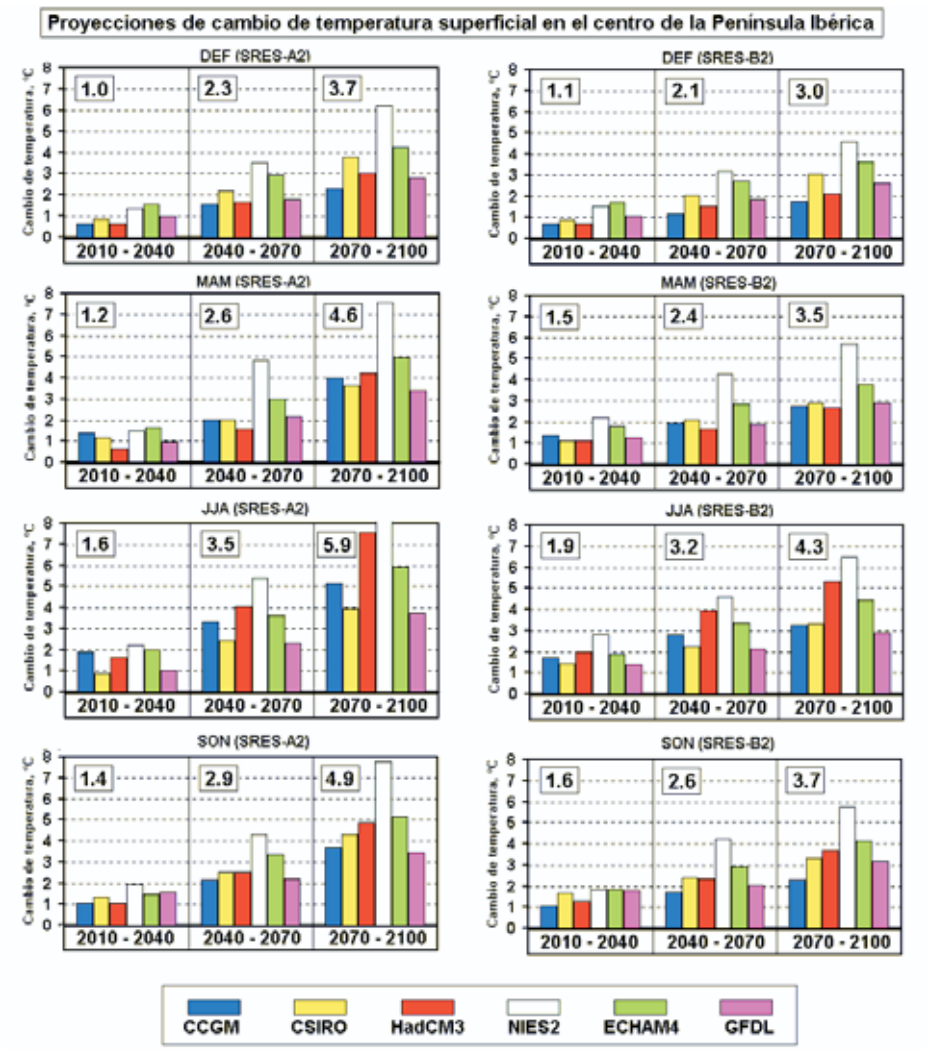


Fig. 1.14. *Cambios proyectados por seis AOGCM de la temperatura media del aire en superficie (ºC) en la celdilla de cada uno que incluye la parte central de la Península (ver figura 1.13). Los resultados son promedios estacionales (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño) y corresponden a dos escenarios de emisiones (A2 en la columna izquierda y B2 en la derecha). En cada figura se presentan los cambios en cada tercio del siglo 21 con respecto al clima actual. Se muestran recuadrados los valores promedio del conjunto de los seis modelos considerados.*

Considerando los valores de incrementos de temperatura promedio del conjunto de modelos que se muestran recuadrados en la figura 1.14, se observa que el mayor ritmo de calentamiento estacional corresponde al verano del escenario A2 y el menor a los meses de invierno del escenario B2. Asimismo, se aprecia que en el escenario A2 el ritmo de calentamiento se acelera

en todas las estaciones a medida que trascurre el siglo, mientras que en el escenario B2 las evoluciones del calentamiento presentan por lo general una tendencia más lineal.

En la figura 1.15 se muestra la comparación entre los cambios proyectados por los seis AOGCM para la precipitación en el centro de la Península. En ella se evidencian más discrepancias entre los modelos, lo que es indicativo del menor grado de confianza que poseen las proyecciones de cambio de las precipitaciones en relación con las de la temperatura. No obstante, quizá esto se deba, en parte, a la mayor variabilidad espacial de los cambios de precipitación simulados por todos los modelos, lo que hace que la diferencia en los tamaños de las celdillas sobre la Península sea más determinante que en el caso de los cambios de temperatura. Sin embargo, también se evidencian algunas semejanzas entre los resultados de los AOGCM analizados. Así por ejemplo, casi todos coinciden en proyectar disminuciones de precipitación en el clima futuro en relación con el periodo 1960-1990, aunque algunos modelos simulan algunos cambios estacionales con signo positivo. Asimismo hay una mayoría de modelos que proyectan una disminución progresiva de precipitaciones estacionales en el escenario A2 a lo largo del siglo, aunque este comportamiento no se manifiesta en el escenario B2.

El modelo HadCM3 es el que simula en la parte central de la Península Ibérica las mayores reducciones de precipitación en primavera, verano y otoño, mientras que proyecta aumentos de precipitación en los meses de invierno. La progresividad a lo largo del siglo de tales cambios es más regular en este modelo que en los demás. El modelo en que las proyecciones de cambios de precipitación anual son menores es el CSIRO, pero la progresividad de dichos cambios es poco regular. Se destaca esta característica porque los valores de los cambios que se incluyen en la figura corresponden a diferencias entre las precipitaciones estacionales simuladas para cada tercio del siglo 21 y las simuladas para el intervalo de 1960-1990. De manera que si el valor del cambio fuera mayor en un tercio anterior que en uno posterior, eso significaría un aumento relativo de la precipitación entre el primero y el segundo.

Considerando los promedios de conjunto de los seis AOGCM, cuyos valores se muestran recuadrados en la figura 1.15, se aprecia que en el escenario A2 la progresividad de los cambios es regular en todas las estaciones del año. Es decir, el valor absoluto aumenta a lo largo del siglo. Traduciendo las unidades de los cambios que se emplean en la figura, los resultados promedio de disminución de la precipitación anual en los tres periodos del siglo son: 61.2, 85.5 y 137.7 mm/año. Sin embargo, lo que se observa en el escenario B2 son valores absolutos de cambio anual menores en el tercio central del siglo (78.3, 73,8 y 87,3 mm/año). Eso significaría que el tercio central sería menos seco que los otros dos. Además, esta distinta progresividad del cambio de precipitación anual a lo largo del siglo en ambos escenarios (A2 y B2) se aprecia en los resultados de la mayor parte de los AOGCM considerados, lo que confiere a este resultado alguna certidumbre.

1.3.4. Modelos regionales del clima

Aunque los resultados de proyecciones de clima obtenidos con diversos AOGCM presentan razonables semejanzas a escala global, cuando se consideran escalas regionales las distribuciones de temperatura y, sobre todo, de precipitación muestran notables discrepancias, como se ha visto en la sección anterior. Esta mengua en la fiabilidad de los resultados a escala regional se atribuye en buena medida a la insuficiente resolución espacial de los AOGCMs y al uso de parametrizaciones físicas no adaptadas a procesos de mesoescala. Una baja resolución espacial da lugar a que se distorsionen las líneas de costa y se suavicen las alturas de los accidentes orográficos. Además, ya se ha señalado que los modelos no pueden reproducir de forma realista procesos atmosféricos con un tamaño similar o inferior al de las celdillas en que se discretiza el dominio donde se aplica.

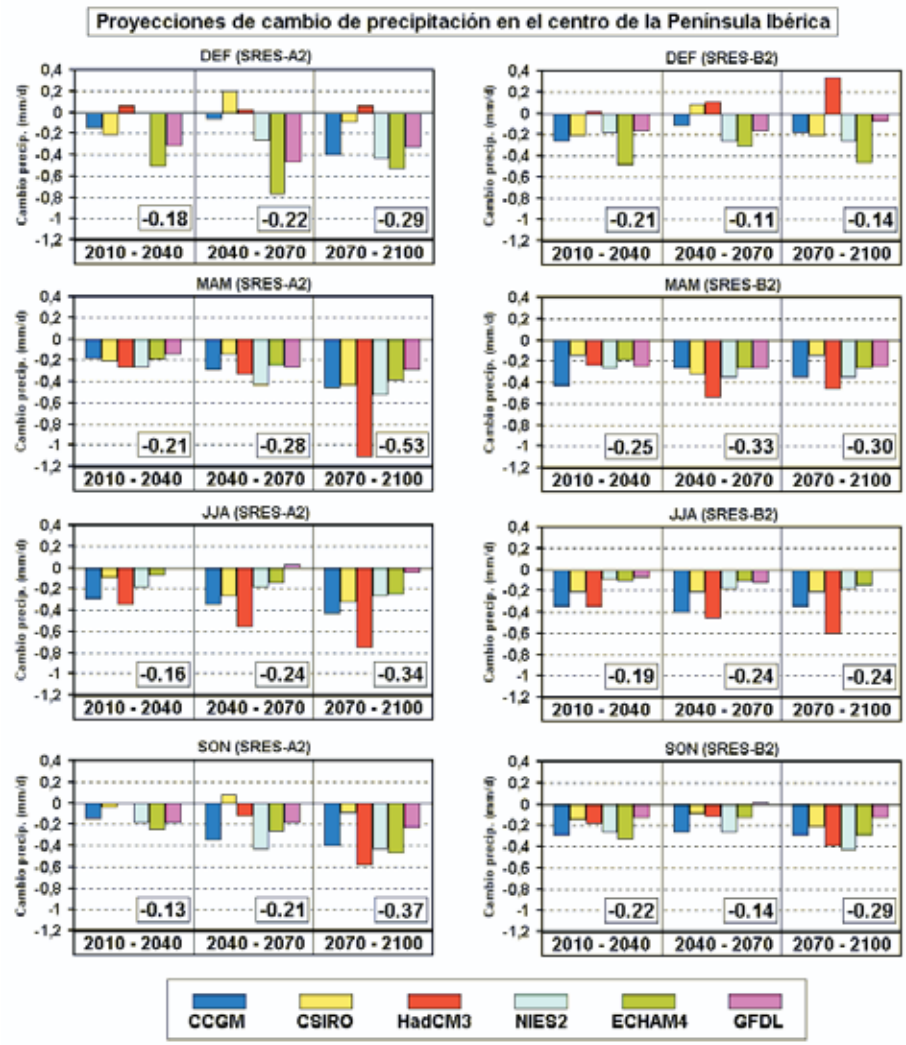


Fig. 1.15. *Cambios proyectados por seis AOGCM de la precipitación media (mm / día) en la celdilla de cada uno que incluye la parte central de la Península (ver figura 1.13). Los resultados son promedios estacionales (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño) y corresponden a dos escenarios de emisiones (A2 en la columna izquierda y B2 en la derecha). En cada figura se presentan los cambios en cada tercio del siglo 21 con respecto al clima actual. Se muestran recuadrados los valores promedio del conjunto de los seis modelos considerados.*

Por otra parte, hay que tener presente que algunas parametrizaciones físicas de los AOGCM se han desarrollado y validado para la baja resolución espacial que usan. Por eso, no suelen resultar adecuadas para reproducir procesos atmosféricos de menor escala, algunos de los cuales podrían ser los que más contribuyan a las características del clima local. En particular, los climas de la Península Ibérica son el resultado de la acción de la circulación global de la atmósfera, de las interacciones entre este flujo a macroescala y la orografía, de los contrastes mar-tierra y de otros efectos de carácter más local (Castro *et al.* 1995). Pero los actuales AOGCM no son capaces de reproducir estos rasgos del clima en la Península. Un ejemplo ilustrativo se muestra en la figura 1.16, donde se compara las distribuciones de temperatura y precipitación estacionales simuladas por el modelo HadCM3 para el periodo 1961-1990 y las climatológicas para dicho periodo. Es evidente que los rasgos climáticos de escala regional en la Península no están reproducidos, porque la baja resolución espacial del AOGCM no lo permite. Pero aumentar la resolución de los AOGCM supondría un incremento muy considerable del tiempo de computación y también una adaptación de las parametrizaciones físicas a esa mayor resolución en todas las latitudes del planeta. La solución al primer

problema depende de la disponibilidad de computadores suficientemente potentes y rápidos, aunque todavía no hay resultados de modelos climáticos globales con resoluciones superiores a 100 km. Pero, para resolver el segundo problema quizá haya que esperar algo más de tiempo. En consecuencia, para obtener aproximaciones más adecuadas a los climas de escala regional o sub-regional, actualmente se aplican otras técnicas a partir de las simulaciones con los AOGCM.

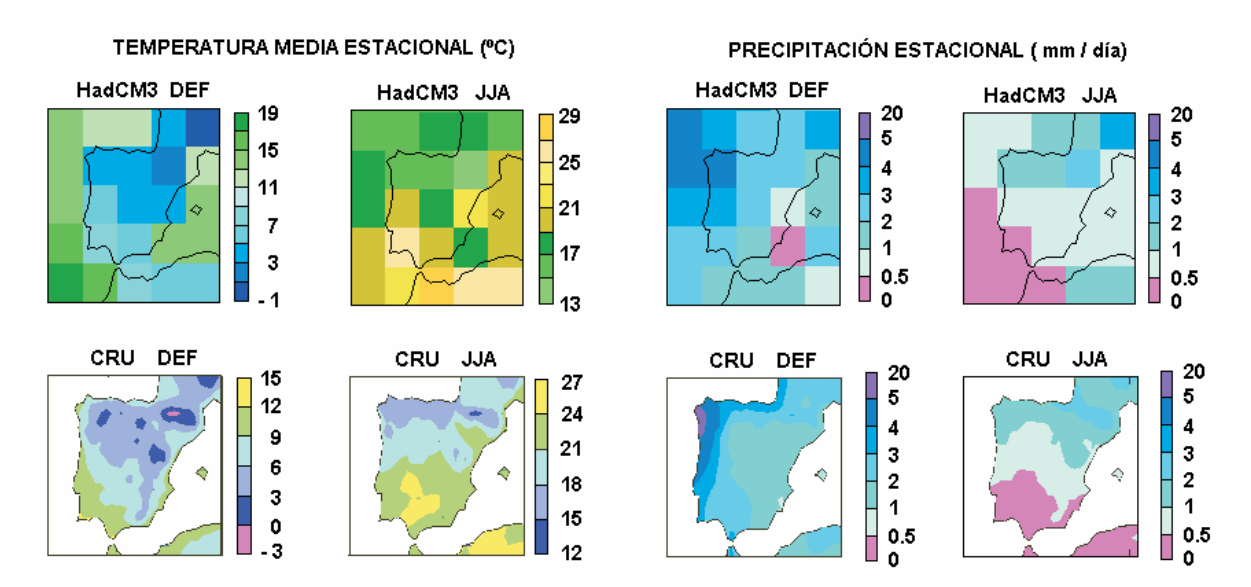


Fig. 1.16. *Comparación entre las temperaturas medias (en ºC) y las precipitaciones (en mm /día) promedio en invierno (DEF) y verano (JJA) simuladas por el AOGCM HadCM3 (fila de arriba) y la climatología elaborada por la Unidad de Investigación del Clima (CRU) de la Universidad de East Anglia (fila de abajo). En ambos casos el periodo es 1961-1990. Nótese que los colores y valores en las escalas de temperaturas son diferentes en cada mapa, pero los de precipitación son iguales.*

Dichas técnicas se pueden agrupar en dos categorías: Métodos estadísticos de regionalización y modelos regionales. Los primeros traducen la información proporcionada por los AOGCM en descripciones de las variables climáticas con mucha resolución, mediante regresiones estadísticas multivariable entre series de valores promedio de temperatura y precipitación observados en estaciones incluidas en una celdilla del modelo global y valores promedio de otras variables atmosféricas (predictores) simulados en ella. Tales ecuaciones de regresión se usan para inferir la correspondiente información climática en cada lugar a partir de valores simulados por el AOGCM para clima perturbado (Sailor y Li 1999 o von Storch y Zwiers 1999, entre otros). Los resultados que se obtienen con los métodos estadísticos deben analizarse con cautela, pues se basan esencialmente en la suposición implícita de que la correlación espacial entre las variables climáticas dentro de una celdilla del modelo, obtenida en condiciones de clima actual, no se altera después de un cambio climático global apreciable, y además los resultados dependen críticamente de los predictores que se elijan (Huth 2004).

Los modelos regionales de clima (en adelante RCM) son considerados como la técnica más prometedora para realizar proyecciones realistas de cambio climático a escala regional (IPCC 2001). Los RCM son esencialmente similares al módulo atmosférico de cualquier AOGCM, pero se aplican a un área limitada del globo con más resolución, es decir discretizando espacialmente con celdillas de menor tamaño. Se utilizan anidándolos en la malla del modelo global (figura 1.17). Esto significa que en los RCM los valores iniciales de las variables simuladas y su evolución temporal en los contornos del dominio se derivan de resultados obtenidos por un AOGCM. En definitiva, los RCM están forzados por los contornos con valores simulados por los AOGCM. Por tanto, el procedimiento que actualmente se sigue consiste en

utilizar las salidas de un AOGCM para simular la respuesta de la circulación global a forzamientos de macroescala y los RCM para tener en cuenta los forzamientos a escala más pequeña que el tamaño de la celdilla en el AOGCM, de una forma acorde con principios físicos, y para resaltar la simulación de circulaciones atmosféricas y variables climáticas a escalas espaciales más finas (IPCC 2001).

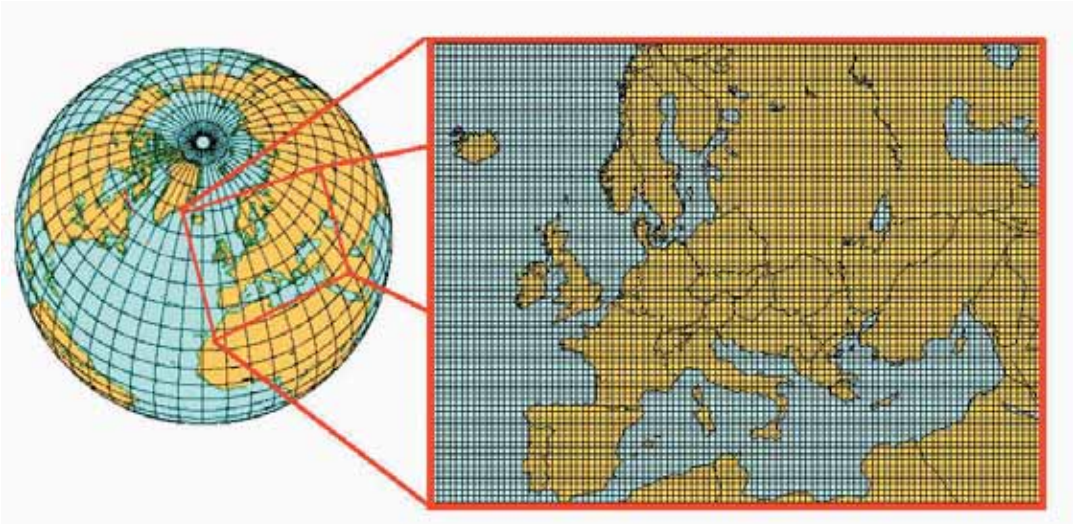


Fig. 1.17. *Ejemplo del dominio de aplicación de un RCM sobre Europa con una rejilla de 50 km. La técnica de anidamiento ("nesting") consiste en proporcionar al RCM información de la evolución de las variables atmosféricas en los puntos del contorno del dominio. Dicha información se obtiene previamente de la simulación con un AOGCM que utiliza una rejilla con resolución más baja (celdillas con mayor tamaño).*

La técnica de los RCM, iniciada a principios de la última década del siglo 20 (Dickinson *et al.* 1989), se utiliza actualmente para una gran variedad de aplicaciones, desde estudios paleoclimáticos a proyecciones de cambio climático antropogénico. Proporcionan resultados con mucha resolución espacial (entre 50 y 20 km) a partir de simulaciones de varias decenas de años, y son capaces de describir mecanismos climáticos de realimentación a escala regional. Generalmente los RCM actuales son versiones adaptadas de modelos de área limitada utilizados operativamente para predicción meteorológica con alta resolución. No obstante, ya existen RCM con acoplamiento entre procesos atmosféricos y de otros componentes del sistema climático (océano, hidrología, vegetación, etc.).

No obstante, se ha de tener presente que un RCM no puede corregir los errores generados en el AOGCM en que se anide. Por eso es conveniente elegir un AOGCM bien validado que represente de forma realista los rasgos de la circulación global que afecten a la región de interés, o bien considerar el anidamiento en un conjunto de diferentes AOGCMs. Asimismo es importante que el RCM incluya parametrizaciones físicas adecuadas para simular procesos convectivos, intercambios de energía entre el aire y el suelo o efectos radiativos de las nubes, de los GEIs o de los aerosoles. Finalmente, la elección del tamaño de las celdillas de la malla del RCM debe tomarse como un compromiso entre la escala de aquellos procesos atmosféricos que más influencia ejercen sobre el clima de la región de interés y la potencia de computación disponible. A pesar de que el dominio de aplicación de los RCM abarca una pequeña parte del planeta, el tiempo de computación es muy superior al que precisa un AOGCM para simular un mismo periodo. Por eso los actuales RCM no suelen simular periodos de más de unas pocas decenas de años (usualmente 30 años), aunque el incremento de la potencia computacional va a permitir muy pronto alargar estos periodos.

1.3.5. Proyecciones de clima futuro en España realizadas con un RCM

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de una serie de simulaciones realizadas con el modelo regional de clima llamado PROMES (Gallardo *et al.* 2001). Se trata de un modelo que resuelve numéricamente las ecuaciones primitivas de la dinámica atmosférica e incluye parametrizaciones adecuadas de los procesos físicos de intercambio radiativo, de formación de nubes y precipitación y de intercambio turbulento de masa y energía entre la atmósfera y la superficie. Se integran considerando una proyección horizontal Lambert conforme en un dominio de 6000 x 4500 km que abarca casi toda Europa y norte de África, incluyendo el Archipiélago de las Canarias. La resolución horizontal de las simulaciones cuyos resultados se presentan aquí es de 50 km. En la dirección vertical el RCM PROMES considera 35 capas con espesor variable, mucho menor en las capas bajas de la atmósfera.

Las simulaciones se realizaron en el marco del proyecto de investigación PRUDENCE financiado por el V Programa Marco de la Unión Europea. En dicho proyecto se compararon los resultados de ocho RCM desarrollados en diversos centros o universidades europeos (Christensen *et al.* 2002). Concretamente, el grupo de modelado español que participa en dicho proyecto (Grupo MOMAC de la Universidad de Castilla-La Mancha en Toledo) es el autor del modelo PROMES. Todos estos RCM europeos se ejecutaron anidados en el modelo global atmosférico llamado HadAM3H desarrollado en el Hadley Centre for Climate Prediction and Research del Reino Unido (Pope *et al.* 2000), que usa una resolución horizontal de aproximadamente 140 km en las latitudes de la Península Ibérica. Este modelo global atmosférico utiliza las temperaturas superficiales oceánicas proporcionadas por el AOGCM HadCM3 antes mencionado. Aunque la simulación con el modelo global atmosférico HadAM3H abarca el periodo de 1950 a 2100, los experimentos con los RCM anidados en él se realizaron abarcando dos periodos de 30 años, a causa del comentado mayor esfuerzo computacional que éstos modelos requieren. Uno correspondiente a condiciones climáticas actuales (1960-1990), en el que se consideraron los niveles observados de GEIs y aerosoles atmosféricos, y otro al último tercio del presente siglo (2070-2100), teniendo en cuenta los escenarios de emisiones SRES-A2 y SRES-B2. En consecuencia, cada RCM realizó un total de tres experimentos de 30 años cada uno. Para la elección del modelo global atmosférico en el que se anidaron los RCM se tuvo en cuenta la aceptable calidad que presentan en general sus resultados.

Del numeroso conjunto de variables de salida del RCM PROMES, para ilustrar el impacto en el clima de España del cambio climático proyectado, en este apartado se presentan resultados correspondientes a temperaturas medias diarias del aire superficial (2 metros sobre el suelo) y precipitaciones diarias acumuladas para cada estación del año. En primer lugar se comentan los resultados de la simulación con PROMES correspondiente al periodo 1960-1990 (en adelante denominada simulación de control) comparándolos con valores climatológicos derivados de observaciones durante dicho periodo. De esta manera, se puede tener una idea del grado de ajuste con la realidad de las simulaciones con este RCM. Posteriormente se muestran los resultados de las dos proyecciones climáticas (A2 y B2) en forma de diferencia entre los valores obtenidos para cada escenario y los simulados para el periodo 1960-1990. Asimismo se presentan resultados de cambios en la evapotranspiración y la velocidad de viento para cada escenario con respecto al clima actual. Por último se incluye un análisis de proyecciones de cambios en extremos climáticos relacionados con las temperaturas y la precipitación.

a) Comparación entre la simulación de control y la climatología

Antes de comentar los resultados de esta comparación es conveniente tener en cuenta los siguientes dos extremos:

- La climatología con la que se comparen los resultados de la simulación realizada con un RCM debe estar discretizada en celdillas con un tamaño semejante a las del modelo, a fin de que la topografía del dominio sea similar. Por eso se ha considerado la climatología elaborada por la Unidad de Investigación del Clima (en adelante mencionada por las siglas CRU, de Climate Research Unit) de la Universidad de East Anglia (Reino Unido) a partir de valores observados diariamente entre 1960 y 1990 en un conjunto de estaciones climatológicas de España y Portugal (New *et al.* 1999). Esta base de datos se puede obtener por Internet en la dirección *http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk*. Con tales observaciones puntuales se han asignado los valores medios que corresponderían a celdillas de 0.5º x 0.5º en latitud-longitud. Por consiguiente, se trata de distribuciones espaciales de valores climatológicos que resultan de un tratamiento de interpolado espacial siguiendo unos criterios objetivos.

- Los valores de la simulación de control con el modelo PROMES resultan del anidamiento de dicho RCM en el experimento realizado con un modelo global de clima, considerando que el componente atmosférico del sistema climático contiene concentraciones de GEIs y aerosoles correspondientes a las evoluciones observadas en el periodo 1960-1990. Es decir, no cabe esperar que la secuencia diaria de los campos de la circulación global de la atmósfera y del océano se corresponda con la realmente ocurrida en dicho periodo, ya que se trata de reproducir valores climatológicos medios.

En consecuencia, la comparación se debe realizar analizando la semejanza entre las distribuciones espaciales de promedios extendidos a los 30 años de las variables consideradas, en vez de entre valores correspondientes a un punto y mes o año determinados. Por otra parte, como la climatología sólo incluye valores en áreas continentales, donde existen observatorios, se comprobará que una resolución de 0.5º x 0.5º no permite una buena correspondencia entre la situación de las islas Baleares o Canarias y la de las celdillas en que se asignan valores climatológicos.

La figura 1.18 permite la comparación gráfica entre las distribuciones de valores promedio estacionales de la temperatura media diaria en la Península Ibérica y Baleares. Por lo general, se observa una buena semejanza entre los valores simulados y la climatología. No obstante, el modelo tiende a realzar más el efecto orográfico en las temperaturas, de manera que en las zonas más elevadas el modelo simula temperaturas más bajas que los valores de la climatología. Este sesgo se percibe en todas las estaciones, aunque es más evidente en verano y otoño, donde en promedio es de unos 2 a 4 grados en elevaciones superiores a 600 m. Sin embargo, en el resto de las zonas y estaciones los valores simulados se asemejan más a los climatológicos. En las islas las diferencias se mantienen por debajo de 2 grados. No obstante, debe tenerse en cuenta que las resoluciones del modelo y de la climatología no permiten resolver adecuadamente las islas de menor tamaño. Este comportamiento general se ha observado también en las simulaciones de control (periodo 1960-1990) realizadas por los otros RCM utilizados en el proyecto europeo PRUDENCE antes mencionado.

Las distribuciones de las precipitaciones medias estacionales simuladas y las climatológicas se muestran en la figura 1.19. Aunque el modelo presenta más variabilidad espacial que la climatología, se aprecia que reproduce de forma aceptable los gradientes norte-sur en verano y oeste-este en las demás estaciones del año. La mayor variabilidad observada en los resultados del modelo parece deberse a que éste tiende a incrementar los efectos orográficos. En general los valores simulados de precipitaciones estacionales en la costa atlántica se corresponden muy bien con los de la climatología. Sin embargo los simulados en la mitad suroriental son generalmente menores que los climatológicos. La distribución de precipitación simulada para la estación de verano es la que presenta mayor semejanza con la climatología, mientras que en invierno es cuando se aprecian las mayores diferencias, especialmente en el centro y este de la Península. No obstante, analizando las evoluciones anuales de precipitación simuladas para diversas subregiones de la Península, se ha comprobado que se reproducen aceptablemente

los valores climatológicos, discriminando bien entre las estaciones más y menos lluviosas del año para cada una de las zonas peninsulares.

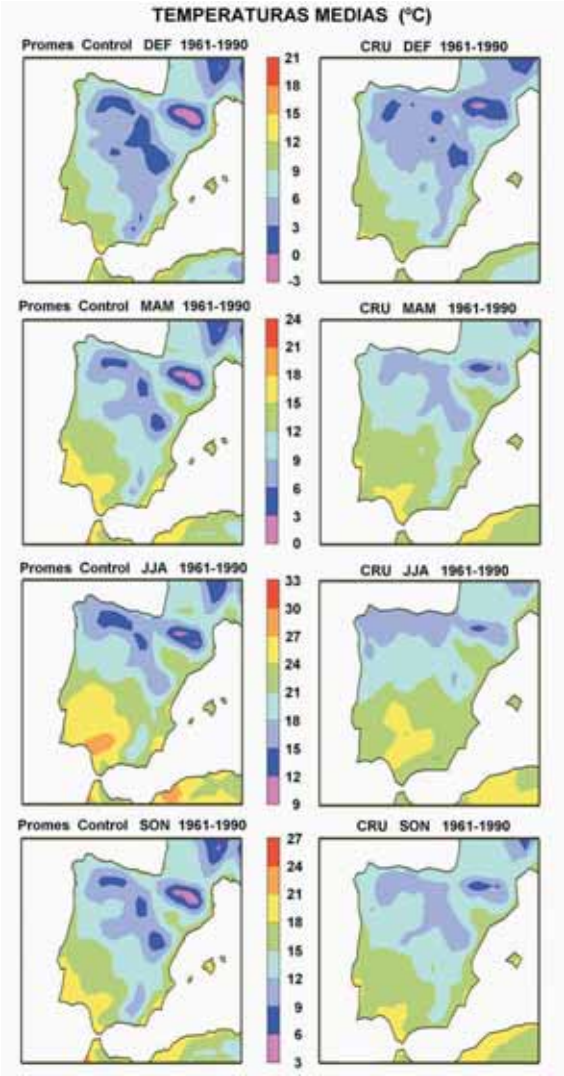


Fig. 1.18. *Comparación de las temperaturas medias diarias (en ºC) simuladas por el RCM-PROMES (columna izquierda) y elaboradas por la CRU (columna derecha) a partir de datos climatológicos en el periodo 1961-1990. Cada figura corresponde a promedios de una estación del año: invierno (DEF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON). Las escalas de colores incluyen valores de temperatura diferentes para cada estación.*

Como resumen, puede decirse que el modelo tiende a resaltar más los efectos topográficos que la climatología elaborada por la CRU, a pesar de que la discretización espacial del terreno es muy semejante en ambos casos: 50 km en el modelo PROMES y 0,5º de latitud-longitud en la climatología de la CRU. Se recuerda también que estos valores climatológicos elaborados por la CRU resultan de un tratamiento de interpolación espacial entre los registrados puntualmente en observatorios, que por lo general no se localizan en los lugares más elevados del territorio. Por ello, debe considerarse que éstos presentan también un cierto grado de suavización en las zonas montañosas. No obstante, lo más destacable de esta comparación entre los valores simulados por el RCM PROMES y la climatología de la CRU para el periodo 1960-1990 es que el modelo reproduce de forma aceptable los diversos regímenes climáticos de la Península Ibérica. En consecuencia, se puede suponer que los resultados de las simulaciones con los escenarios de clima futuro realizadas con dicho RCM, que se muestran a

continuación, presentan un grado de confianza razonable acerca de su capacidad para regionalizar los cambios climáticos simulados a escala global por el AOGCM HadCM3.

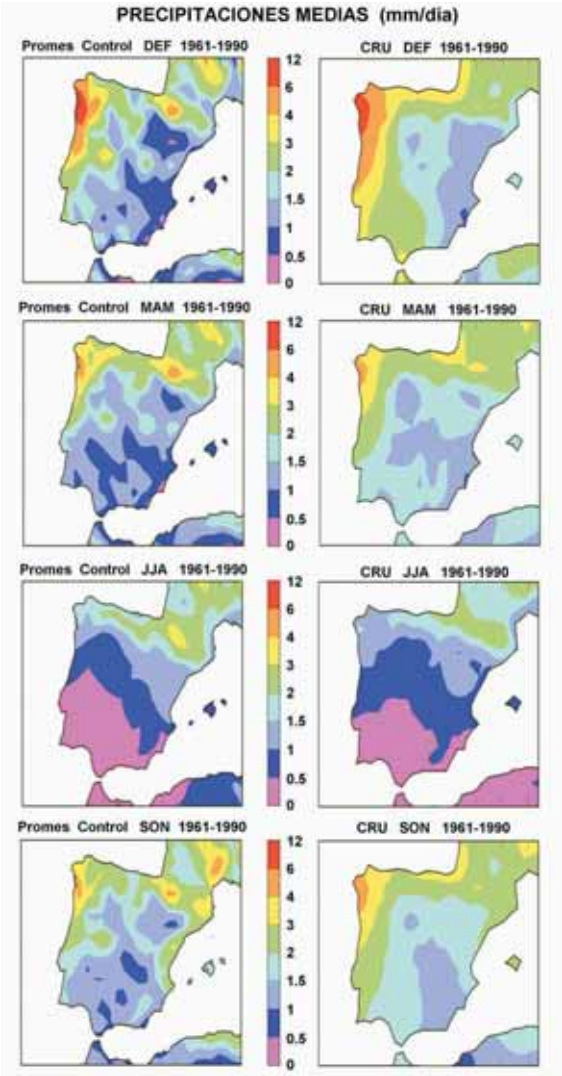


Fig. 1.19. *Comparación de las precipitaciones estacionales medias (en mm/día) simuladas por el RCM-PROMES (columna izquierda) y elaboradas por la CRU (columna derecha) a partir de datos climatológicos en el periodo 1961-1990. Cada figura corresponde a promedios de una estación del año: invierno (DEF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON).*

b) Cambios de las temperaturas medias proyectados en los escenarios de clima futuro

En este subapartado se incluyen los cambios proyectados para los promedios estacionales de las temperaturas medias diarias en los dos escenarios de emisiones considerados (SRES-A2 y SRES-B2), correspondientes al último tercio del siglo XXI (periodo 2071-2100), con respecto a los valores modelados en la simulación de control (periodo 1961-1990). Aunque no puede suponerse que la evolución de tales cambios a lo largo del siglo tenga un comportamiento creciente perfectamente lineal, parece razonable suponer que en periodos anteriores a éste, tales cambios alcanzarían valores inferiores, como se deduce de los resultados obtenidos con los AOGCM.

Las proyecciones del cambio estacional en la temperatura media diaria se muestran en la figura 1.20. El comportamiento general es que los incrementos térmicos más intensos corresponden al escenario SRES-A2, es decir el de mayores emisiones de GEIs. Las diferencias entre el escenario A2 y B2 se mantienen en torno a 1ºC. Los meses de invierno son los que presentan menores incrementos de la temperatura diaria, con valores entre 2 y 4 ºC para el escenario A2 y entre 1 y 3ºC para el escenario B2. La distribución espacial de estos cambios en invierno es parecida en ambos escenarios, correspondiendo los menores incrementos a la zona noroeste de la Península y las islas Canarias y los mayores a la mitad suroriental de la Península. La estación en que los incrementos de temperatura diaria son mayores es el verano, alcanzando valores superiores a 6ºC en el escenario A2 y por encima de 5ºC en el B2. Estos cambios tan elevados se localizan en el interior de la Península. También se percibe claramente un gradiente entre la periferia y el interior, que podría relacionarse con el efecto regulador de las brisas costeras. Esto mismo puede decirse de los dos archipiélagos, aunque su pequeño tamaño no deja ver dicho gradiente. En la primavera y el otoño los incrementos proyectados alcanzan valores intermedios entre los del invierno y el verano. No obstante, los incrementos en otoño son superiores a los de los meses de primavera, en especial en el escenario B2. Aunque no se muestran gráficamente, los cambios proyectados para los promedios estacionales de temperaturas máximas y mínimas diarias presentan una distribución espacial semejante a los de las temperaturas medias. No obstante, los valores de los cambios son en torno a 1ºC más elevados para las máximas que para las mínimas, siendo los de estas últimas similares a los de las temperaturas medias. Esto significa que la amplitud de la oscilación térmica diaria se incrementa respecto al clima presente. Este comportamiento se aprecia en todas las estaciones y en la mayor parte de las zonas del territorio, salvo en las áreas insulares o en las muy próximas a las costas. En sus aspectos esenciales, los anteriores resultados se asemejan a los obtenidos por Räisänen *et al.* (2004) utilizando otro modelo regional de clima, en el marco del proyecto europeo PRUDENCE antes mencionado.

c) Cambios de las precipitaciones medias proyectados en los escenarios de clima futuro

A continuación se analizan los cambios proyectados para las precipitaciones estacionales medias para los dos escenarios de emisiones considerados (A2 y B2) correspondientes al periodo 2071-2100, tomando como referencia los valores modelados en la simulación de control (1961-1990). Antes de presentar los resultados, conviene señalar que no sería correcto realizar una simple interpolación temporal para deducir cambios de precipitación en periodos anteriores al 2071-2100. Esto se comprueba observando los resultados obtenidos con los AOGCM representados en la figura 1.15, donde se aprecia que ningún AOGCM simula una tendencia uniforme del cambio de precipitación estacional en la Península Ibérica a lo largo del siglo 21.

En la figura 1.21 se muestran los valores de los cambios estacionales expresados en mm/día. Multiplicando estos valores por el número de días de cada estación, que son 90 pues en las simulaciones climáticas con modelos los años se consideran con una duración uniforme de 360 días, se pueden deducir los cambios en las cantidades totales de precipitación estacional. Lo que se aprecia más claramente en la figura es que los cambios tienen mayor magnitud absoluta en el escenario A2, independientemente de su signo. Así, en invierno resultan incrementos en el noroeste de la Península que llegan a superar el valor de 1 mm/día en el escenario A2, mientras que en el B2 éstos se mantienen por debajo de 0.5 mm/día en dicha región. Algo similar ocurre en otoño, pero en la zona noreste de la Península. Este resultado está de acuerdo con el obtenido por Sumner *et al.* (2003) utilizando las simulaciones realizadas con otro modelo global (ECHAM4 del Max-Planck Institut für Meteorologie de Hamburgo). Salvo estas dos excepciones, los cambios en precipitación en España tienen signo negativo. Es decir se proyectan para el último tercio del siglo 21 disminuciones de precipitación estacional respecto al clima actual, siendo por lo general de mayor magnitud en el escenario A2 que en el B2, salvo en las proximidades de los Pirineos para los meses de verano en que la magnitud de

los cambios son similares en los dos escenarios. En las islas Canarias no se simulan cambios apreciables de precipitación total en ninguna estación del año.

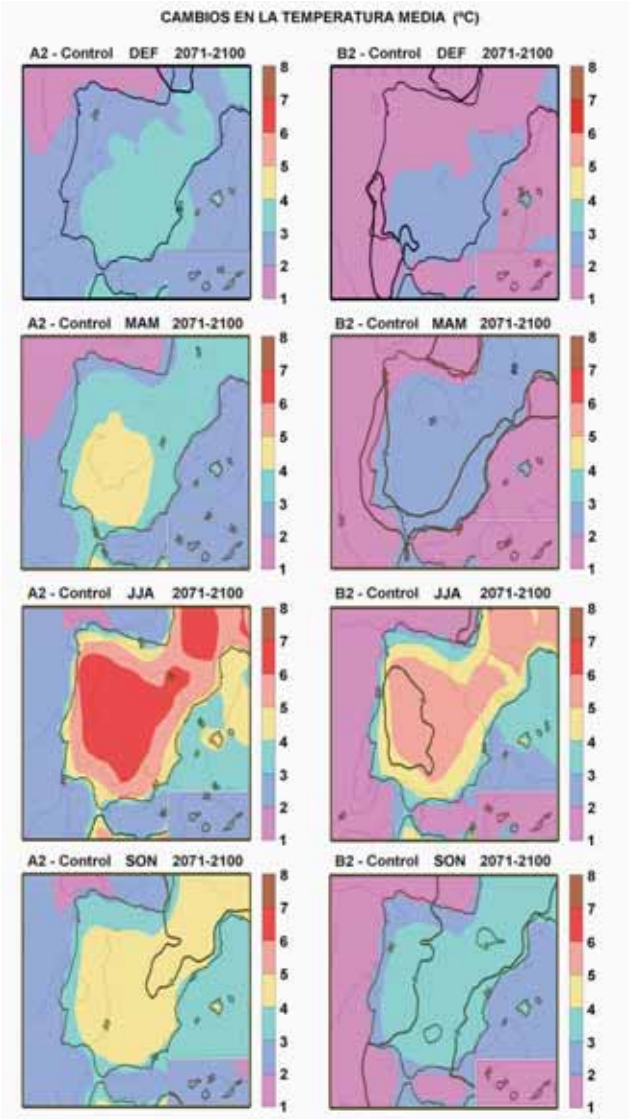


Fig. 1.20. *Proyecciones de cambio de temperatura media diaria del aire superficial (ºC), promediadas para cada estación del año (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño) en la Península Ibérica, Baleares y Canarias (esquina inferior derecha en cada mapa), correspondientes a dos escenarios SRES de emisiones: A2 en la columna izquierda y B2 en la columna derecha. Los valores corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990). Las isolíneas en las figuras muestran los porcentajes de cambio en la variabilidad interanual (positivos en trazo continuo, negativos en trazo discontinuo y cero en trazo grueso continuo).*

d) Cambios proyectados en la evapotranspiración y el módulo del viento

A continuación se presentan las diferencias obtenidas entre los promedios estacionales de la evapotranspiración superficial diaria proyectados para el último tercio del siglo 21 y los simulados en el experimento de control (clima actual). Ha de advertirse que las cantidades de agua evaporada desde la superficie se simulan con un esquema de parametrización implementado en el propio modelo regional de clima PROMES. Por tanto el esquema proporciona un buen acoplamiento entre los procesos atmosféricos y edáficos. Dicho esquema,

desarrollado por Decoudre *et al*. (1993), no solo calcula la cantidad de agua evaporada desde el suelo, sino también la transpirada por los diversos tipos de cubierta vegetal incluidos en cada celdilla del modelo (Arribas *et al*. 2003). Hay que señalar también que en todas las simulaciones (control y escenarios) se han mantenido los mismos tipos de usos de suelo.

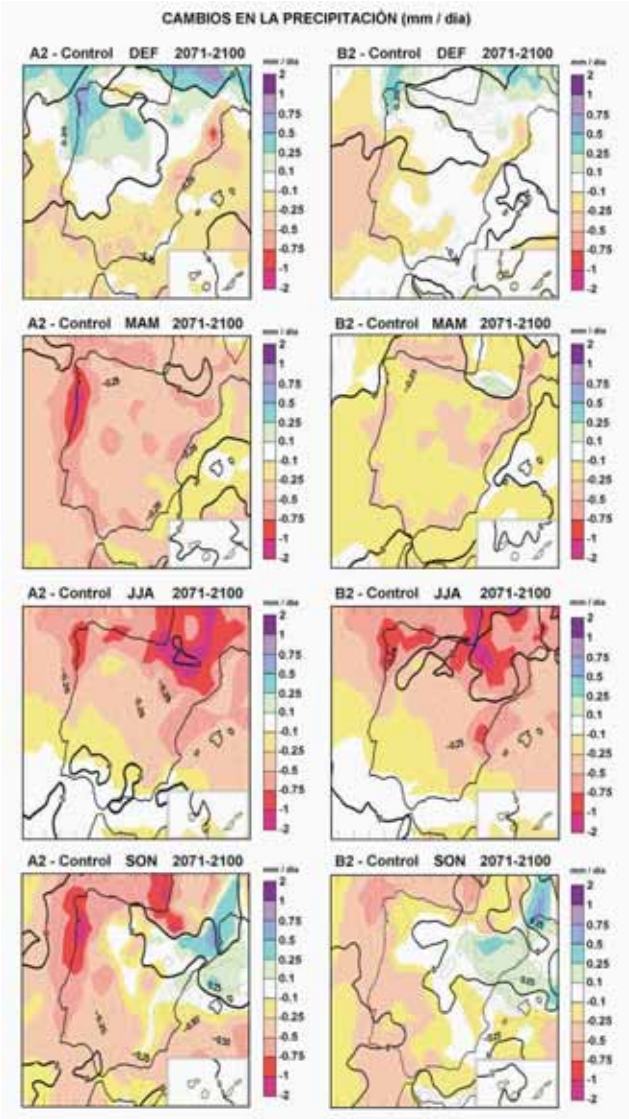


Fig. 1.21. *Proyecciones de cambio de precipitación (en mm/día) promediadas para cada estación del año (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño) en la Península Ibérica, Baleares y Canarias (esquina inferior derecha en cada mapa), correspondientes a dos escenarios SRES de emisiones: A2 en la columna izquierda y B2 en la columna derecha. Los valores corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990). Las isolíneas en las figuras muestran los porcentajes de cambio en la variabilidad interanual (positivos en trazo continuo, negativos en trazo discontinuo y cero en trazo grueso continuo).*

Los resultados obtenidos para los dos escenarios de emisiones considerados (A2 y B2) muestran una notable disminución porcentual de las cantidades promedio de agua evapotranspirada en verano y otoño en la mayor parte de la Península con respecto a los valores obtenidos en la simulación de clima actual. Las reducciones máximas se observan en

la mitad sur peninsular durante los meses de verano, alcanzando en algunas zonas valores en torno al 60% en el escenario A2 (figura 1.22), mientras que en otoño se mantienen por debajo del 40%. En el escenario de emisiones B2 las reducciones en la evaporación son más moderadas, no superando por lo general el 40% en verano y el 20% en otoño. No obstante, en ambas estaciones se aprecia un ligero aumento de la evapotranspiración en el tercio norte de la Península, que no llega a superar el 20%, en los dos escenarios simulados. En los meses de invierno, sin embargo, se proyectan incrementos de evaporación superficial en casi toda la Península, alcanzando en algunas zonas aumentos que superan el 40%, aunque en la mayor parte del territorio se mantienen por debajo del 20% (figura 1.22). No se aprecian diferencias significativas entre los resultados obtenidos para los dos escenarios de emisiones considerados. Finalmente, en los meses de primavera se obtienen ligeras disminuciones de evaporación en la mitad sur peninsular (menores del 20%) y aumentos en la mitad norte, superando el valor del 40% en el noroeste. Por lo que se refiere a Canarias y Baleares, en ninguna de las simulaciones se obtienen cambios significativos en los promedios estacionales de agua evaporada en la superficie con respecto a los valores simulados en el experimento de control (clima actual).

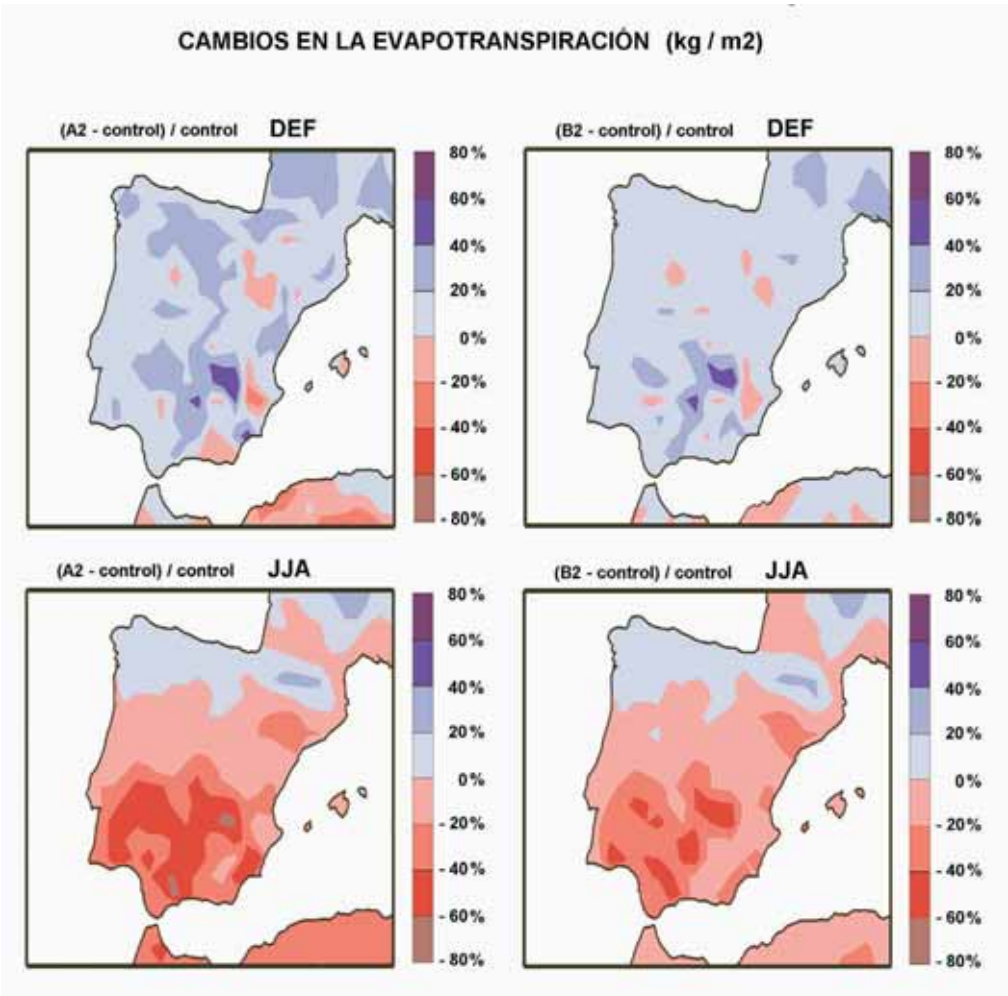


Fig. 1.22. *Proyecciones de cambio porcentual de la evapotranspiración en los meses de invierno (DEF) y verano (JJA), correspondientes a los dos escenarios SRES de emisiones: A2 en la columna izquierda y B2 en la columna derecha. Los valores corresponden a porcentajes de cambio entre la simulación del escenario y la de control con respecto a la de control.*

Por lo que se refiere al módulo del viento superficial (a 10m sobre el suelo), los cambios porcentuales proyectados en los dos escenarios con respecto al clima actual presentan signos diferentes según la época del año, y también distintos en la Península y Baleares que en Canarias. Así, en verano se observa un significativo incremento de la intensidad media del viento en la mayor parte de la Península, llegando a aumentos superiores al 10%, excepto en el noreste donde se aprecian ligeras disminuciones (figura 1.23). Pero en las demás estaciones del año predominan los cambios negativos de la intensidad media del viento sobre la Península y las Baleares, siendo los mayores en otoño, con reducciones que superan el 10% en la región del noreste y el 5% en la mayor parte de la Península. No obstante, en la zona del Estrecho de Gibraltar se proyectan incrementos en el módulo de viento en todas las estaciones del año, excepto en invierno. Sin embargo, la distribución estacional del cambio en la intensidad del viento proyectado para la región de Canarias es prácticamente opuesta a la de la Península. El verano es la época del año en que los cambios proyectados tienen signo negativo, es decir se proyecta una disminución del viento promedio en clima futuro con respecto a clima actual, mientras que en el resto de estaciones del año se simulan incrementos de la intensidad media del viento, siendo los más elevados en primavera e invierno (figura 1.23). En todos los casos, las diferencias positivas y negativas en el módulo del viento proyectadas en España para final de siglo (2071-2100) con respecto a los valores del periodo 1961-1990 (clima actual) resultan algo más acentuadas en la simulación del escenario A2 que en la del B2.

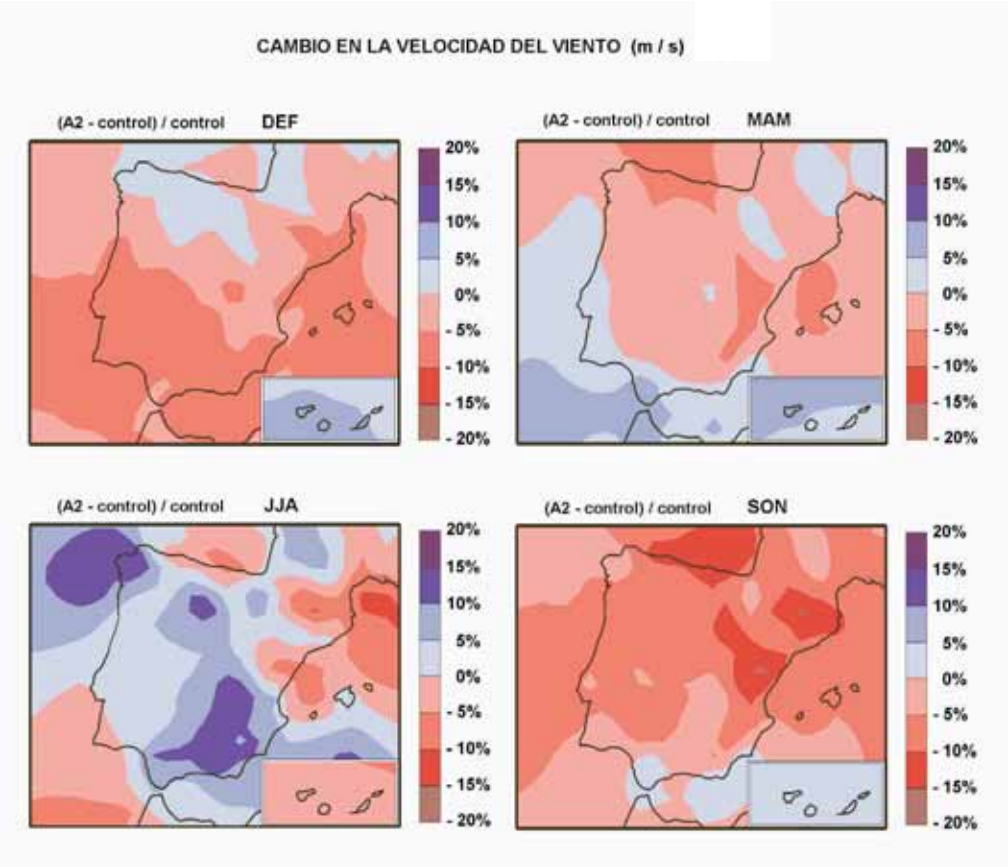


Fig. 1.23. *Proyecciones de cambio porcentual del módulo de la velocidad del viento en superficie para cada estación del año (invierno DEF, primavera MAM, verano JJA y otoño SON), correspondientes al escenario de emisiones SRES-A2. Los valores corresponden a porcentajes de cambio entre la simulación del escenario y la de control con respecto a la de control.*

e) Cambios en la variabilidad y extremos de temperaturas y precipitación proyectados en los escenarios de clima futuro

Un aspecto de las proyecciones de clima futuro tan importante como los cambios en los valores medios de las temperaturas o de cualquier otra variable climática, es la posible alteración en la

variabilidad en relación a la del clima actual. Se entiende por variabilidad, la desviación típica respecto al promedio estadístico temporal. Se pueden considerar diversas escalas temporales de la variabilidad: la intra-estacional, la interanual o la que ocurre en escalas de decenas de años. A continuación se presentan los resultados obtenidos aplicando un análisis sencillo de variabilidad interanual, que consiste en considerar el valor de la razón porcentual siguiente :

$$\frac{\sigma_f - \sigma_a}{\sigma_a} \cdot 100$$

donde σ_f es la desviación típica de las distribuciones de promedios mensuales de temperaturas en el periodo futuro (2071-2100) y σ_a la del periodo simulado de clima actual (1961-1990). Así un valor positivo (o negativo) de dicha razón indicaría el porcentaje en que aumenta (o disminuye) la variabilidad de las temperaturas o precipitaciones mensuales en el clima proyectado con respecto a la de las simuladas en el experimento de control (clima actual). Este cálculo se realiza para cada estación del año. Los resultados obtenidos con este análisis sencillo se muestran en las figuras 1.20 y 1.21 mediante isolineas superpuestas a las distribuciones espaciales de los incrementos de las temperaturas y precipitaciones medias estacionales.

En dicha figura se observa que, por lo general, la variabilidad mensual de las temperaturas medias proyectadas para el último tercio del siglo es algo superior a la del clima actual simulado, con porcentajes positivos en torno al 20% o menores. No obstante se aprecian algunas diferencias entre los dos escenarios de emisiones considerados. Así, en el B2 los porcentajes de cambio en la variabilidad de las temperaturas son menores que en el A2. Por lo que respecta a la distribución por estaciones, los mayores cambios se observan en verano y los menores en otoño. No obstante, la distribución espacial y estacional de los cambios porcentuales en la variabilidad de las temperaturas no es regular sobre la Península. En el escenario A2, se observan incrementos superiores al 20% en la periferia peninsular en verano mientras que en el noreste no hay apenas alteración en el otoño. Sin embargo, en el escenario B2 se observan pocos cambios en la variabilidad en otoño, y los de verano son mucho menores que en el escenario A2, asemejándose más a los observados en invierno y primavera. Por otra parte, en las islas Canarias los porcentajes de cambio en la variabilidad son similares en las cuatro estaciones y los dos escenarios, con valores en torno al 20%, exceptuando en invierno del escenario A2 en que se llegan a valores del 40%. Estos incrementos en la variabilidad de las temperaturas significan que las anomalías térmicas mensuales en el clima proyectado para final del siglo tenderán a ser más intensas que en el clima actual. En la figura 1.24 se ilustra de forma esquemática el cambio cualitativo que experimentaría la distribución de frecuencias de las temperaturas medias en el clima futuro con respecto al actual, según los resultados de cambio climático simulados. A la vista de dicha figura se deduce que en los meses extremadamente cálidos la elevación de las temperaturas en el clima futuro será un cierto porcentaje mayor que los valores del incremento proyectado para las temperaturas medias con respecto al clima actual. Las magnitudes de dicho porcentaje serían los valores indicados.

Por lo que respecta al cambio en la variabilidad interanual de las precipitaciones, aplicando el mismo procedimiento sencillo que para las temperaturas, no se observan cambios apreciables en ninguna estación del año (figura 1.21). Tan solo en la zona noroeste de la Península Ibérica durante el invierno aparecen incrementos en torno al 20%. Estos resultados indicarían que la frecuencia de anomalías en la precipitación mensual o estacional del clima proyectado para el último tercio del siglo 21 sería similar a la del clima actual. No obstante, la aplicación del sencillo método estadístico utilizado resulta cuestionable en el caso de las precipitaciones pues su distribución de frecuencias no se ajusta a una curva de tipo gaussiano, como ocurre con las temperaturas. Para un análisis más correcto de la posible alteración en la variabilidad de las precipitaciones habría que considerar la frecuencia de eventos extremos diarios, incluyendo la intensidad de precipitación (IPCC 2001). Más adelante se presenta un análisis sobre este aspecto.

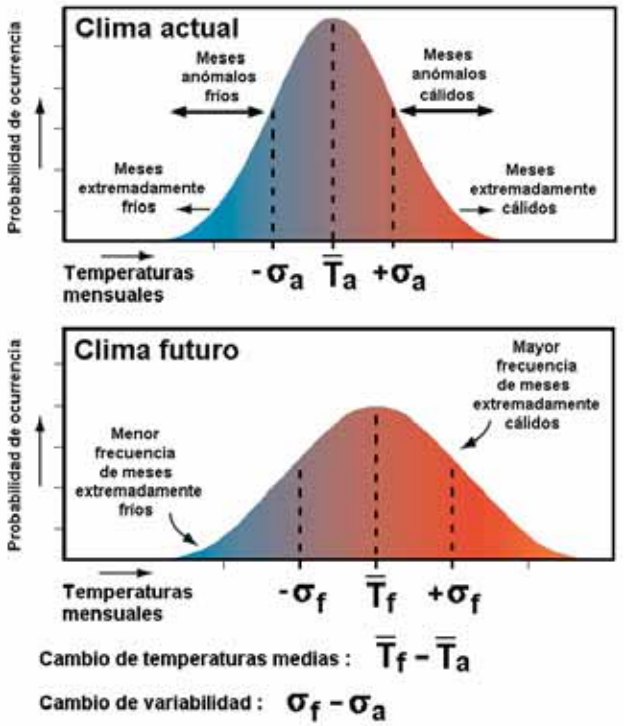


Fig. 1.24. *Ilustración esquemática de las distribuciones de frecuencia de las temperaturas mensuales en clima actual y en el clima proyectado.*

No obstante, ha de advertirse que la variabilidad interanual que es capaz de simular un AOGCM depende en gran medida de la manera en que modela las interacciones-atmósfera-océano. Así, aunque parece que son mayoría los AOGCM que proyectan incrementos de la variabilidad interanual en los escenarios de clima perturbado, hay otros que ofrecen resultados contrarios (pg. 362 del informe IPCC 2001). Es decir, todavía existe una elevada incertidumbre acerca de la posible alteración de la variabilidad de baja frecuencia en escenarios de clima futuro. En consecuencia, como la variabilidad interanual que simula cualquier modelo regional de clima está estrechamente ligada a la información proporcionada por el AOGCM en que se anida, los resultados anteriores deben tomarse con la debida precaución.

Un estudio complementario al de la alteración en la variabilidad de baja frecuencia del clima es el relativo al posible cambio en los llamados extremos climáticos. Generalmente se entiende por extremos climáticos los valores de variables atmosféricas muy alejados de los promedios climatológicos, que se producen en situaciones meteorológicas excepcionales. El interés que presenta este otro tipo de análisis radica en que se considera que los impactos de las alteraciones del clima futuro debidos a cambios en los extremos climáticos serán probablemente más severos que los relacionados con el cambio del clima promedio. Aunque la frecuencia con que ocurren tales eventos es relativamente pequeña, su impacto sobre el medio ambiente o la salud humana suele ser muy notable. Existen muchos posibles criterios o índices para caracterizar los eventos climáticos extremos. Los más utilizados se seleccionan en función de la buena disponibilidad de las variables que se requieren para calcularlos, su facilidad de interpretación y su aplicabilidad a estudios de impacto, y que al mismo tiempo permitan una descripción objetiva y completa de la frecuencia e intensidad de los extremos climáticos.

De la gran variedad de índices de extremos climáticos aplicables a las temperaturas se podrían considerar los basados en percentiles. Así, como señalan Jones *et al.* (1999), para caracterizar la intensidad de condiciones térmicas extremas cálidas o frías cabría usar, respectivamente, el percentil 90 de la distribución de temperaturas máximas diarias (en adelante $T_{max}90$) y el percentil 10 de la distribución de temperaturas mínimas diarias (en adelante $T_{min}10$). A partir de las simulaciones realizadas con el RCM PROMES se han calculado estos índices de intensidad de extremos térmicos diarios para cada uno de los dos periodos de 30 años considerados (1961-1990 y 2071-2100) y cada estación del año. A continuación se presentan las diferencias entre los valores correspondientes al escenario de emisiones A2 y el experimento de control (clima actual). Estas diferencias entre percentiles se expresan en ºC.

Los mayores cambios en $T_{max}90$ se observan en verano y primavera en el interior de la Península, alcanzando valores próximos a 7ºC. En invierno las diferencias son menores, no llegando a 5ºC. Las distribuciones espaciales de los cambios de $T_{max}90$ son muy similares a las de los cambios promedio de las temperaturas máximas diarias (en adelante T_{max}), pero no ocurre lo mismo con los valores. Por lo general, los cambios proyectados para $T_{max}90$ son mayores que para T_{max}, excepto en el interior de la Península en verano, donde los segundos superan en unas décimas de grado a los primeros. Lo más destacable, sin embargo, son los cambios en $T_{max}90$ obtenidos en primavera, sobre todo, y en otoño, ya que son sensiblemente mayores que los cambios en T_{max} (figura 1.25). Así, se aprecia que en primavera los cambios en $T_{max}90$ llegan a 7ºC mientras que los cambios en T_{max} son unos 2ºC menores en la mayor parte de la Peninsula. En otoño, sin embargo, estas diferencias se mantienen en torno a 1ºC o menos, aunque en el norte y noroeste de la Península llegan a 2ºC.

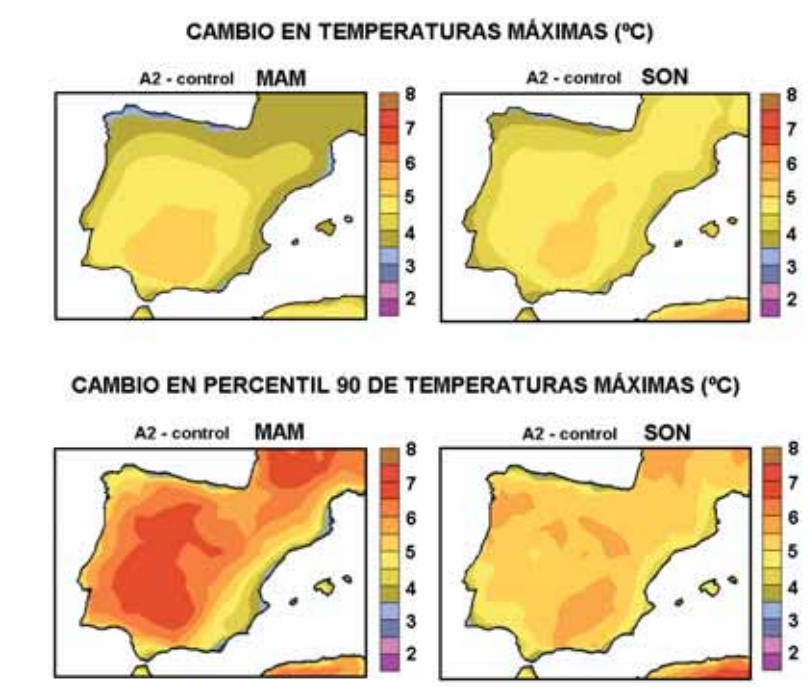


Fig. 1.25. *Diferencia de promedios estacionales de las temperaturas máximas diarias (arriba) y de los percentiles 90 (abajo) entre la simulación con escenario de emisiones A2(2071-2100) y la de control (1961-1990) correspondientes a primavera (MAM) y otoño (SON).*

Para una correcta interpretación climatológica de este distinto comportamiento estacional en los cambios proyectados para T_{max} y $T_{max}90$ habría que realizar quizá un análisis estadístico más detallado de dichos cambios. No obstante, este resultado podría ser un indicio de que en el clima proyectado para 2071-2100 haya una mayor frecuencia de días extremadamente

calurosos al final de la primavera y principios del otoño, respecto al clima actual. Hay que tener en cuenta que tanto T_{max} como $T_{max}90$ para cada estación se han calculado considerando los días incluidos en intervalos de tres meses: diciembre - febrero para el invierno, marzo - mayo para la primavera, junio - agosto para el verano y septiembre - noviembre para el otoño. Por tanto, el mayor incremento de $T_{max}90$ respecto al de T_{max} en primavera podría estar en concordancia con que el calentamiento proyectado para el mes de mayo es superior al correspondiente a abril y se asemeja más al de los meses de verano. Una explicación similar podría aplicarse a lo proyectado para el otoño, ya que también el incremento de T_{max} en septiembre resulta superior al de los otros dos meses del otoño. En los resultados de proyecciones de extremos climáticos al final del presente siglo para el escenario de emisiones SRES-A2 obtenidos por Sánchez *et al.* (2004) se aprecia un incremento en la frecuencia de olas de calor en primavera y otoño, que parece estar en consonancia con lo señalado anteriormente. Schar *et al.* (2004) y Beniston (2004) coinciden en señalar un incremento de las olas de calor estivales en Europa en escenarios de clima futuro.

Por lo que respecta a los cambios proyectados en $T_{min}10$, se observa un comportamiento muy similar al obtenido para T_{min}. Pero de nuevo se aprecia que los incrementos de $T_{min}10$ son algo menores que los de T_{min} en primavera y otoño en la mayor parte de la Península Ibérica. Esto mismo ocurre en los meses de verano en la parte norte de la Península, pero no en el resto del territorio. No obstante, las diferencias entre los incrementos de $T_{min}10$ y de T_{min} no llegan en general a superar el valor de 1 grado. Es decir, son menores que los comentados para el caso de $T_{max}90$ y T_{max}. Repitiendo el razonamiento anterior, podría especularse con que el hecho de que los cambios proyectados para $T_{min}10$ sean menores que los de T_{min} podría ser un indicio de que en el clima del último tercio del siglo habría una menor frecuencia de días excesivamente fríos. No obstante, los resultados de Sánchez *et al.* (2004) apuntan a una mayor frecuencia de olas de frío, pero posiblemente eso se deba a los criterios que esos autores consideran para definir la ocurrencia de tales eventos extremos.

A continuación se incluye un breve análisis de los cambios proyectados para extremos de precipitación diaria en el escenario de emisiones SRES-A2 con respecto al clima actual simulado. Para caracterizar la intensidad y frecuencia de estos eventos extremos pueden considerarse diversos criterios (Jones *et al.* 1999). En este caso se ha seleccionado uno de ellos: Número de días con precipitación acumulada mayor de 1 mm para cada estación del año, promediados a lo largo de un periodo de 30 años. En adelante este índice se denota por NPr1.

Para cada uno de los dos periodos de 30 años considerados (1961-1990 control y 2071-2100 escenario) se han calculado los promedios estacionales de NPr1 y las diferencias entre los valores correspondientes al escenario SRES-A2 y al experimento de control (clima actual). Las diferencias se han calculado en porcentaje respecto a los valores simulados en el experimento de control (clima actual). Al expresar las diferencias en porcentaje, los resultados numéricos así obtenidos deben coincidir con los que se derivarían considerando cualquier percentil de las distribuciones de precipitación diaria. Así, por ejemplo, como el número de días con precipitación correspondiente al percentil 90 (denotado por NPr90) es por definición el 10% del total de días con precipitación (NPr1), entonces el cambio porcentual de NPr90 entre los experimentos de escenario y control sería igual al cambio porcentual de NPr1:

$$\frac{N\,Pr\,90\,(A2) - N\,Pr\,90\,(control)}{N\,Pr\,90\,(control)} = \frac{0.1 \cdot N\,Pr\,1\,(A2) - 0.1 \cdot N\,Pr\,1\,(control)}{0.1 \cdot N\,Pr\,1\,(control)} = \frac{N\,Pr\,1\,(A2) - N\,Pr\,1\,(control)}{N\,Pr\,1\,(control)}$$

En la figura 1.26 se muestran las distribuciones de los cambios de NPr1 proyectados en la Península Ibérica para cada estación del año. En ella se puede apreciar que en primavera y verano los cambios de NPr1 tienen signo negativo, es decir menor número de días de lluvia, en toda la Península. En verano no se muestran valores de diferencias porcentuales de NPr1 en la

franja más meridional de la Península porque en el experimento de control (1961-1990) NPr1 es muy pequeño (< 10 días), lo que da lugar a porcentajes de cambio poco realistas.

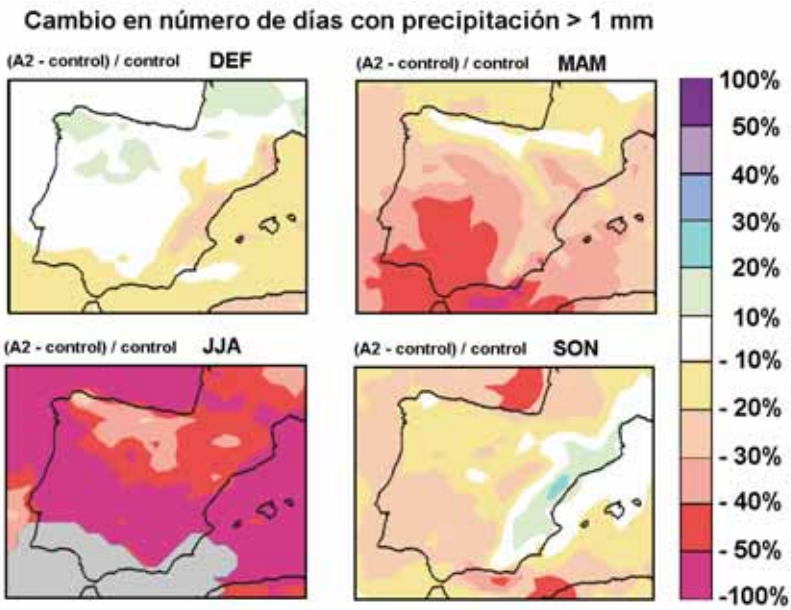


Fig. 1.26. *Cambios en el número de días con precipitación superior a 1 mm entre la simulación de escenario de emisiones A2 (2071-2100) y de control (1961-1990), expresados en porcentajes respecto al clima actual simulado, correspondientes a cada estación del año (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño). El color gris en la figura de verano indica que en esas regiones la precipitación es demasiado escasa en el experimento de control.*

Los cambios negativos en NPr1 podrían relacionarse con una mayor persistencia y duración de los periodos de días sin lluvia en el escenario de clima perturbado que en el clima actual. No obstante, en invierno se aprecia un aumento superior al 10% de NPr1 en la zona noroeste de la Península, y lo mismo se observa en otoño en el noreste y Levante. Las regiones y época del año en que se simulan estos cambios positivos de NPr1 coinciden esencialmente con las de aumento en las precipitaciones acumuladas que se muestran en la figura 1.21. En Sánchez *et al.* (2004) se presentan resultados de cambio de extremos de precipitación simulados para el escenario de clima perturbado considerando un índice de intensidad de precipitaciones extremas (percentil 90) abarcando toda la región del Mediterráneo. Estos autores muestran que los cambios en la torrencialidad de la precipitación en la Península presentan una elevada variabilidad espacial en todas las estaciones del año. Esto podría estar relacionado con que las precipitaciones extremas simuladas poseen un elevado grado de incertidumbre. Asimismo, Christensen y Christensen (2003) presentan resultados de simulaciones regionales de clima para final del siglo 21, donde se aprecia un incremento en la frecuencia de lluvias torrenciales durante los meses de verano en Europa, aunque este resultado presenta un alto grado de incertidumbre en la Península Ibérica. Un posible procedimiento para reducir estas incertidumbres sería efectuar un análisis del conjunto de simulaciones realizadas por los modelos regionales de clima utilizados en el proyecto europeo PRUDENCE.

1.3.6. Conclusiones

Para analizar las perturbaciones en los climas de España que podrían derivarse del cambio climático global por acumulación de GEIs a lo largo del siglo 21 se han utilizado los resultados de un conjunto de modelos de simulación del clima. En este análisis se han considerado seis modelos globales (AOGCM) y un modelo regional. Los resultados que se obtienen con ellos no son predicciones climáticas, sino proyecciones de cómo podría alterarse el clima futuro, tomando como referencia las características actuales del clima (periodo 1961-1990). Asimismo,

se han tenido en cuenta dos de los posibles escenarios de emisiones globales de GEIs y aerosoles elaborados por el Grupo Intergubernamental de expertos para el estudio del Cambio Climático (IPCC), basados en criterios demográficos, sociales y económicos. Tales escenarios, conocidos por las siglas SRES-A2 y SRES-B2, son los más utilizados hasta ahora para realizar proyecciones de cambio climático.

En los resultados de las simulaciones climáticas realizadas por los seis AOGCM considerados existen discordancias sobre la magnitud de los cambios proyectados en las temperaturas y en las cantidades totales de precipitación a lo largo del siglo 21 en España, aunque se observan también notables coincidencias cualitativas. Los resultados más significativos obtenidos se pueden resumir en los siguientes puntos:

a) Los modelos coinciden en que la tendencia creciente de las temperaturas medias presenta un comportamiento regular a lo largo del siglo, aunque dicho calentamiento resulta más acentuado en el escenario de emisiones SRES-A2 que en el SRES-B2.
b) Hay acuerdo entre los modelos en que el incremento térmico proyectado a lo largo del siglo es más intenso en verano que en invierno, alcanzando valores intermedios en las otras dos estaciones del año.
c) Tomando el promedio de conjunto de los seis AOGCM, en el escenario de emisiones SRES-A2 la tendencia media de la temperatura a lo largo del siglo varía entre aproximadamente 1.2ºC cada 30 años en invierno y 2ºC cada 30 años en verano sobre la Península Ibérica.
d) En el escenario de emisiones SRES-B2 estos incrementos promedio de temperatura alcanzan un valor aproximado de 1.1ºC cada 30 años en invierno y 1.8ºC en verano.
e) Los seis AOGCM coinciden en proyectar una reducción significativa de las precipitaciones totales anuales sobre la Península Ibérica, que resulta algo más intensa en el escenario A2 que en el B2.
f) Dicha reducción tiende a ser mayor en la primavera y menor en invierno.
g) Las tendencias en el cambio de precipitaciones estacionales no son por lo general uniformes a lo largo del siglo, aunque las discrepancias entre modelos son notables. Hay modelos que proyectan disminuciones de precipitación más acentuadas en algunas estaciones del año hasta el tercio central del siglo 21 y otros que simulan disminuciones más uniformemente progresivas a lo largo del siglo.

Las discrepancias observadas en los cambios climáticos proyectados para la región de la Península Ibérica por los diversos AOGCM se consideran fundamentalmente relacionadas con las diversas resoluciones espaciales que cada uno utiliza (tamaños de celdillas entre 600 y 250 km) y con el diferente grado de complejidad de los esquemas de parametrización de procesos atmosféricos y oceánicos que emplean. Por esta razón, se ha realizado el análisis de los cambios proyectados para clima futuro en la Península Ibérica considerando los resultados obtenidos por uno de los seis AOGCM, que utiliza una resolución relativamente alta (más detalle espacial) y que emplea un conjunto más completo y actualizado de parametrizaciones físicas. Este es el caso del modelo HadCM3 desarrollado en el Hadley Centre for Climate Research del Reino Unido.

Los resultados de las proyecciones de cambio en la temperatura media y la precipitación obtenidos con el modelo HadCM3 permiten una cierta discriminación espacial sobre la Península Ibérica. De forma esquemática, las conclusiones más relevantes de las proyecciones de cambio climático en España obtenidas con el mencionado modelo global son:

a) Los menores incrementos de temperatura se obtienen en el noroeste peninsular y los mayores en la región meridional.
b) La mayor tendencia creciente de las temperaturas a lo largo del siglo corresponde a los meses de verano y la menor al invierno, siendo ambas más acentuadas en el escenario de emisiones A2 que en el B2.

c) En las proyecciones de cambio en la precipitación, se obtienen reducciones generalizadas en los valores anuales, que son mayores en el escenario A2 que en el B2, pero su distribución espacial y estacional no es uniforme sobre España.
d) Para el último tercio del siglo 21 se proyecta un incremento en las precipitaciones invernales en la mayor parte del territorio y en otoño un ligero aumento en el noreste peninsular, mientras que en primavera y verano es cuando se obtienen las mayores reducciones con un carácter generalizado.
e) Los valores absolutos del cambio en las precipitaciones estacionales alcanzan valores menores en los periodos intermedios que en el último tercio del siglo, aunque conservando por lo general el signo de los cambios proyectados para final de siglo.
f) Las tendencias decrecientes en la precipitación son más acentuadas en el escenario de emisiones A2, mientras que las crecientes son algo mayores en el escenario B2.

Con objeto de obtener resultados de proyecciones de cambio climático con mayor resolución espacial, se ha utilizado el modelo regional de clima PROMES anidado en el modelo global HadCM3. El tamaño de celdilla del modelo regional es de 50 km, lo que permite reproducir más adecuadamente los rasgos orográficos de la Península y considerar también a las islas mayores de Baleares y Canarias. De hecho, se ha comprobado en primer lugar que el modelo PROMES reproduce más satisfactoriamente que el modelo global las distribuciones climatológicas de temperatura y precipitación sobre España. Esto permite suponer que las proyecciones de clima futuro obtenidas con el modelo PROMES resultan más apropiadas para analizar impactos a escala regional, que las derivadas directamente del modelo global.

Las proyecciones de cambio climático realizadas con el modelo regional corresponden solamente al último tercio del siglo (2071-2100), y se han deducido tomando como referencia el clima simulado por dicho modelo en el periodo 1961-1990 (experimento de control). Asimismo, se han considerado los dos escenarios de emisiones de GEIs (A2 y B2). Los resultados que se presentan corresponden a la temperatura media (en ºC), la precipitación (en mm), la cantidad de agua evapotranspirada (en kg m^{-2}) y la velocidad del viento (en m s^{-1}). A continuación se resumen de forma esquemática las proyecciones de cambio más relevantes para cada variable, cada estación del año y cada escenario de emisiones, discriminando entre las diversas regiones de España en la medida que lo permite la resolución del modelo.

a) Cambios en las temperaturas medias:

Estación	Escenario	Cambios proyectados para el periodo 2071-2100 respecto a 1961-1990
Invierno	**A2**	Aumentos de 2 a 3ºC en el oeste y norte de la Península e islas Canarias, y de 3 a 4ºC en el resto del territorio
	B2	Distribución del calentamiento similar a la del escenario A2, pero 1ºC menos intenso
Primavera	**A2**	Aumentos de 4 a 5ºC en el suroeste de la Península, de 2 a 3ºC en la franja cantábrica, norte de Galicia y Canarias, y de 3 a 4ºC en el resto del territorio
	B2	Aumentos de 1 a 2ºC en Canarias, franja cantábrica y norte de Galicia, y de 2 a 3ºC en el resto del territorio
Verano	**A2**	Aumentos de 5 a 7ºC en el interior de la Península, de 4 a 5ºC en la periferia peninsular y Baleares, y de 2 a 3ºC en Canarias
	B2	Distribución del calentamiento similar a la del escenario A2, pero generalmente 1ºC menos intenso
Otoño	**A2**	Aumentos de 2 a 3ºC en Canarias, de 3 a 4ºC en el tercio norte peninsular y de 4 a 5ºC en el resto del territorio
	B2	Distribución del calentamiento similar a la del escenario A2, pero generalmente 1ºC menos intenso

b) Cambios en las precipitaciones acumuladas:

Estación	Escenario	Cambios proyectados para el periodo 2071-2100 respecto a 1961-1990
Invierno	**A2**	Aumentos superiores a 10 mm en el cuadrante noroeste de la Península, disminuciones superiores a 10 mm en el tercio meridional y regiones mediterráneas peninsulares, y sin cambios apreciables (±10 mm) en el resto del territorio
	B2	Aumentos superiores a 10 mm en el norte de Galicia y sin cambios apreciables (±10 mm) en el resto del territorio
Primavera	**A2**	Disminuciones superiores a 20 mm en casi toda la Península y sin cambios apreciables (±10 mm) en Baleares y Canarias
	B2	Disminuciones superiores a 10 mm en casi toda la Península y sin cambios apreciables (±10 mm) en Baleares y Canarias
Verano	**A2**	Disminuciones superiores a 40 mm en el norte de Galicia, franja cantábrica Pirineos y noreste de la Península, disminuciones entre 10 y 40 mm en el resto del territorio, excepto en Canarias sin cambios apreciables (±10 mm)
	B2	Distribución de los cambios de precipitación estacional similar a la del escenario A2
Otoño	**A2**	Aumentos superiores a 10 mm en el noreste de la Península, disminuciones superiores a 20 mm en la mitad suroccidental, y sin cambios apreciables (±10 mm) en el resto del territorio
	B2	Distribución de los cambios similar a la del escenario A2, aunque algo menos intensos en la mitad suroccidental de la Península

c) Cambios en la evapotranspiración (en %):

Estación	Escenario	Cambios proyectados para el periodo 2071-2100 respecto a 1961-1990
Invierno	**A2**	Aumentos inferiores al 20% en casi todo el territorio
	B2	Aumentos inferiores al 20% en casi todo el territorio
Primavera	**A2**	Aumentos superiores al 20% en la mayor parte del cuadrante noroeste de la Península y los Pirineos, aumentos inferiores al 20% en el resto de la mitad norte, y disminuciones menores al 20% en el resto del territorio
	B2	Aumentos superiores al 20% en Galicia, e inferiores al 20% en el casi todo el resto del territorio
Verano	**A2**	Disminuciones superiores al 20% en el tercio sur de la Península, inferiores al 20% en el centro y Baleares, y aumentos inferiores al 20% en el tercio norte peninsular
	B2	Distribución de los cambios similar a la del escenario A2, pero menos intensos en el tercio meridional de la Península
Otoño	**A2**	Aumentos inferiores al 20% en el tercio norte de la Península y norte de Levante, disminuciones superiores al 20% en el tercio sur de la Península y disminuciones menores al 20% en el resto del territorio
	B2	Distribución de los cambios de evapotranspiración estacional similar a la del escenario A2

d) Cambios en la intensidad del viento (en %):

Estación	Escenario	Cambios proyectados para el periodo 2071-2100 respecto a 1961-1990
Invierno	**A2**	Disminuciones superiores al 5% en la mitad sur de la Península y Baleares, aumentos superiores al 5% en Canarias y sin cambios apreciables (± 5%) en el resto del territorio
	B2	Aumentos superiores al 5% en Canarias y sin cambios apreciables (± 5%) en la mayor parte del resto del territorio
Primavera	**A2**	Aumentos superiores al 5% en Canarias y el estrecho de Gibraltar, disminuciones superiores al 5% en la franja cantábrica, interior de levante y Baleares, y sin cambios apreciables (±5%) en el resto del territorio
	B2	Sin cambios apreciables (± 5%) en todo el territorio
Verano	**A2**	Aumentos superiores al 5% en el centro y sureste de la Península, y sin cambios apreciables (± 5%) en la mayor parte del resto del territorio
	B2	Disminuciones superiores al 5% en la mayor parte de la Península y Baleares, y sin cambios apreciables (± 5%) en el tercio sur peninsular y Canarias
Otoño	**A2**	Disminuciones superiores al 10% en la franja cantábrica, noreste y levante de la Península, disminuciones de entre 5 y 10% en el resto del territorio, excepto en el tercio meridional de la Península y Canarias donde no hay cambios apreciables (± 5%)
	B2	Disminuciones superiores al 5% en el cuadrante noreste de la Península, franja cantábrica y Baleares, y sin cambios apreciables (± 5%) en el resto del territorio

Complementando el análisis de los cambios proyectados para los valores medios de variables climáticas, se incluye también una primera aproximación sobre la posible alteración en la variabilidad temporal de sus valores mensuales en el último tercio del siglo (2071-2100) con respecto a la correspondiente al periodo 1961-1990. Los resultados más relevantes de dicho análisis se pueden resumir en los siguientes puntos:

a) Se proyecta un aumento en la amplitud y frecuencia de las anomalías térmicas mensuales en el clima futuro en relación con el clima presente.
b) Aunque este aumento no se observa de forma regular en todo el territorio, en todas las estaciones del año y los dos escenarios de emisiones, los incrementos en la amplitud se mantienen en torno al 20%. Eso significa que en los meses anómalamente cálidos del clima futuro los incrementos térmicos serían en torno a un 20% mayores aún que los valores proyectados para el calentamiento medio.
c) Los porcentajes del cambio en la variabilidad de las temperaturas mensuales resultan algo menores en el escenario B2 que en A2, al igual que ocurre con las magnitudes del calentamiento medio.
d) No se aprecian alteraciones significativas en la frecuencia de anomalías mensuales de precipitación en los escenarios de clima futuro considerados, aunque esta conclusión resulta cuestionable pues el método estadístico empleado no es el más apropiado para este tipo de análisis.

Finalmente, se ha incluido un análisis de la posible alteración en la ocurrencia de eventos climáticos extremos en los escenarios de clima futuro con respecto al clima actual. Pare ello, se han considerado los valores de percentiles extremos de las distribuciones diarias de temperatura máxima y mínima, así como la frecuencia de días con precipitación superior a 1 mm. En este caso sólo se han considerado los resultados del escenario de emisiones A2. Las conclusiones más relevantes se resumen en:

a) La frecuencia de días con temperaturas máximas extremas en la Península Ibérica tiende a incrementarse muy significativamente en primavera y en menor medida también en otoño, mientras que en Baleares y Canarias no se observan cambios apreciables, al igual que ocurre en las otras dos estaciones del año en todo el territorio.
b) La frecuencia de días con temperaturas mínimas extremas en la Península tiende a disminuir.
c) La persistencia y duración de periodos de días sin precipitación tienden a disminuir por lo general en las mismas zonas y estaciones donde se proyectan cambios negativos en las precipitaciones estacionales, y a aumentar en los casos en que se simulan incrementos de precipitación en el clima futuro respecto al actual. Aunque este análisis apuntaría a que no se alteraría significativamente el grado de torrencialidad de las precipitaciones en el clima proyectado, este resultado presenta un elevado nivel de incertidumbre.

A modo de conclusión final, en el cuadro siguiente se resumen de forma esquemática las más relevantes proyecciones de cambio climático en España, ordenadas conforme al grado de certidumbre que ofrecen los resultados de las simulaciones realizadas por el conjunto de modelos considerados. Para ello se ha considerado el grado de consenso entre los diversos modelos climáticos disponibles, de manera que la certeza más elevada se asigna a aquellos cambios en los que todos los modelos coinciden, disminuyendo el grado de certidumbre a medida que lo haga el número de modelos coincidentes. La certeza más baja corresponde a cuando solo un grupo minoritario de modelos ofrecen resultados similares.

Certidumbre	Cambios climáticos más relevantes proyectados en España
*****	Tendencia progresiva al incremento de las temperaturas medias a lo largo del siglo
*****	La tendencia al calentamiento es más acusada en el escenario de emisiones más aceleradas (SRES-A2)
*****	Los aumentos de temperatura media son significativamente mayores en los meses de verano que en los de invierno, con valores intermedios en los demás.
****	El calentamiento en verano es superior en las zonas del interior que en las cercanas a las costas o en las islas
****	Tendencia generalizada a una menor precipitación acumulada anual en ambos escenarios de emisiones a lo largo del siglo
***	Mayor amplitud y frecuencia de anomalías térmicas mensuales en relación al clima actual
***	Más frecuencia de días con temperaturas extremas en la Península, especialmente en verano
***	La mayor reducción de precipitación en la Península se proyecta en los meses de primavera en ambos escenarios de emisiones
**	Aumento de precipitación en el oeste de la Península en invierno y en el noreste en otoño.
**	Los cambios de precipitación tienden a ser más significativos en el escenario de emisiones más aceleradas (SRES-A2)

(***** certeza muy alta, **** certeza alta, *** certeza media, ** certeza baja)

1.4. BIBLIOGRAFÍA

Abaurrea J., Asin J. y Centelles A. 2002. Caracterización espacio-temporal de la evolución de la precipitación anual en la cuenca del Ebro. En: Guijarro, Grimalt Laita y Alonso (eds.). El Agua y el Clima Asociación Española de Climatología Serie A nº 3. Pgs. 113-124.

Abaurrea J., Asín J., Erdozain O. y Fernández E. 2001. Climate Variability Analysis of Temperature Series in The Medium Ebro River Basin. En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change. Berlín Springer. Pgs. 109-118.

Allen J.R., Huntley M. B. y Watts W.A. 1996. The vegetation and climate of northwest Iberia over the last 14000 yr. Journal of Quaternary Science 112: 125-147.

Araus J.L., Febrero A., Buxo R., Camalich M.D., Martin D., Molina F., Rodriguez-Ariza M.O. y Romagosa I. 1997. Changes in carbon isotope discrimination in grain cereals from different regions of the western Mediterranean Basin during the past seven millennia. Palaeoenvironmental evidence of a differential change in aridity during the late Holocene. Global Change Biology 32: 107-118.

Arribas A., Gallardo C., Gaertner M.A. y Castro M. 2003. Sensitivity of Iberian Peninsula climate to land degradation. Climate Dynamics 20: 477-489.

Barriendos M. y Llasat M. 2003. The case of the "Maldá" anomaly in the western mediterranean basin AD 1760-1800. Climatic Change 61: 191-216.

Barriendos M. y J. Martín-Vide 1998. Secular Climatic Oscillations as Indicated by Catastrophic Floods in the Spanish Mediterranean Coastal Area 14th-19th Centuries. Climatic Change 38: 473-491.

Beniston M. 2004. The 2003 Heat Wave in Europe. A shape of things to come? Geophysical Research Letters 31: L02022.

Brunet M., Aguilar E., Saladíe O., Sigró J. y López D. 2001a. The Spanish Temperature Series. Time variations and trends over the last 150 years. Geophysical Research Abstracts 3: GRA3 5333 76.

Brunet M., Aguilar E., Saladíe O., Sigró J. y López D. 2001b. the Variations and Trends of the Surface Air Temperature in the Northeastern of Spain from Middle Nineteenth Century Onwards. En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change Springer. Berlín, DE. Pgs. 81-93

Brunet M., Aguilar E., Saladíe O., Sigró J. y López D. 2001c. A Differential Response of Northeastern Spain to Asymmetric Trends in Diurnal Warming Detected on a Global Scale. En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change Springer. Berlín, DE. Pgs. 95-107.

Burgueño A., Serra C. y Lana X. 2004. Monthly and annual statistical distributions of daily rainfall at the Fabra Observatory Barcelona NE Spain for the years 1917-1999. Theoretical and Applied Climatology 77: 57-75.

Burjachs F. y Julià R. 1994. Abrupt Climatic Changes During the Last Glaciation Based on Pollen Analysis of the Abric-Romani Catalonia Spain. Quaternary Research 423: 308-315.

Cacho I., Grimalt J.O., Pelejero C., Canals M., Sierro F.J., Flores J.A. y Shackleton N. 1999. Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea paleotemperatures. Paleoceanography 14: 698-705.

Camuffo D., Secco C., Brinblecombe P. y Martín-Vide J. 2000. Sea Storms in the Adriatic Sea and the Western Mediterranean during the Last Millennium. Climatic Change 46: 209-223.

Cañada R., Galán E., Fernández F. y Cervera B. 2001. Análisis de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas medias anuales en la Meseta sur española durante el siglo XX. En: Pérez-Cueva, López Baeza y Tamayo (eds.). El Tiempo del Clima. Buñol Garmas Asociación Española de Climatología Serie A nº 2. Pgs. 53-63.

Capel Molina J.J. 2000. El clima de la península Ibérica Barcelona. Ariel. 281 pgs.

Carrión J.S. 2002. Patterns and processes of Late Quaternary environmental change in a montane region of southwestern Europe. Quaternary Science Reviews 21(18-19): 2047-2066.

Castro M., Fernández C., Gaertner M.A. y Gallardo C. 1995. Relevance of regional models for analyzing future climate change in the Iberian Peninsula. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (eds.) Global Change and Mediterranean-type Ecosystems. Ecological Studies 117. Springer. Pgs. 1-34.

Castro-Díez Y., Pozo-Vázquez D., Esteban-Parra M.J. y Rodrigo F.S. 2002. NAO and the winter temperature variability in southern Europe. Geophysical Research Letters 29: 1-4.

Chazarra A. y Almarza C. 2002. Reconstrucción desde 1864 de la serie de precipitación útil de las cuencas del Sureste y Levante. En: Guijarro, Grimalt, Laita y Alonso (eds.). El Agua y el Clima. Asociación Española de Climatología Serie A nº 3. Pgs. 159-168.

Christensen J.H., Carter T. y Giorgi F. 2002. PRUDENCE Employs New Methods to Assess European Climate Change EOS. Vol. 82. 147 pgs.

Christensen J.H. y Christensen O.B. 2003. Severe Summer Flooding in Europe. Nature 421: 805-806.

Cramer W. y Field C.B. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity NPP. introduction. Global Change Biology 5: III-IV. Suppl. 1

Creus J., Fernández A. y Manrique E. 1997. Dendrocronología y clima del último milenio en España. Aspectos metodológicos y avance de resultados. En: Ibáñez, Valero Garcés y Machado (eds.) El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación. Geoforma. Logroño. Pgs. 311-331.

Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C. y Guiot J. 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. Quaternary Science Reviews 22: 1701-1716.

Decoudre N.I., Laval K. y Perrier A. 1993. SECHIBA a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the LMD atmospheric general circulation model. Journal of Climate 6: 248-273.

De Luis M., Raventós J., González-Hidalgo J.C., Sánchez J.R. y Cortina J. 2000. Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia east Spain. International Journal of Climatology 20: 1451-1469.

Desprat S., Goni M.F.S. y Loutre M.F. 2003. Revealing climatic variability of the last three millennia in northwestern Iberia using pollen influx data. Earth and Planetary Science Letters 2131-2: 63-78.

Dickinson R.E., Errico R.M., Giorgi F. y Bates B.T. 1989 A regional climate model for western United States. Climatic Change 15: 383-422.

Dünkeloh A. y Jacobeit J. 2003. Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948-98. International Journal of Climatology 23: 1843-1866.

Esteban-Parra M.J., Rodrigo F.S. y Castro-Díez Y. 1995. Temperature Trends and Change Points in the Northern Spanish Plateau During the Last 100 Years. International Journal of Climatology 15: 1031-1042.

Esteban-Parra M.J., Rodrigo F.S. y Castro-Díez Y. 1998. Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. International Journal of Climatology 18: 1557-1574.

Fernández F. y Rasilla D. 2001. Secular Variations of the Synoptic Circulation over the Iberian Peninsula. En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change Springer. Berlín, DE. Pgs. 229-238.

Font Tullot I. 2000. Climatología de España y Portugal Salamanca Universidad de Salamanca.

Galán E., Cañada R., Fernández F. y Cervera B. 2001. Annual Temperature Evolution in the Southern Plateau of Spain from the Construction of Regional Climatic Time Series. En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change Springer. Berlín, DE. Pgs. 119-131.

Galán E., Cañada R., Rasilla D., Fernández F. y Cervera B. 1999. Evolución de las precipitaciones anuales en la Meseta meridional durante el siglo XX. En: Raso y Martín-Vide (eds.). La Climatología española en los albores del siglo XXI. Vilassar Oikos-tau Asociación Española de Climatología Serie A nº 1. Pgs. 169-180.

Gallardo C., Arribas A., Prego J.A., Gaertner M.A. y Castro M. 2001. Multi-year simulations with a high resolution regional climate model over the Iberian Peninsula. Current climate and $2xCO_2$ scenario. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 127: 1659-1682.

Gámiz-Fortis S.R., Pozo-Vázquez D., Esteban-Parra M.J. y Castro-Díez Y. 2002. Spectral characteristics and predictability of the NAO assessed through Singular Spectral Analysis. Journal of Geophysical Research 107: 1-15.

García-Herrera R., Gallego D., Hernández E., Gimeno L., Ribera P. y Calvo N. 2003. Precipitation trends in the Canary Islands. International Journal of Climatology 23: 235-241.

García, J.A., Serrano, A. y De la Cruz Gallego, M. 2002. A spectral analysis of Iberian Peninsula monthly rainfall. Theoretical and Applied Climatology 71: 77-95.

Goodess C.M. y Jones P.D. 2002. Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall. International Journal of Climatology 22: 1593-1615.

González-Hidalgo J.C., De Luis M., Raventós J. y Sánchez J.R. 2001. Spatial distribution of seasonal rainfall trends in a western Mediterranean area. International Journal of Climatology 21: 843-860.

González-Hidalgo J.C., De Luis M., Raventós J. y Sánchez J.R. 2003. Daily rainfall trend in the Valencia Region of Spain. Theoretical and Applied Climatology 75: 117-130.

Gordon C., Cooper C., Senior C.A., Banks H.T., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B. y Wood R.A. 2000 The simulation of SST sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. Climate Dynamics 16: 147-168.

Guijarro J.A. 2002. Tendencias de la precipitación en el litoral mediterráneo español. En: Guijarro, Grimalt, Laita y Alonso (eds.). El Agua y el Clima. Asociación Española de Climatología Serie A nº 3. Pgs. 237-246.

Horcas R., Rasilla D y Fernández-García F. 2001. Temperature Variations and Trends in the Segura River Basin. An Exploratory Analysis. En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change Springer. Berlín, DE. Pgs. 133-142.

Huth R. 2004. Sensitivity of Local Daily Temperature Change Estimates to the Selection of Downscaling Models and Predictors. Journal of Climate 17: 640-652.

IPCC. 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J. y Xiaosu D. (eds.). Cambridge University Press. 994 pgs.

Jalut G., Esteban A., Bonnet L., Gauquelin T. y Fontugne M. 2000. Holocene climatic changes in the Western Mediterranean from south-east France to south-east Spain. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 1603: 255-290.

Jalut G., Esteban A., Riera S., Fontugne M., Mook R., Bonnet L. y Gauquelin T. 1997. Holocene climatic changes in the western Mediterranean. installation of the Mediterranean climate. Comptes Rendus de l´Academie des Sciences Serie II Fascicule A- Sciences de la Terre et des Planetes 325: 327-334.

Jones P.D., Horton E.B., Folland C.K., Hulme M., Parker D.E. y Basnett T.A. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes. Climatic Change 42: 131-149.

Klein Tank A., Wijngaard J. y Van Engelen A. 2002. Climate of Europe. Assessment of observed daily temperature and precipitation extremes. De Bilt ECA y KNMI. 36 pgs.

Labajo J.L. y Piorno A. 1998. Análisis del comportamiento temporal de la temperatura en Castilla y León. primeros resultados. En: Fernández Galán y Cañada (coords.). Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas. Parteluz, Madrid. Pgs. 577-591.

Labajo J.L. y Piorno A. 2001. Regionalization of precipitation in Castilla and Leon Spain. Analysis of its temporal behaviour En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change Springer. Berlín, DE. Pgs. 163-173.

Labajo J.L., Piorno A. e Izquierdo M.J. 1998. Temporal Behaviour of the Annual Mean pressure on the Northern Spanish Plateau between 1945 and 1994. International Journal of Climatology 18: 637-648.

Laita M. y Grimalt M. 1997. Vorticity and pressure anomalies in the Western Mediterranean during El Niño/Southern oscillation extremes. International Journal of Climatology 17: 475-482.

Lambert S.J. y Boer G.J. 2001 CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. Climate Dynamics 17: 83-106.

Leira M. y Santos L. 2002. An early Holocene short climatic event in the northwest Iberian Peninsula inferred from pollen and diatoms. Quaternary International 93(4): 3-12.

Linés A. 1970. The Climate of the Iberian Peninsula. En: Landsberg H.E. (ed.). World Survey of Climatology Amsterdam Elsevier.

López J.A. 1999. Estudio de la distribución de precipitación en el año hidrológico a partir de un índice de concentración y el desfase. En: Raso y Martín-Vide (eds.). La Climatología española en los albores del siglo XXI. Vilassar Oikos-tau Asociación Española de Climatología Serie A nº 1. Pgs. 281-287.

López J.A. 2001. Trends in Daily Precipitation Regimes and their Extremes at Three Observatories in the Iberian Peninsula En: Brunet y López (eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change Springer. Berlín, DE. Pgs. 203-213.

Luque J.A. y Julià R. 2002. Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria Northwest of Iberian Peninsula. Sedimentary Geology 1481: 343-355.

Mariotti A., Zeng N. y Lau K. 2002. Euro-Mediterranean rainfall and ENSO. a seasonally varying relationship. Geophysical Research Letters 29: 1621.

Martín M.L., Luna M.Y., Morata A. y Valero F. 2004. North Atlantic teleconnection patterns of low-frequency variability and their links with springtime precipitation in the western Mediterranean. International Journal of Climatology 24: 213-230.

Martín-Vide J. 1996. Decálogo de la pluviometría española. En: Marzol, Dorta y Valladares (Eds.). Universidad de la Laguna, A.G.E. Clima y agua. La gestión de un recurso climático. Pgs. 15-24.

Martín-Vide J. 2004. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in Peninsular Spain. International Journal of Climatology 24: 959-971.

Martín-Vide J. y Barriendos M. 1995. The use of rogation ceremony records in climatic reconstruction. a case study from Catalonia Spain. Climatic Change 30: 201-221.

Martín-Vide J. y Gómez L. 1999. Regionalization of Peninsular Spain based on the length of dry spells. International Journal of Climatology 19: 537-555.

Martín-Vide J. y Olcina J. 2001. Climas y tiempos de España Madrid Alianza Editorial. 258 pgs.

Milián T. 1996. Variaciones seculares de las precipitaciones en España Universidad de Barcelona. 407 pgs. Tesis doctoral inédita.

Moberg A., Jones P.D., Barriendos M., Bergström H., Camuffo D., Cocheo C., Davies T.D., Demarée G., Martín-Vide J., Maugeri M., Rodríguez R y Verhoeve T. 2000. Day-to-day temperature variability trends in 160-to 275-year long European instrumental records. Journal of Geophysical Research 105(D18): 22849-22868.

Muñoz-Díaz D. y Rodrigo F.S. 2004. Spatio-temporal patterns of seasonal rainfall in Spain 1912-2000 using cluster and principal component analysis comparison. Annales Geophysicae 22: 1435-1448.

Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N. y Dadi Z. 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press. 599 pgs.

New M., Hulme M. y Jones P. 1999. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. Journal of Climate 12: 829-856.

Oñate J.J. y Pou A. 1996. Temperature Variations in Spain Since 1901. a Preliminary Analysis. International Journal of Climatology 16: 805-816.

Peixoto J.P. y Oort A.H. 1992. Physics of Climate. American Institute of Physics. New York.

Pérez-Obiol R. y Julià R. 1994. Climatic-Change on the Iberian Peninsula Recorded in a 30000-Yr Pollen Record from Lake Banyoles. Quaternary Research 411: 91-98.

Piñol J., Terradas J. y Lloret F. 1998. Climate warming wildfire hazard and wildfire occurrence in coastal Eastern Spain. Climatic Change 38: 345-357.

Pita Mª.F., Camarillo J.M. y Aguilar M. 1999. La evolución de la variabilidad pluviométrica en Andalucía y sus relaciones con el índice de la NAO. En: Raso y Martín-Vide (Eds.). La Climatología española en los albores del siglo XXI. Vilassar Oikos-tau Asociación Española de Climatología Serie A nº 1. Pgs. 399-408.

Pons A. y Reille M. 1988. The Holocene-Pleistocene and Upper-Pleistocene Pollen Record from Padul Granada Spain - a New Study. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 663-4 243-263.

Pope V.D., Gallani M., Rowntree P.R. y Stratton R.A. 2000. The impact of new physical parametrisations in the Hadley Centre climate model - HadAM3. Climate Dynamics 16: 123-146.

Pozo-Vázquez D. 2000. Causas físicas de la variabilidad espacio-temporal del clima de la Península Ibérica en escalas interanual a decadal. NAO y ENSO. Universidad de Granada. Tesis doctoral inédita. 334 pgs.

Pozo-Vázquez D., Esteban-Parra M.J., Rodrigo F.S. y Castro-Díez Y. 2001. The association between ENSO and winter atmospheric circulation and temperature in the North Atlantic region. Journal of Climate 16: 3408-3420.

Pozo-Vázquez D., Tovar-Pescador J., Gámiz-Fortis S.R., Esteban-Parra M.J. y Castro-Díez Y. 2004. NAO and solar radiation variability in the European North Atlantic region. Geophysical Research Letters 31 L05201.

Quereda J. y Montón E. 1997. ¿Hacia un Cambio Climático? La Evolución del Clima Mediterráneo desde el Siglo XIX Castellón Fundación Dávalos- Fletcher. 520 pgs.

Quereda J. y Montón E. 1999. La hipótesis de la "estabilidad" climática en el Mediterráneo español. En: Raso y Martín-Vide (eds.). La Climatología española en los albores del siglo XXI. Vilassar Oikos-tau Asociación Española de Climatología Serie A nº 1. Pgs. 427-438.

Quereda J., Montón E., Escrig J., Ruescas A. y Mollà B. 2004. Detection of the urban effect over temperature trend by means of NOAA-AVHRR imagery MeCEO First Mediterranean Conference on earth observation Remote Sensing. Belgrado. Pgs. 33-40.

Quereda J., Olcina J. y Montón E. 1996. Red dust rain within the Spanish Mediterranean area. Climatic Change 32: 215-228.

Räisänen J., Hansson U., Ullerstig A., Döscher R., Graham L.P., Jones C., Meier M., Samuelsson P. y Willén U. 2004. European climate in the late 21st century. regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. Climate Dynamics 22: 13-31.

Ramos M.C. 2001. Rainfall distribution patterns and their change over time in a Mediterranean area. Theoretical and Applied Climatology 69: 163-170.

Raso J.M. 1997. The recent evolution of mean annual temperatures in Spain. En: Martín-Vide (Ed.). Advances in Historical Climatology in Spain. Vilassar de Mar. Oikos-tau. Pgs. 201-223.

Rimbu N., Lohmann G., Kim J.-H., Arz H.W. y Schneider R. 2003. Arctic/North Atlantic Oscillation signature in Holocene sea surface temperature trends as obtained from alkenone data. Geophysical Research Letters 301280 13 1-4.

Rocha A. 1999. Low-frequency variability of seasonal rainfall over the Iberian Peninsula and ENSO. International Journal of Climatology 19: 889-901.

Rodó X., Baert E. y Comín F. 1997. Variations in seasonal rainfall in Southern Europe during the present century. relationships with the North Atlantic oscillation and the El Niño-Southern oscillation. Climate Dynamics 13: 275-284.

Rodrigo F.S, Esteban-Parra M.J, Pozo-Vázquez D. y Castro-Díez Y. 1999. A 500-year precipitation record in southern Spain. International Journal of Climatology 19: 1233-1253.

Rodrigo F.S., Esteban-Parra M.J., Pozo-Vázquez D. y Castro-Díez Y. 2000. Rainfall variability in southern Spain on decadal to centennial times scales. International Journal of Climatology 20: 721-732.

Rodríguez R., Llasat M.C. y Wheeler D. 1999. Analysis of the Barcelona precipitation series 1850-1991. International Journal of Climatology 19: 787-801.

Rodríguez-Puebla C., Encinas A.H., Nieto S. y Garmendia J. 1998. Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. International Journal of Climatology 18: 299-316.

Rodríguez-Puebla C., Frías M.D. y Encinas A.H. 2001. Relationships between Dry and Wet Periods in Spring Precipitation over the Iberian Peninsula and Atmospheric Circulation.

En: Brunet y López (Eds.). Detecting and Modelling Regional Climate Change. Springer. Berlín, DE. Pgs. 397-404.

Romero R., Guijarro J.A., Ramis C. y Alonso S. 1998. A 30 year 1964-93 daily rainfall database for the Spanish Mediterranean regions. first exploratory study. International Journal of Climatology 18: 541-560.

Sáenz J., Zubillaga J. y Rodríguez-Puebla C. 2001. Baroclinic Activity and Interannual Variability of Winter Precipitation in the Northern Iberian Peninsula. En: Brunet y López (Eds.) Detecting and Modelling Regional Climate Change. Springer, Berlín, DE. Pgs. 405-416.

Sailor D.J. y Li X. 1999. A semiempirical downscaling approach for predicting regional temperature impacts associated with climatic change. Journal of Climate 12: 103–114.

Saladíe O. 2004. Variaciones y tendencia secular de la precipitación en el sector nororiental de la Península Ibérica 1850-2000. Universidad de Barcelona. Tesis doctoral inédita. 496 pgs.

Sánchez-Goñi M.F.S., Cacho I., Turon J.-L., Guiot J., Sierro F.J., Peypouquet J.-P., Grimalt J.O. y Shackleton N.J. 2002. Synchroneity between marine and terrestrial responses to millennial scale climatic variability during the last glacial period in the Mediterranean region. Climate Dynamics 19: 95-105.

Sánchez E., Gallardo C., Gaertner M.A., Arribas A. y Castro M. 2004. Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model. first approach. Global and Planetary Change 44: 163-180.

Saz M. 2003. Temperaturas y precipitaciones en la mitad norte de España desde el siglo XV. C.P.N.A Diputación General de Aragón, Zaragoza. 293 pgs.

Saz M. y Creus J. 1999. La variabilidad del clima español en el pasado. frecuencia de valores extremos de temperatura y precipitación reconstruidas desde el s. XV. En: Raso y Martín-Vide (Eds.) La Climatología española en los albores del siglo XXI. Vilassar Oikos-tau Asociación Española de Climatología Serie A nº 1. pgs 501-510.

Schar C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M. y Appenzeller C. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427: 332-336.

Serra C., Burgueño A. y Lana X. 2001. Analysis of maximum and minimum daily temperatures recorded at Fabra Observatory Barcelona NE Spain in the period 1917-1998. International Journal of Climatology 21: 617-636.

Serrano A., Mateos V.I. y García J.A. 1999. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. Physics and Chemistry of the Earth B 24: 85-90.

Sobrino C.M., Ramil-Rego P. y Gómez-Orellana L. 2004. Vegetation of the Lago de Sanabria area NW Iberia since the end of the Pleistocene. a palaeoecological reconstruction on the basis of two new pollen sequences. Vegetation History and Archaeobotany 131: 1-22.

Staudt M. 2004. Detección de cambios térmicos en la Península Ibérica con datos homogéneos regionales. Universidad de Granada. Tesis doctoral inédita. 559 pgs.

Stott P.A., Tett S.F.B., Jones G.S., Allen M.R., Ingram W.J. y Mitchell J.F.B. 2001. Attribution of twentieth century temperature change to natural and anthropogenic causes. Climate Dynamics 17: 1-22.

Sumner G.N., Homar V. y Ramis C. 2001. Precipitation seasonality in eastern and southern coastal Spain. International Journal of Climatology 21: 219-247.

Sumner G.N., Romero R., Homar V., Ramis C., Alonso S. y Zorita E. 2003. An estimate of the effects of climate change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late twenty first century. Climate Dynamics 20: 789-805.

Taboada J.J., Naranjo L., Lage A. y Pérez-Muñuzuri V. 2002. Estudio de la variabilidad de la precipitación en Galicia y su relación con patrones de teleconexión. En: Guijarro, Grimalt, Laita y Alonso (Eds.) El Agua y el Clima. Asociación Española de Climatología Serie A nº 3. Pgs. 93-100.

Vázquez López L.A. 1999. La Circulación Atmosférica Euroatlántica y el clima de pequeños territorios. La Península Ibérica y Cataluña Universidad de Barcelona Tesis doctoral inédita.

von Storch H. y Zwiers F.W. 1999. Statistical Analysis in Climate Research. University Press. Cambridge, UK. 494 pgs.

Wheeler D. y Martín-Vide J. 1992. Rainfall Characteristics of Mainland Europe most Southerly Stations. International Journal of Climatology 12: 69-76.

2. IMPACTOS SOBRE LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES

Fernando Valladares, Josep Peñuelas y Estanislao de Luis Calabuig

Contribuyentes

J. J. Camarero, M. Estiarte, I. Filella, C. Gracia, F. Lloret, E. Gutiérrez Merino, R. Ogaya, R. Pérez-Obiol, S. Sabaté, M. T. Sebastiá

Revisores

I. Alonso, J. S. Carrión, P. Castro, J. Cortina, A. Escudero, M. Génova, F. Maestre, D. Morales, F. Ojeda, B. Peco, F. Pugnaire, F. Pulido, J. M. Rey-Benayas, S. Rivas-Martínez, F. Rodá, J. C. Rodríguez-Murillo, B. Sánchez, J. J. Sanz, M. Segur, J. Terradas, M. Vila, R. Zamora, M. A. Zavala

J. Pereira, P. Canadell

RESUMEN

España presenta una gran variedad de ecosistemas terrestres, muchos de ellos únicos y todos ellos proporcionando un amplio número de bienes y servicios. Estos ecosistemas han estado sometidos a intensos cambios climáticos en el pasado pero el ritmo de estos cambios se ha acelerado de forma excepcional. El cambio climático acelerado está dando lugar a un abanico de efectos directos e indirectos que se ven acentuados por la interacción con otros motores del cambio global (cambios de uso del territorio, contaminación, intercambio biótico). Los efectos difieren para los ecosistemas de la región Atlántica, limitados por temperatura, y para los de la región Mediterránea, limitados por agua. Mientras la productividad podría aumentar con el cambio climático en los primeros, posiblemente disminuya en los segundos.

Los ecosistemas que se encuentran en su límite ecológico o geográfico (formaciones cuyo balance hídrico es cero, ecosistemas dominados por especies relictas de climas pasados, ecosistemas de alta montaña, ciertas formaciones de zonas áridas) son los que se verán más afectados por el cambio climático.

Existe evidencia científica de que el cambio climático afectará a la fenología y las interacciones entre especies, favorecerá la expansión de especies invasoras y plagas, provocará cambios en la dominancia, estructura y composición de las comunidades, y aumentará el impacto de perturbaciones como el fuego. Con el cambio climático disminuirá la capacidad de secuestro de carbono atmosférico de los ecosistemas y se producirán migraciones altitudinales de especies así como extinciones locales.

Por el contrario, es actualmente incierto si las especies serán capaces de evolucionar y adaptarse a tiempo al cambio climático, si las plantas aumentarán la eficiencia en el uso del agua con la sequía y el calentamiento, y si estos procesos acelerarán los ciclos biogeoquímicos.

Las zonas y sistemas más vulnerables al cambio climático son las islas en sentido amplio (incluyendo islas edáficas y ecosistemas de alta montaña) y los ecotonos o zonas de transición entre sistemas. La situación espacial de estos últimos podrá servir de indicador integrado y posiblemente temprano del cambio climático.

La gestión de los ecosistemas terrestres debe implicar a la sociedad en su conjunto y buscar fórmulas creativas para la financiación de actividades de mitigación de efectos, restauración e investigación. La conservación de los ecosistemas terrestres en un escenario de cambio climático entra en conflicto con numerosas actividades humanas sobre todo en relación al uso de recursos naturales como el agua. Esta conservación es poco reconciliable con la gestión encaminada a maximizar la producción o a secuestrar el carbono atmosférico.

Entre las principales necesidades de investigación destaca la consolidación de redes de seguimiento ecológico a largo plazo, aprovechando en lo posible las ya existentes y favoreciendo la participación interdisciplinar de la comunidad científica, el estudio de las interacciones tanto entre factores ambientales como entre especies y niveles tróficos, y la determinación de valores mínimos de tolerancia (climáticos, estructurales, funcionales) en sistemas vulnerables al cambio climático.

2.1. INTRODUCCIÓN

2.1.1. Influencia humana en los ecosistemas terrestres: los efectos múltiples de una especie en expansión

El ser humano está modificando a velocidad creciente la distribución espacial y el funcionamiento de los ecosistemas. Dicha modificación tiene lugar a escala local, regional y global de forma que hoy en día la gran mayoría de ecosistemas terrestres presentan un cierto grado de degradación o alteración atribuible a las actividades humanas (Vitousek *et al.* 1997). Además, estas actividades están cambiando las propiedades biofísicas de la atmósfera y el clima, y hay evidencia irrefutable de que los ecosistemas están respondiendo a todos estos cambios (Hulme *et al.* 1999, Hughes 2000). Aunque muchas de estas evidencias se apoyan en respuestas de especies particularmente sensibles, hay cada vez más resultados que muestran efectos a nivel de todo el ecosistema. Si bien dichos efectos no son apreciables fácilmente, tienen en general un plazo temporal de varias décadas y se ven con frecuencia influidos por las condiciones locales (Vitousek *et al.* 1997, Parmesan y Yohe 2003).

2.1.2. La diversidad de los ecosistemas terrestres españoles

Debido en buena medida a su posición geográfica y a su compleja orografía, España presenta una gran variedad de ecosistemas terrestres, una de las mayores de Europa. De las seis regiones biogeográficas contempladas por la Directiva Hábitats, cuatro están representadas en España (las regiones Atlántica, Mediterránea, Alpina y Macaronésica) abarcando 141 tipos distintos de hábitats terrestres de entre un total de 264. Esta extraordinaria variedad de ecosistemas terrestres junto con la particular historia evolutiva de nuestra región ha dado lugar a una elevada diversidad de especies, de recursos naturales y de sistemas biológicos únicos que ha conducido a la protección de 536 espacios naturales en todo el país. Aproximadamente un 20% de los cincuenta millones de hectáreas (Mha) del País corresponde a ecosistemas forestales en sentido amplio (las cifras oscilan según la definición de ecosistema forestal). La región Mediterránea es la más extensa, con 43 Mha, de los cuales 3 Mha son bosques, 2,9 Mha son matorrales y brezales, y 2,6 Mha son pastizales naturales o seminaturales. La región Atlántica ocupa 5,5 Mha, de los que destacan los 1,1 Mha de matorrales y brezales, y los 0.5 Mha de bosques. La región Alpina ocupa 0,9 Mha y está dominada por pastizales naturales y seminaturales (0,2 Mha) y por bosques (0,2 Mha). La región de menor tamaño es la Macaronésica (0.7 Mha) y en ella los bosques y matorrales suman 0,1 Mha (Reyero 2002). Además de los rasgos climáticos y biogeográficos, el grado y extensión temporal de la intervención humana son otras características intrínsecas que deben ser tenidas muy en cuenta en la descripción de los ecosistemas terrestres españoles. La intervención humana varía de intensa y prolongada en las regiones Mediterránea y Atlántica, a moderada y relativamente más reciente en las regiones Alpina y Macaronésica. La extensión de la región Mediterránea española representa el 17,3% de toda la región Mediterránea en sentido estricto, la cual se reparte entre 18 países, siendo sólo superada por Turquía (20,8% del total).

Así pues, los ecosistemas terrestres españoles están expuestos a una gran variabilidad climática natural, y son el resultado de una notable complejidad topográfica y litológica, unos marcados gradientes en los usos del suelo y en la disponibilidad de agua, y albergan con frecuencia una elevada biodiversidad. Como veremos, estas y otras características hacen que muchos de estos ecosistemas sean especialmente sensibles a los cambios atmosféricos y climáticos. La comprensión de los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres es crucial para tomar las medidas que permitan asegurar los múltiples bienes y servicios que nos prestan, muchos de los cuales son imprescindibles para nuestra propia existencia.

2.1.3. Bienes y servicios de los ecosistemas terrestres

Desde el punto de vista antropocéntrico, los ecosistemas terrestres son sistemas que cumplen tres tipos generales de funciones: productivas, ambientales y sociales (Rodá *et al.* 2003). En su función productiva, suministran bienes naturales renovables, como los alimentos, los productos de interés farmacológico, los productos madereros y los no madereros (pastos, corcho, piñas, caza, setas, etc.). Entre las funciones ambientales y ecológicas destacan los servicios ecosistémicos prestados gratuitamente, como el mantenimiento de la biodiversidad, la regulación de la composición atmosférica y del clima, la regulación de los ciclos biogeoquímicos, la conservación del suelo (e.g. prevención de la erosión), la regulación del ciclo del agua y el almacenaje de carbono. Entre las funciones sociales, las más relevantes son los usos recreativos, educativos y de ocio, las oportunidades para la investigación, sus valores tradicionales culturales y emocionales, funciones que dan pie a actividades económicas importantes como el turismo y el excursionismo. Está claro que las alteraciones que producen los cambios climático y atmosférico tendrán un impacto sobre muchos de estos bienes y servicios y, por lo tanto, impactos sobre los sistemas socioeconómicos (Winnet 1998).Entre las funciones y servicios ecosistémicos destaca el secuestro y almacenaje del carbono atmosférico por ser la base de la producción vegetal que sustenta los ecosistemas y por tener implicaciones directas en el balance de CO_2 atmosférico, uno de los principales agentes del cambio climático. Otros servicios ecosistémicos incluyen la provisión de polinizadores y el control de plagas.

Los ecosistemas terrestres se consideran importantes reguladores del clima tanto global como local, influyendo decisivamente en los ciclos biogeoquímicos y en las características de la atmósfera. Ciertos ecosistemas terrestres como los bosques afectan a la humedad relativa e incluso al régimen de precipitaciones local, pudiendo dar lugar a un ciclo de retroalimentación en el que el bosque favorece las condiciones hídricas para que se mantenga el propio bosque. Si bien es un hecho constatado en numerosas ocasiones que cuando la cobertura vegetal es alta (cuando aumenta el índice de área foliar o LAI) hay menos agua disponible en el ecosistema al aumentar la transpiración (Rambal y Debussche 1995), el bosque puede actuar como captador de agua en ciertas condiciones mediterráneas. Datos experimentales y simulaciones numéricas indican que la presencia de masas arboladas en las laderas de las montañas costeras favorece significativamente la formación de tormentas de verano y la captura del agua que en forma de nieblas mas o menos densas se eleva desde el mar (Millán 2002). Si bien estos efectos locales del bosque sobre el microclima y la precipitación son notables y están bien probados, la influencia en el clima regional (macroclima) es menos clara. En simulaciones del efecto de una deforestación extensa en España y Francia se ha obtenido que el bosque sólo favorece las lluvias cuando éstas se dan en verano mediante nubes de desarrollo vertical, en cuya formación puede intervenir activamente la transpiración del bosque (Gaertner *et al.* 2001).

2.1.4. El impacto humano en los ecosistemas españoles

La intensa intervención humana es una característica propia de la mayoría de los ecosistemas terrestres españoles. Estos ecosistemas han sido muy modificados por el ser humano desde comienzos del Neolítico, y sobre todo a partir de la Edad del Bronce, provocando en general una reducción del área original de los ecosistemas forestales (Pons y Suc 1980, Reille y Pons 1992). Dentro de este proceso de intervención se han creado algunos ecosistemas seminaturales cualitativamente nuevos y relativamente estables como las dehesas de especies de *Quercus* (Stevenson y Harrison 1992). La acción antrópica durante los últimos milenios es un elemento crítico que determina cambios en las especies dominantes y conlleva cambios radicales en la diversidad y la cobertura arbórea y arbustiva, y en definitiva en la estructura y funcionamiento de muchos ecosistemas terrestres. Carrión *et al.* (2003) reconstruyen la historia de la vegetación en la Sierra de Gádor en el sureste de la península Ibérica a través de un

registro paleoecológico, mostrando cambios significativos en la abundancia de especies vegetales, con el relevo de dominancia de *Quercus* caducifolios por *Pinus* y *Quercus* perennifolios hace unos 3940 años AP, el máximo apogeo de *Pinus* en detrimento de los *Quercus* perennifolios entre 1760-1629 años AP y el descenso en la importancia de los bosques, acompañado de un incremento de heliófitas hasta 1160 años AP. Entre los factores de control del cambio en la vegetación durante la segunda mitad del Holoceno se incluye la ocurrencia y frecuencia de fuegos, la actividad humana, el cambio climático y la interrelación entre ellos. Desde entonces, clima y actividad humana se ven inextricablemente relacionados.

En un marco temporal más reciente, en la España de comienzos del siglo XX, se inician grandes programas de repoblación forestal con fines productivistas que coinciden con la crisis del mundo rural y el abandono de los campos que son recolonizados por comunidades vegetales leñosas. El abandono de cultivos de suelos pobres, de proporciones importantes en la península Ibérica, ha supuesto un cambio evidente en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas con un incremento de la diversidad florística y faunística, una mejora de la calidad del suelo y del ciclo hidrológico y una reducción de la erosión del suelo. Pero el abandono de muchas prácticas tradicionales lleva a la crisis de sistemas productivos de gran valor natural por su elevada biodiversidad como la dehesa y a un envejecimiento del monte bajo de especies de *Quercus*, que al pasarse de turno pierde vigor y se vuelve mas sensible a perturbaciones abióticas (sequía y extremos climáticos) y bióticas (plagas y enfermedades). A su vez, la acumulación de biomasa favorece los incendios. La superficie arbolada general aumenta en el último tercio del siglo XX y se incrementa el número de espacios naturales protegidos, al extenderse una visión ecológica del bosque y de los hábitats terrestres. Se observa una recuperación natural de encinares y alcornocales en áreas marginales submediterráneas menos secas, pero se acrecienta el deterioro ambiental del aire y las aguas, y el ritmo del cambio climático. La protección de espacios naturales fuera de áreas de montaña o lugares históricos o emblemáticos es escasa y los bosques, matorrales y pastizales quedan fragmentados y desconectados (Costa *et al.* 1990, Valladares 2004a). Asimismo existen zonas (ciertos campos de cultivo abandonados, espartales y matorrales afectados por sobrepastoreo), en las que, pese al abandono de las prácticas tradicionales, el grado de degradación alcanzado, combinado con ciclos climáticos poco favorables, han dificultado considerablemente la recuperación espontánea de la vegetación.

2.1.5. Cambios en el balance de carbono, causa y consecuencia del cambio climático

El balance de carbono de los ecosistemas terrestres es el resultado de procesos que capturan el CO_2 atmosférico (e.g. fotosíntesis) y procesos que liberan CO_2 (e.g. respiración, incendios). Un aspecto crucial en la actualidad es determinar hasta qué punto los ecosistemas terrestres pueden actuar como sumideros de carbono y atenuar así el calentamiento global. Pero cerrar el balance de carbono al detalle no es una tarea fácil, y más cuando intervienen en el análisis escalas de tiempo y espacio diferentes. Existen numerosas incertidumbres sobre cómo afectan las condiciones ambientales que interaccionan con los diversos procesos implicados. Además, para entender los flujos de carbono es importante cuantificar las cantidades de carbono que tenemos en los ecosistemas. Para la parte aérea se disponen de buenas bases de datos como las proporcionadas por los inventarios forestales, aunque faltan datos sobre ecosistemas no contemplados en esta iniciativa. La parte menos conocida corresponde a la biomasa subterránea, que en los ecosistemas mediterráneos es muy importante y puede ser en el caso de un encinar más del 50 por ciento de la biomasa total. A este carbono debemos añadir el carbono almacenado en los suelos y la necromasa acumulada en el suelo, que frecuentemente es superior al carbono total de la biomasa, aunque la información al respecto es escasa.

Análisis a partir de los inventarios forestales nacionales revelan que los bosques españoles han actuado durante buena parte del siglo XX como sumideros de carbono y que todas las

comunidades autónomas españolas acumularon carbono en sus bosques durante el periodo 1990-1998, aumentando la cantidad de carbono acumulado en relación al periodo 1974-1987 (Rodríguez-Murillo 1997, 1999). La acumulación osciló entre 4,5 ton de carbono por hectárea y año en Galicia (2,0 en el periodo anterior) a 1,1 en Murcia (0,27 en el periodo anterior). Este efecto se atribuye a las repoblaciones realizadas desde los años 40 del siglo XX y a los cambio más recientes en usos agrícolas y ganaderos, que han contribuido al aumento de las superficies arboladas y de la densidad de masa de los bosques (Rodríguez-Murillo 1999). Respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2, CH_4, CO, N_2O y CFC NO_x) –JP- procedentes de incendios forestales en el periodo 1970-2001 el valor promedio es de $21{,}5*10^6$ toneladas en el conjunto del Estado español para las emisiones directas; las emisiones diferidas son, en promedio, 3,8 veces superiores a éstas (Prieto y Rodríguez-Murillo 2003). Galicia fue la comunidad autónoma que más contribuyó a las emisiones totales de gases con efecto invernadero como consecuencia de los incendios forestales. De todas formas es preciso hacer constar que los datos de las emisiones totales estimadas de CO_2 procedentes de incendios forestales suponen sólo un 1% del total de las emisiones estimadas en el Estado español de dicho gas. El balance de carbono de los ecosistemas forestales no es comparable al de los demás ecosistemas terrestres, pero es de estos ecosistemas de los que se dispone información más precisa.

2.1.6. Métodos de estudio de los efectos del cambio climático

El estudio de los efectos que el cambio climático tiene sobre nuestros ecosistemas terrestres se lleva a cabo mediante cinco tipos de actividades que recorren diferentes escalas temporales: (1) el estudio paleoecológico de testigos sedimentarios datables, a través de indicadores biológicos y geoquímicos (miles a millones de años), (2) el estudio de material histórico diverso, como por ejemplo especímenes de herbario, piezas de museo, archivos, anillos de los árboles (últimos siglos), (3) el estudio de los cambios ecofisiológicos, biogeoquímicos y demográficos de nuestros ecosistemas en respuesta a las cambiantes condiciones climáticas (últimas décadas y años), (4) el estudio experimental de nuestros ecosistemas bajo condiciones más o menos controladas, simuladoras de los cambios previstos para las próximas décadas por los modelos climáticos y, finalmente, (5) la modelización de los cambios pasados y futuros, en el espacio y en el tiempo. Aparte de emplear herramientas paleoecológicas e históricas para movernos en el tiempo, los estudios del cambio climático y de sus efectos requieren ir ascendiendo sucesivamente en la escala espacial desde la hoja hasta el ecosistema, la región y el globo entero, combinándose las herramientas de modelización con las de teledetección. No obstante, es preciso destacar que las influencias del cambio climático son difíciles de separar de las de los otros componentes del cambio global como los cambios en los ciclos biogeoquímicos, o los cambios en los usos del suelo.

2.1.7. Contenido del capítulo y aclaraciones

Dada la amplitud de aspectos que quedan incluidos en este capítulo es inevitable un cierto solapamiento con otros capítulos, especialmente con los dedicados al sector forestal (Cap. 9), biodiversidad vegetal (Cap. 5) y animal (Cap. 6), y recursos edáficos (Cap. 8). Para minimizar este solapamiento se ha profundizado en aspectos ecofisiológicos de la vegetación y en procesos que operan a nivel de comunidad y ecosistema. Se hará particular hincapié en la región mediterránea por ser la región mayoritaria de la península Ibérica y sobre la que existe más información sobre su sensibilidad al cambio climático. De hecho, esta región contiene formaciones que se encuentran ya al límite de sus posibilidades, con balances hídricos en los que la precipitación es igualada por la evapotranspiración. Los sistemas dulceacuícolas y costeros son tratados en otros capítulos (Caps. 3 y 11 respectivamente). Con el término incremento de aridez nos referiremos conjuntamente a la disminución de las precipitaciones,

que se vuelven a su vez más irregulares, y al incremento de la evapotranspiración que lleva consigo el aumento de temperatura.

2.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

2.2.1. Historia del cambio climático y de la influencia antropogénica en los ecosistemas

Nuestro país, como todo el planeta, está instalado en el cambio, un cambio que ha sido muy espectacular en diversas fases de la historia de la Tierra, pero que actualmente está ocurriendo a un ritmo particularmente acelerado (IPCC 2001). Los ecosistemas terrestres europeos han experimentado cambios múltiples y profundos relacionados con cambios climáticos no menos profundos que se han visto acompañadas en tiempos más recientes con alteraciones en el régimen de perturbaciones (e.g. pastoreo, fuego, carboneo y extracción de leña). Es preciso recalcar que las características adaptativas y competitivas de las especies y los procesos estocásticos han sido tan importantes o más que la conclusión de las fases glaciares y los cambios climáticos del Holoceno en el establecimiento de las especies dominantes después de cada crisis (Carrión 2003).

La península Ibérica y las islas Baleares han tenido un gran valor biogeográfico para el estudio de los cambios climáticos durante el último ciclo glaciar-interglaciar. Después del denominado interglacial eemiense o Riss-Würm, entre unos 120.000 y 80.000 años antes del presente, los registros polínicos sugieren la expansión de los paisajes esteparios que responden a bajas precipitaciones y temperaturas (Pérez-Obiol y Julià 1994). No obstante, algunas áreas montañosas y litorales del sur de la Península mantuvieron durante las últimas crisis glaciares un carácter climático más cálido y húmedo que representa una singularidad importante en el ámbito peninsular y refleja un paisaje eventualmente más forestal con la inclusión de especies mesófilas y termófilas (Carrión 2002, Carrión *et al.* 2003). El conocimiento más resaltable sobre las pulsaciones centenarias y milenarias del último ciclo glaciar-interglaciar se da a partir del período llamado Tardiglacial, que comienza hace unos 14-15.000 años. Este período implica una mejora climática global, coherente con el proceso de deglaciación, que favoreció el desarrollo de formaciones arbustivas y arbóreas en muchas regiones peninsulares, aunque el carácter de estas colonizaciones es latitudinalmente transgresivo. Posteriormente, entre los 11000 y los 10400 años, se produjo una anomalía climática que supuso un retorno de unas cuantas centurias a las condiciones frías y áridas de los pleniglaciares. Nos referimos al denominado Dryas reciente (en referencia a la rosácea alpina *Dryas octopetala*). El final del Dryas reciente constituirá el punto de partida del presente interglacial (Holoceno) que se caracteriza por un rápido aumento de temperatura y humedad que alcanzará su óptimo en torno los 8500-5500 años antes del presente. A partir de los 5000-4500 años, los parámetros climáticos adquieren un carácter mediterráneo en el sur, el este y en las islas Baleares (Yll *et al.* 1997) y se observa una mayor estacionalidad y un paisaje más xérico en muchos puntos de la Iberia oriental. En el oeste y norte peninsular este cambio climático no se materializa de una forma tan abrupta pero los bioindicadores nos permiten afirmar la existencia de un descenso en las precipitaciones. Los últimos 3000 años se caracterizan por fenómenos de deforestación generalizada, sobre todo en contexto termomediterráneo, provocados por la mencionada sinergia del clima y la acción antrópica.

Aunque la mayoría de las secuencias polínicas no alcanzan la resolución adecuada para dilucidar cuestiones por debajo del cambio multimilenario, algunas sugieren que los cambios de vegetación pueden llegar a ocurrir en pocos siglos o incluso décadas, como consecuencia de cambios climáticos abruptos. En la Península Ibérica, sólo una secuencia polínica holocena evidencia esta dinámica de respuesta vegetal al cambio climático, la de la Cañada de la Cruz, en el límite forestal superior de la Sierra de Segura (Jaén) (Carrión *et al.* 2001). Estos cambios han forzado migraciones altitudinales o latitudinales relativamente rápidas de diversas especies. En escalas temporales aún mas cortas, los estudios de material de herbario revelan

que en los últimos dos siglos la densidad estomática ha disminuido en un 21% y la discriminación del ^{13}C en un 5.2%, sugiriendo la existencia de un proceso de adaptación (incremento en la eficiencia de uso del agua) como respuesta a variaciones en la presión selectiva determinadas por las condiciones más cálidas y áridas de la actualidad (Peñuelas y Matamala 1990, Peñuelas y Azcon-Bieto 1992).

Conviene destacar que, durante los últimos años, se han descubierto también evidencias de respuesta biótica rápida (décadas-centurias) a los cambios climáticos abruptos que tienen lugar en el seno de las fases glaciares (los denominados eventos Heinrich y Dansgaard-Oeschger verificables en los testigos de hielo antártico y groenlandés). Estas respuestas parecen incluir a la vegetación continental del sur peninsular, como se ha evidenciado en algunas secuencias marinas de Alborán y la costa atlántica ibérica y norteafricana (D´Errico y Sánchez Goñi 2003). Muy recientemente, se ha comprobado que la señal de cambio climático aparece también en la geoquímica de espeleotemas (Genty *et al.* 2003). Dado que las secuencias marinas reflejan una lluvia polínica de incierto control espacial y tienen una tafonomía complicada, conviene esperar a la aparición de registros continentales que confirmen o refuten que los cambios de vegetación a los eventos intraglaciares han sido igualmente bruscos. Los informes preliminares sobre la paleovegetación europea durante el estadio isotópico del oxígeno marino 3 (*OIS 3 Project*) no son concluyentes a este respecto (Huntley *et al.* 2003).

Entre los ecosistemas terrestres del país, los bosques y matorrales se han extendido en las últimas décadas como resultado del aumento de temperatura, del aumento de CO_2, y/o del aumento de fertilizantes en el ambiente (eutrofización difusa), pero sobre todo como resultado de dos procesos de origen antrópico: la sucesión secundaria a partir de pastos y campos de cultivo abandonados, y la superposición de perturbaciones severas sucesivas sobre los ecosistemas terrestres (Mesa-Jimenez 2002, Costa *et al.* 1998). Los diferentes usos que los humanos hemos hecho de ellos han producido un mosaico de ecosistemas con distintos grados de madurez, formando paisajes heterogéneos que favorecen el mantenimiento de la diversidad.

2.2.2. Las “huellas” del cambio climático en los árboles de la Península Ibérica

Los anillos de crecimiento de la madera de los árboles revelan grandes oscilaciones interanuales en respuesta a los cambios climáticos experimentados en los últimos siglos, aunque estas oscilaciones difieren entre especies. Las especies tolerantes de la sequía pero que pueden aprovechar el agua freática, como la encina (*Quercus ilex*), muestran oscilaciones menores que las especies elusivas de la sequía y que dependen más directamente de las precipitaciones como el pino carrasco (*Pinus halepensis*) (Ferrio *et al.* 2003). A lo largo del siglo XX, los árboles, los bosques y los ecosistemas han estado respondiendo a los efectos del cambio climático tales como el aumento de CO_2, el calentamiento global y la variabilidad climática. La respuesta de los árboles a estos efectos ha sido analizada en más de 60 bosques de coníferas de diferentes características ambientales a lo largo de toda la mitad este de la Peninsula. La mayoría de las variables dendrocronológicas (basadas en el grosor de los anillos anuales, su composición isotópica y en cambios en la anatomía y densidad de la madera) presentaron una variabilidad creciente durante la segunda mitad del s.XX reflejando el aumento de la variabilidad climática y de la frecuencia de eventos extremos (Tardif *et al.* 2003, Camarero y Gutiérrez 2004). El cambio climático ha restringido las posibilidades de respuesta de los árboles, los cuales muestran una mayor sincronización de su crecimiento, tanto entre árboles individuales como entre especies. Esto significa una reducción de las diferencias entre localidades debidas a causas locales (pendiente, orientación, sustrato, o influencia de un determinado tipo de clima), las cuales pasan a tener una importancia secundaria durante las últimas décadas. Estos efectos han sido observados para diferentes escalas espaciales y temporales. Se ha detectado: a) un aumento en la variabilidad intra-anual en el crecimiento en

grosor de especies de árboles mediterráneos, por ejemplo en *Pinus halepensis*, relacionado con un alargamiento del periodo de crecimiento; y b) un aumento de la variabilidad inter-anual e inter-decadal en las series del grosor de los anillos y de composición isotópica en poblaciones de árboles subalpinos a escala local y regional (Camarero y Gutiérrez 2004).

Durante el siglo XX se han descrito dos periodos muy contrastados en base al crecimiento radial de *Pinus uncinata* en los Pirineos centrales: (*i*) la primera mitad del siglo pasado mostró una baja frecuencia de anillos de crecimiento anchos y estrechos, una baja sensibilidad media y una baja proporción de varianza común entre árboles, mientras que (*ii*) la segunda mitad mostró las características opuestas (Tardif *et al.* 2003). La menor variabilidad del crecimiento entre 1900 y 1950 se ha asociado a una "relajación" del gradiente térmico altitudinal debida al mayor calentamiento regional observado durante estas décadas y a una menor variabilidad climática interanual de las temperaturas. Más arriba, en el límite superior del bosque, el reciente aumento de esta variabilidad climática a partir de 1950 ha provocado que no ascendiera el límite altitudinal del árbol (Camarero y Gutiérrez 2004). Por el contrario, en el periodo climáticamente cálido y estable de 1900-1950 se observó una ascensión clara del límite del árbol. El aumento de la variabilidad climática a partir de 1950 ha frenado este ascenso, favoreciendo el aumento de la densidad dentro del ecotono bosque subalpino-pastos alpinos.

2.2.3. Sensibilidad a la temperatura y respuestas directas de organismos y sistemas

La actividad de todos los organismos vivos está fuertemente influida por la temperatura. Por tanto, no podemos esperar otra cosa que alteraciones de esta actividad. Y el primer tipo de cambio que el calentamiento trae consigo es en los ciclos vitales de plantas y animales (Peñuelas y Filella 2001). Estos cambios fenológicos se han convertido en el síntoma más claro de que el cambio climático ya afecta a la vida (Fig. 2.1). A nivel individual, el efecto fisiológico más directo del incremento de la temperatura es el rápido aumento de la tasa de respiración. La respiración de todo el ecosistema, de la cual el componente principal es la respiración de las plantas, es el proceso determinante del balance de carbono, al menos en ecosistemas forestales europeos donde ha sido estudiado con suficiente precisión (Valentini *et al.* 2000). Las altas temperaturas afectan a la fotosíntesis de las plantas, pero estas son capaces de aclimatarse y crecer incluso a temperaturas extremas siempre que el agua no sea limitante. Las temperaturas altas aumentan el déficit de presión de vapor aumentando la transpiración de las plantas. Pero el cierre de estomas, con frecuencia exacerbado por la combinación de altas temperaturas con sequía y altos niveles de CO_2, hace que la transpiración llegue incluso a disminuir (Kirschbaum 2004). La capacidad de las plantas para aclimatarse a distintas temperaturas, particularmente durante su desarrollo, hace que la respiración no se vea incrementada tan rápidamente con la temperatura como cabría esperarse, pero a pesar del gran impacto de la respiración vegetal en la productividad de los ecosistemas, aún existen numerosas incertidumbres fisiológicas (Atkin y Tjoelker 2003).

Pero no sólo los organismos sino también los procesos ecosistémicos se ven afectados por el calentamiento. Dado que los procesos biogeoquímicos dependen de la temperatura, la eutrofización o enriquecimiento en nutrientes, sobre todo nitratos, un proceso tan preocupante a nivel internacional, es sensible al calentamiento. Aunque en general la eutrofización está asociada al aporte puntual o difuso de nutrientes (e.g. exceso de purines, fertilizantes), el aumento de temperatura y las sequías ejercen una gran influencia en la dinámica de nutrientes ya que el calentamiento aumenta la mineralización, y la sequía impide el uso de nutrientes por parte de las plantas y facilita las pérdidas del sistema cuando llegan las lluvias. Otra alteración biogeoquímica similar la tenemos en la estimulación de la descomposición de la materia orgánica por el calentamiento (vease capítulo sobre recursos edáficos). La falta de agua, por el contrario, la retarda. Se trata pues de una situación en la que dos factores implicados en el

cambio climático ejercen efectos diferentes (incluso antagónicos) sobre el ciclo de la materia y el funcionamiento de nuestros ecosistemas (Emmet *et al.* 2004). En pastos del Pirineo catalán no limitados hídricamente se ha visto que el calentamiento aumenta la productividad y acelera la descomposición de la materia orgánica (Sebastiá *et al.* 2004).

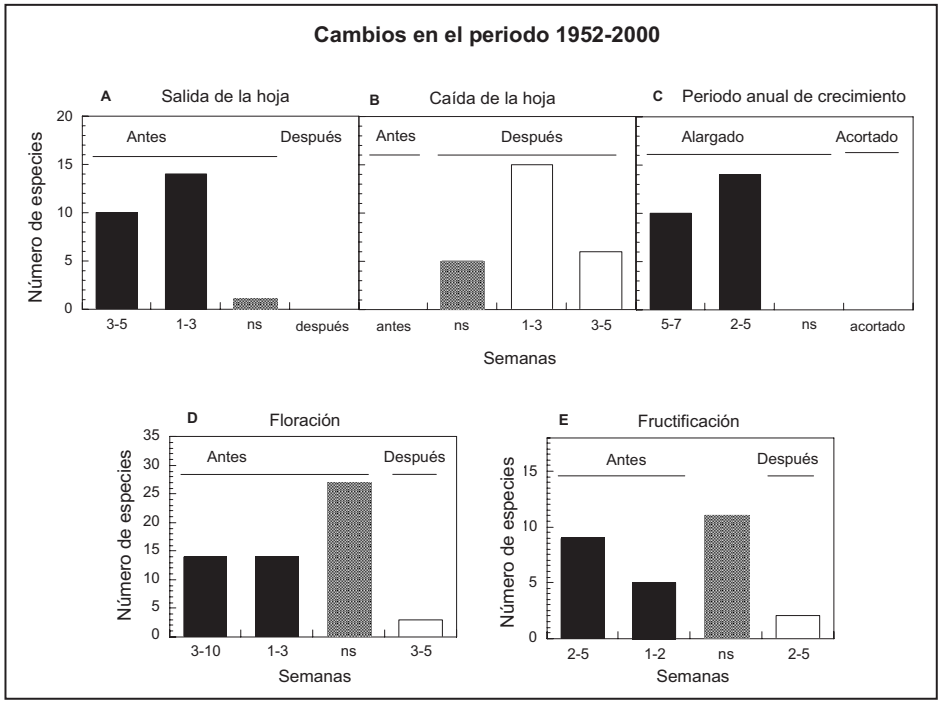


Fig. 2.1. *Frecuencia de especies vegetales con ciclos de vida alterados durante las últimas cinco décadas (desde el 1952 al 2000) en Cardedeu (Vallès Oriental, Barcelona). Antes y después aluden al momento del evento, es decir si se adelanta y retrasa respectivamente durante el periodo estudiado; ns = no significativo. (Elaborado de Peñuelas et al. 2002).*

2.2.4. Cambios fenológicos y desincronización entre niveles tróficos en un mundo que se calienta

Nuestro país, por su situación y topografía, es uno de los sitios dónde se espera que los cambios fenológicos sean más importantes. El ciclo biológico de numerosas plantas comunes, aves migradoras y especies de mariposas está cambiando de forma significativa y el cambio climático parece ser la causa más importante de tal alteración (Fig. 2.1). En Cataluña las hojas de los árboles salen ahora por término medio unos 20 días antes que hace unos cincuenta años. El manzano, el olmo o la higuera parece que anticipan el brote de las hojas en un mes, y el almendro y el chopo, unos quince días, aunque hay otros árboles, como el castaño, que parecen inmutables al cambio de temperatura por ser más dependientes de otros factores como el fotoperiodo o la disponibilidad hídrica (Peñuelas *et al.* 2002) . Por otro lado, las plantas también están floreciendo y fructificando por término medio 10 días antes que hace 30 años (Fig. 2.1). Y los ciclos vitales de los animales también están alterados. Por ejemplo, la aparición de insectos que pasan por los diferentes estadios larvarios más rápidamente en respuesta al calentamiento, se ha adelantado en promedio 11 días (Stefanescu *et al.* 2004). Toda esta actividad prematura de plantas y animales puede ponerlos en peligro por las heladas tardías. Pero también la frecuencia de estas heladas ha cambiado, en general disminuyendo en un ambiente cada vez más caliente. Por ejemplo, en Cardedeu (Barcelona) tenían del orden de 60 heladas anuales hace cincuenta años y ahora han pasado a tener del orden de 20 (Peñuelas *et al.* 2002). Respuestas similares en el adelantamiento de las fenofases de plantas y animales (invertebrados, anfibios, aves, ...), de unos 3-4 días por década en primavera, han sido

descritas últimamente en muchos otros lugares del planeta (Peñuelas y Filella 2001, Walther *et al.* 2002, Parmesan y Yohe 2003), de manera que éste parece ser un fenómeno general, con la variabilidad regional, local y específica propia de todo fenómeno biológico. Todos estos cambios fenológicos no son simples indicadores del cambio climático. Tienen una importancia ecológica crítica puesto que afectan a la capacidad competitiva de las diferentes especies, su conservación, y, por lo tanto, a la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Como la naturaleza no es homogénea, las respuestas al calentamiento son diferentes dependiendo de la especie e incluso de los individuos.

Estas respuestas tan heterogéneas al cambio climático pueden producir importantes desincronizaciones en las interacciones entre las especies, por ejemplo entre las plantas y sus polinizadores, como es el caso estudiado por Santandreu y Lloret (1999), o entre las plantas y sus herbívoros, y alterar así la estructura de las comunidades. Un ejemplo paradigmático de las desincronizaciones entre niveles tróficos lo tenemos en lo que les pasa a las aves migratorias. Dado el adelantamiento en la floración y fructificación de las plantas y en la aparición de los insectos y, por lo tanto, el adelantamiento en la disponibilidad de comida para las aves, se esperaría una llegada más temprana de las aves migratorias. Y no es así ya que la llegada de algunas aves tan comunes y populares como el ruiseñor, la golondrina, el cuco o la codorniz parece que se está retrasando en algunos lugares por término medio dos semanas respecto a hace treinta años (Peñuelas *et al.* 2002). El retraso seguramente viene determinado por el cambio climático del sitio desde donde parten, las regiones subsaharianas, o el de las regiones que cruzan en su ruta migratoria. No obstante, estudios actualmente en curso revelan un patrón espacial complejo, con zonas del País donde la llegada de las aves se adelanta (ver capítulo de biodiversidad animal).

Cuando observamos los cambios fenológicos a escala global se observan alteraciones tan importantes como por ejemplo el aumento en un 20% de la actividad biológica de nuestro planeta en los últimos 30 años debido en gran parte a este alargamiento fenológico del periodo productivo (Peñuelas y Filella 2001). Este aumento lo apreciamos tanto en las imágenes de los satélites de observación de la Tierra, como en los datos de concentración atmosférica de CO_2. Los datos del índice de vegetación normalizado (NDVI) corroboran los datos fenológicos de los observadores terrestres y muestra como en los últimos 20 años la estación de crecimiento de los vegetales se ha alargado 18 días en Eurasia y esto se ha traducido en un aumento de la biomasa verde, al menos en latitudes superiores a los 40º (Myneni *et al.* 1997). El incremento en la productividad vegetal de las últimas décadas que se había atribuido al efecto fertilizador del CO_2 y de las deposiciones de nitrógeno, puede ser debido también en parte a este aumento de temperatura y a este alargamiento de la estación de crecimiento (actividad vegetativa). Todo esto viene corroborado por los datos de concentración atmosférica de CO_2, que nos muestran un aumento de la amplitud de la oscilación estacional de CO_2 en las últimas décadas debido a la mayor disminución primaveral de la concentración de CO_2 (Keeling *et al.* 1996).

2.2.5. Otro efecto del calentamiento: más emisión de compuestos orgánicos volátiles

El aumento de temperatura tiene diversos efectos directos sobre la actividad de los organismos vivos. Uno importante ambientalmente es el aumento exponencial de la emisión biogénica de compuestos orgánicos volátiles (VOC). Estas emisiones afectan a la química atmosférica, no solamente con respecto al ciclo del carbono (emisiones de unas 1500 Tg C año^{-1}) y a la formación de aerosoles, sino por su papel en el equilibrio oxidativo del aire (niveles de OH, NOx y O_3) (Peñuelas y Llusià 2001). Las emisiones de VOC están controladas por los factores que alteran la concentración tisular de estos compuestos, la presión de vapor y la resistencia a la difusión hacia la atmósfera. La temperatura incrementa exponencialmente la emisión de los VOC al activar su síntesis enzimática y su presión de vapor y al disminuir la resistencia a la emisión. Sin embargo, la sequía reduce las emisiones como consecuencia de la falta de

carbohidratos y ATP, y de la disminución de la permeabilidad de la cutícula al intercambio gaseoso. Hoy por hoy, es difícil estimar el resultado final de este antagonismo entre calentamiento y sequía.

Otros factores ligados al cambio global como el incremento del ozono troposférico también afectan a las emisiones de VOC. Dado que el ozono es uno de los productos resultantes de estos VOC, existe un fenómeno de retroalimentación positiva de la contaminación por ozono, el cual requiere mayor atención para su correcta valoración (Llusia *et al.* 2002). Una de las funciones más importantes que parecen tener algunos de estos VOC, como el isopreno y los terpenos, es la de actuar como termoprotectores. *Quercus ilex* emplearía estos compuestos como estabilizadores de las membranas celulares y también como desactivadores de los radicales oxidados para protegerse de las altas temperaturas del verano (Peñuelas y Llusia 2002). Además, estas emisiones de VOC podrían retroalimentar negativamente el calentamiento de la propia atmósfera, al actuar como aerosoles que disminuyen la irradiancia, aunque también podrían retroalimentar positivamente el calentamiento a través de su efecto invernadero directo, al absorber la radiación infrarroja, e indirecto, al alargar la vida del metano y de otros gases invernadero (Peñuelas y Llusia 2003).

2.2.6. Sensibilidad y respuestas a la sequía

La disponibilidad hídrica es un factor crítico para evaluar los efectos del cambio climático sobre la mayoría de los ecosistemas terrestres. Calentamiento y sequía deben contemplarse simultáneamente. En efecto, tanto el alargamiento de la vida de las hojas de los caducifolios como la aceleración de la renovación de las hojas de los perennifolios, fenómenos asociados al incremento de la temperatura (Gracia *et al.* 2001, Sabaté *et al.* 2002), comportarán un aumento del agua transpirada que se añade a la mayor evaporación potencial resultante del aumento de temperatura. En aquellos sitios dónde el bosque dispone de agua suficiente para compensar esta mayor demanda hídrica, es de prever que aumente la producción forestal. Ahora bien, en los sitios con déficit hídrico, que representan la mayor parte de los ecosistemas terrestres de España, se pueden esperar cambios que van desde la reducción de la densidad de árboles hasta alteraciones de la distribución de especies (Sabaté *et al.* 2002). Pero también habría que tener en cuenta la respuesta fotosintética positiva al aumento de CO_2 atmosférico, que puede aliviar parcialmente el efecto negativo del aumento de sequía.

Las sequías pueden ser moderadas o extremas, crónicas o agudas, recurrentes o esporádicas, y las respuestas de una misma especie pueden variar dependiendo de estas características de la sequía así como del momento y la rapidez con que se establece. Las predicciones sobre el cambio climático apuntan hacia un aumento de la duración e intensidad de las sequías durante el s. XXI, asociadas con un régimen más irregular de las precipitaciones y con temperaturas más extremas y en general más cálidas (IPCC 2001). La heterogeneidad espacial de estas variables, especialmente de las relacionadas con el régimen de lluvias, es elevada, por lo que actualmente resulta difícil hacer predicciones para áreas concretas. No hay duda de que este cambio climático dará lugar a extinciones locales y cambios en la dominancia de las especies de muchos ecosistemas terrestres. La sequía limita el crecimiento y la supervivencia vegetal, actuando de filtro selectivo de especies según su tolerancia al estrés hídrico. Además afecta negativamente a la reproducción y altera los ritmos de producción de hojas, tallos, flores y frutos (fenología). A pesar de la aparente recuperación de las coberturas arbóreas tras las sequías inusualmente intensas, existen indicios de que las secas generalizadas dejan secuelas que persisten durante varios años (Peñuelas *et al.* 2000). La repetición cada vez más frecuente de los episodios de sequía puede acelerar estos cambios a nivel de comunidad (Valladares *et al.* 2004c).

En un estudio comparativo de la arquitectura hidráulica de nueve especies leñosas, se comprobó que mientras *Ilex aquifolium, Phillyrea latifolia* y *Juniperus oxycedrus* fueron resistentes a la cavitación del xilema provocada por la sequía, especies como *Quercus ilex, Arbutus unedo* y *Acer monspessulanum* fueron mucho mas vulnerables (Martinez-Vilalta *et al.* 2002b). Se observó además que esta diferente vulnerabilidad a la cavitación estuvo correlacionada con los potenciales hídricos que cada especie mostraba en el campo, confirmando la existencia de estrategias hídricas diferentes que hacen que especies que crecen juntas pasen la sequía estival con distintos niveles de estrés y con márgenes de seguridad ante embolias también diferentes. Análogas diferencias se han observado en *Quercus coccifera* y *Pistacia lentiscus* (Vilagrosa *et al.* 2003).

De los efectos de periodos cálidos y secos tenemos ejemplos como los del verano de 1994. Este verano dañó severamente muchos bosques y matorrales de la península Ibérica (80% de las 190 localidades peninsulares estudiadas presentaban especies dañadas (Peñuelas *et al.* 2001). Las encinas, por ejemplo, se secaron en muchas localidades (Lloret y Siscart 1995). En zonas del sistema Ibérico aragonés, se observaron defoliaciones intensas y cambios drásticos en la anatomía y el crecimiento, pero las encinas se recuperaron tras la sequía (Corcuera *et al.* 2004). Estudios isotópicos con ^{13}C y ^{15}N mostraron que durante los años posteriores estos encinares permanecieron afectados, de manera que presentaron un menor uso del agua que tenían disponible, y se favoreció la pérdida de los nutrientes del suelo (Peñuelas *et al.* 2000), una consecuencia secundaria grave teniendo en cuenta que estos ecosistemas suelen estar limitados por nutrientes (Rodá *et al.* 1999). La distinta severidad de los efectos sobre los diferentes bosques del país vino determinada entre otros factores por 1) la orientación de las pendientes (mayor daño en las solanas) (Peñuelas *et al.* 2001), 2) la litología del suelo (menor daño en los suelos profundos y penetrables por las raíces, como, por ejemplo, suelos sobre esquistos) (Lloret y Siscart 1995), 3) la especie dominante (Peñuelas *et al.* 1998), 4) la gestión forestal (bosques aclarados resultan menos afectados que los densos) (Gracia *et al.* 1999), 5) la existencia de incendios (especies rebrotadoras quemadas soportaron mejor la sequía que las adultas sin quemar) (Moreno *et al.* en prensa). El grado de daño fue diferente dependiendo del tipo funcional y de la historia evolutiva de las distintas especies (Peñuelas *et al.* 2001). Los géneros mediterráneos, *Lavandula, Erica, Genista, Cistus y Rosmarinus*, en su mayoría arbustivos y que se han diversificado bajo las condiciones climáticas mediterráneas, es decir, posteriormente a los 3.2 millones de años del Plioceno, fueron inicialmente más afectados por la sequía que los géneros evolucionados con anterioridad, *Pistacia, Olea, Juniperus, Pinus y Quercus*, mayoritariamente árboles, pero se recuperaron mucho mejor tras unos años de mayor disponibilidad hídrica. Un género alóctono como *Eucalyptus* fue fuertemente dañado por la sequía y no se recuperó en los años sucesivos. Las especies mediterráneas post-Pliocénicas parecen pues más resilientes a un ambiente difícilmente predecible con una gran variabilidad estacional e interanual (Cruz y Moreno 1999) y sujeto a sequías frecuentes (Fig. 2.5). Entender estas respuestas es importante para prever la futura composición de las comunidades en un escenario de cambio climático.

2.2.7. La importancia de las perturbaciones y su interacción con el clima

Muchos ecosistemas terrestres y en especial los mediterráneos han estado y están típicamente expuestos a perturbaciones que pueden ser episódicas, como las sequías intensas e incendios, o crónicas, como la sobre-explotación y la herbivoría. El fuego y, más tarde, el pastoreo influyeron muy significativamente en la evolución de la vegetación durante la segunda mitad del Holoceno. El incremento de la aridez supuso en ciertos casos poco más que una influencia de fondo. Dada la frecuencia e intensidad de las perturbaciones sufridas por los ecosistemas mediterráneos, la sensibilidad diferencial de las especies a las mismas es un mecanismo muy importante en la composición y en la dinámica espacial y temporal de las comunidades vegetales y animales. Pero el clima puede hacer variar significativamente el efecto de las

perturbaciones sobre los ecosistemas. Por ejemplo, el efecto de la herbivoría puede cambiar drásticamente bajo condiciones más xéricas (Milchunas *et al.* 1988). El sobrepastoreo genera, a corto plazo, el consumo de gran parte de la productividad primaria, y acelera la erosión del suelo. A largo plazo se produce un incremento en la abundancia de especies no palatables, además de un colapso generalizado de la regeneración de especies leñosas arbóreas. Los daños por herbivoría en la vegetación leñosa dependen de la cantidad de precipitación anual, siendo mayor el impacto en años secos (Zamora *et al.* 2004).

Las condiciones más cálidas y áridas, junto con el incremento de biomasa y su inflamabilidad y fundamentalmente los cambios en los usos del suelo, como el abandono de tierras de cultivo seguido de un proceso de forestación y acumulación de combustible, aumentan la frecuencia e intensidad de los incendios forestales. Los bosques y matorrales mediterráneos, caracterizados por una fuerte sequía estival, son ecosistemas propensos a los incendios. Los incendios, que han aumentado a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, constituyen ahora una de las perturbaciones más importantes en los ecosistemas de la vertiente norte mediterránea (Moreno *et al.* 1998, Piñol *et al.* 1998). Este incremento es en parte debido al abandono del campo y a la herencia de programas de reforestación con especies de pino que dan lugar a formaciones forestales muy combustibles. No obstante, la relación vegetación-fuego es compleja (Moreno y Vallejo 1999, Moreno *et al.* en prensa), Ojeda 2001; ver capítulo 12).El fuego es un importante factor ecológico que puede modificar intensamente la vegetación y el paisaje a escala histórica o evolutiva, ha actuado de filtro selectivo de especies vegetales y animales; a escala ecológica crea espacios abiertos, cambia la estructura del hábitat y la oferta alimenticia para la fauna, y determina mosaicos espaciales de regeneración que, según la escala espacial y la recurrencia de los incendios, pueden generar mayor diversidad. Se modifica la composición estructural de las especies y por lo tanto la de la comunidad en su conjunto, tal como se ha visto en la respuesta de especies vegetales mediterráneas bajo diferentes condicionantes de recurrencia de incendios simulada en el Parque Natural del Garraf en Cataluña (Lloret *et al.* 2003). Por otra parte, el aumento de la intensidad y frecuencia de los incendios y el efecto sinérgico de otras perturbaciones severas como el exceso de herbivoría ocasiona pérdidas de nutrientes del ecosistema, afecta negativamente a las especies de requerimientos forestales estrictos y a las que no tienen mecanismos adecuados de persistencia o dispersión, y puede producir finalmente una simplificación en la composición y la estructura de las comunidades (Ojeda 2001).

2.2.8. Efectos directos del aumento de CO_2 atmosférico

Todos estos factores ahora comentados, disponibilidad de agua, temperatura, incendios, VOC y nutrientes, interaccionan con el principal factor generador del cambio climático, el propio aumento de CO_2 atmosférico. Dado que el CO_2 es el sustrato de la fotosíntesis, sobre los efectos directos del aumento de CO_2 atmosférico se han llevado a cabo miles de estudios, en su mayoría realizados en escalas temporales cortas, condiciones controladas y con plantas jóvenes (Körner 2000). En general se observa un incremento de las tasas fotosintéticas, menores concentraciones tisulares de N y una reducción de la transpiración que conlleva una mayor eficiencia del uso del agua (Kirschbaum 2004). El efecto último del aumento de CO_2 depende, sin embargo, de la interacción con otros factores ambientales: temperatura, radiación, sequía, disponibilidad de nutrientes o presencia de contaminantes atmosféricos. Las respuestas al CO_2 son distintas dependiendo de las especies, e incluso de los genotipos (Castells *et al.* 2002), lo cual puede llevar a cambios a nivel de comunidad, a medida que aumenta la concentración de este gas. A nivel global, no hay duda de que el aumento de CO_2 estimulará la producción primaria neta, pero no hay consenso en la magnitud de ese efecto, ni en lo que puede pasar a largo plazo y menos aún en las complejas condiciones reales de los ecosistemas (Körner 1995, Körner 2000). Por ejemplo, las respuestas observadas podrían amortiguarse con el tiempo, y de hecho, en algunas plantas se ha constatado aclimatación de

la fotosíntesis y desaparición de las reducciones en las concentraciones de N tras seis años de crecimiento a alto CO_2 (Peñuelas *et al.* 1997). El incremento de CO_2 puede incrementar la síntesis de metabolitos secundarios en las plantas, lo cual podría dar protección contra plagas y patógenos, pero al aumentar la relación C/N podría estimular el consumo por herbívoros y empeorar la calidad de la materia orgánica del suelo (Sebastiá *et al.* 2003). En resumen, las tendencias esperables en las tasas fotosintéticas con un aumento de CO_2 se confirman en revisiones recientes, pero no así las tendencias sobre productividad primaria, la cual varía con la especie (Poorter y Navas 2003) e interacciona de forma compleja con otros recursos como el agua y el nitrógeno (Nowak *et al.* 2004). En el escalado al ecosistema la incertidumbre introducida por las diversos factores climáticos que operan junto al incremento de CO_2 aumenta (Norby y Luo 2004).

2.2.9. Capacidad de las especies de evolucionar y de adecuarse por plasticidad fenotípica

Desde un punto de vista evolutivo las especies tienden a hacerse conservadoras y a responder a las perturbaciones más con la migración que con la adaptación. Pero la migración en el paisaje fragmentado de la actualidad es poco probable. La lentitud de algunos procesos ecológicos, como los de la regeneración natural de ciertas especies del género *Quercus*, compromete la viabilidad a largo plazo del ecosistema ya que una de las características del cambio climático es la aceleración de la tasas de cambio. Los procesos microevolutivos pueden darse en plazos de tiempo cortos en sistemas dinámicos como las lagunas temporales y compensar así los efectos negativos de una tasa de cambio ambiental muy rápida. Pero estos procesos no son operativos para especies longevas y de lento crecimiento como encinas y robles, esenciales en muchos de nuestros ecosistemas terrestres (Rice y Emery 2003). La capacidad de adaptación ecofisiológica a las condiciones ambientales locales es notable en la mayoría de las especies vegetales, pero el problema es la rápida tasa de cambio ambiental, sobre todo para especies leñosas donde los ajustes evolutivos pueden requerir de 200 a 1200 años para ser efectivos, como ha sido estimado en *Pinus contorta* (Rehfeldt *et al.* 2001) Si las plantas no pueden seguir el cambio climático por evolución, pueden atenuar los efectos adversos de éste mediante respuestas a corto plazo (aclimatación, plasticidad fenotípica). Pero la plasticidad no ha sido en general maximizada durante la evolución en sistemas adversos (e.g. zonas áridas o pobres en nutrientes o sometidas a extremos climáticas) sino que las especies de estas zonas tienden a realizar un uso conservativo de los recursos que implica una plasticidad moderada (Valladares *et al.* 2002). Por ello cabe pensar que la capacidad de ajuste fisiológico y morfológico a nuevas condiciones climáticas está en principio limitada para ciertas especies o poblaciones de zonas mediterráneas y quizá también para algunas especies de alta montaña y de suelos oligotróficos.

2.2.10. Sensibilidad de los ecosistemas al cambio climático en un marco de interacciones

Los ecosistemas se caracterizan por la existencia de interacciones tanto entre factores bióticos y abióticos como entre las propias especies vegetales y animales que los componen. Si la información sobre la sensibilidad al cambio climático es deficitaria para muchas especies, aún lo es más si se quieren tener en cuenta estas interacciones. No obstante, estas interacciones son cruciales para interpretar la sensibilidad de los ecosistemas. Por ejemplo, si una determinada especie requiere de la intervención de otra especie para completar su ciclo vital (e.g. un polinizador para una planta), de poco nos sirve el conocimiento de la sensibilidad al clima de la primera si no sabemos la sensibilidad de la segunda. Los cambios en la fenología y la distribución de muchas especies contribuirán a separar en el espacio y/o en el tiempo a especies que hasta ahora coincidían en los mismos hábitats, pero también a poner en contacto a especies que hasta ahora no interaccionaban. Es decir, el cambio climático está favoreciendo tanto la ruptura de interacciones como el establecimiento de nuevas interacciones. Un ejemplo

de nuevas interacciones se está observando en las montañas mediterráneas con el comportamiento de la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*), un defoliador de diversas especies de pino (Hódar y Zamora 2004). Las interacciones son cruciales para interpretar la sensibilidad de los ecosistemas al cambio climático ya que en el caso del pino silvestre (*Pinus sylvestris*) por ejemplo, las poblaciones autóctonas de la variedad endémica de Sierra Nevada parecen poder resistir bien los cambios climáticos recientes, pero el incremento de las temperaturas invernales está provocando que la procesionaria ascienda altitudinalmente, infestando a las poblaciones autóctonas de pino silvestre situadas en las zonas más altas (Hódar *et al.* 2003). Los estudios de las interacciones entre plantas revelan un patrón general de cambio designo de negativo (competencia) en condiciones favorables a positivo (facilitación o mutualismo) en condiciones adversas o de estrés (Pugnaire y Luque 2001). En repoblaciones experimentales realizadas a lo largo de un amplio gradiente ambiental en Sierra Nevada se ha encontrado que la magnitud de la facilitación de arbustos pioneros sobre plantones de especies leñosas se acrecienta a baja altitud y en exposiciones de solana, donde el estrés abiótico es mayor (Gómez-Aparicio *et al.* 2004). Por el contrario, a mayores altitudes y en exposiciones norte, con temperaturas mas bajas durante el verano y sobre todo mayor precipitación, la facilitación del matorral es mucho menos evidente. Estudios recientes señalan que el tipo de interacción puede ser también negativo cuando el estrés es muy intenso y no sólo cuando las condiciones son favorables (Maestre y Cortina 2004) (Fig. 2.2).

Fig. 2.2. *Interacción entre especies en función del estrés abiótico. Mientras diversos estudios muestran que a medida que el estrés aumenta la interacción entre distintas especies de plantas de una comunidad pasa de competencia a facilitación (flecha roja), en condiciones de estrés muy intenso puede darse competencia al igual que en condiciones de poco estrés. La línea negra indica el efecto relativo de Stipa tenacissima en la supervivencia de plántulas de Pistacia lentiscus en función de la lluvia caída en primavera y verano en el semiárido de Alicante (elaborado de Maestre y Cortina 2004). El cambio climático tiene, por tanto, efectos no sólo cuantitativos sino también cualitativos en las interacciones entre organismos (signo de la interacción).*

Existen evidencias actuales de cambios temporales en la magnitud y sentido de las interacciones, por ejemplo entre *Pinus halepensis* y especies arbustivas rebrotadoras, que probablemente están relacionadas con la variación interanual de las condiciones climáticas (Maestre *et al.* 2003). En cualquier caso, es claro que el cambio climático afectará a la intensidad y al signo de la interacción entre especies y una fuente adicional de evidencias al

respecto son los estudios fenológicos que revelan ya desfases temporales entre niveles tróficos con consecuencias profundas pero impredecibles en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Fig. 2.3).

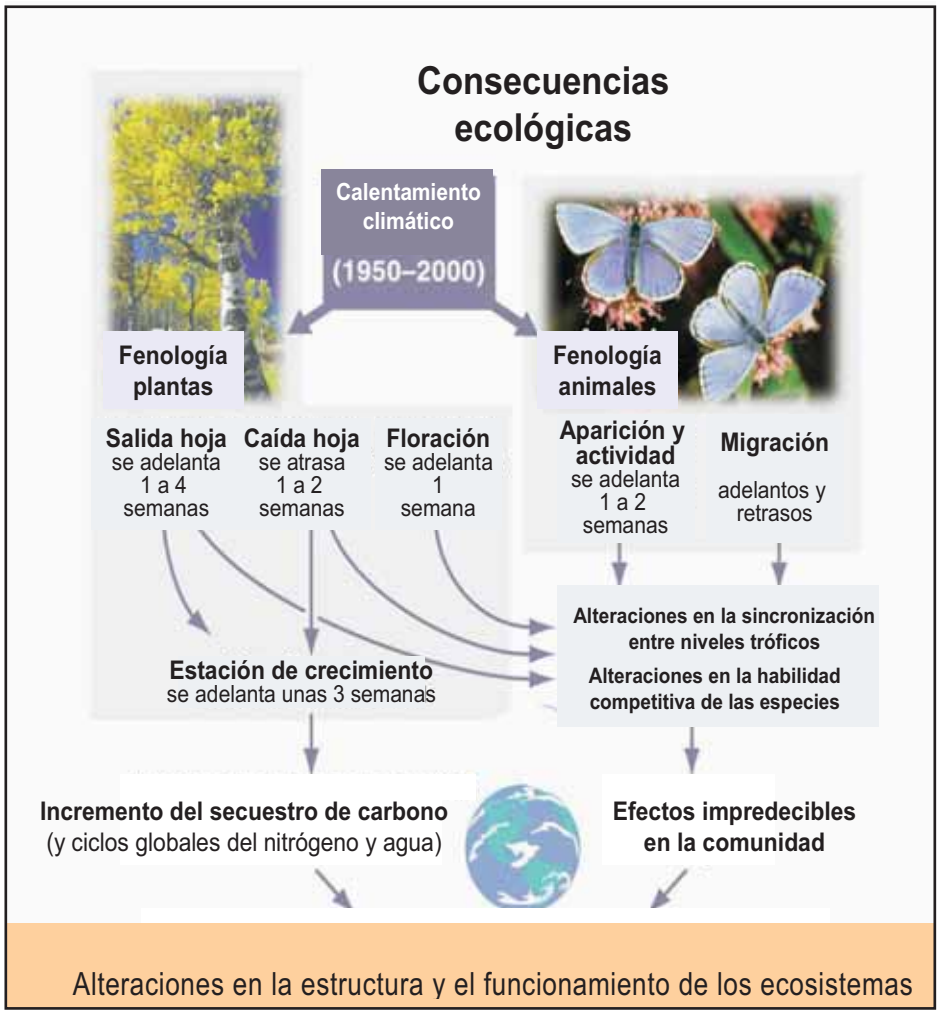


Fig. 2.3. *Efectos ecológicos de los cambios fenológicos producidos por el cambio climático. (Tomado de Peñuelas y Filella 2001).*

Pero no sólo las especies interaccionan, sino también los factores que influyen sobre los procesos. Los dos cambios climáticos principales, el incremento de la temperatura y la modificación del régimen de precipitaciones interaccionan dando lugar a sinergias, cuando ambos detienen o aceleran un proceso, pero con más frecuencia a antagonismos, cuando el efecto de uno tiene un signo contrario al del otro (e.g. sobre la productividad vegetal o la actividad microbiana del suelo, ya que mientras la temperatura incrementa la actividad, la sequía la disminuye). Otros factores que interaccionan y merecen particular atención son por ejemplo la radiación y la sequía. Con el abandono del campo y el oscurecimiento general de la atmósfera por el incremento de aerosoles y nubosidad, cada vez hay menos luz disponible para la regeneración y crecimiento de las plantas (Valladares *et al.* 2004a). La combinación de este oscurecimiento con el incremento de la sequía da lugar a una creciente frecuencia de sombras secas que imponen una doble limitación a la regeneración de muchas especies vegetales y sobre lo cual aún sabemos muy poco (Valladares y Pearcy 2002, Valladares 2003, Valladares *et al.* 2004b). Aunque hay que tener en cuenta que por debajo de un determinado umbral

hídrico, la cubierta vegetal disminuye dando paso a mas radiación hacia el sotobosque o las capas inferiores del dosel.

2.2.11. Sensibilidad de los ecosistemas terrestres insulares

Los ecosistemas insulares terrestres sufren en general un mayor riesgo de extinciones y alteraciones funcionales que sus homólogos continentales, tanto mayor cuanto menor es la extensión de la isla. Los ecosistemas insulares españoles (principalmente las islas Baleares y Canarias) son ricos en especies endémicas, muchas de los cuales son sensibles a cambios ambientales bruscos. Algunos de estas especies como *Rhamnus ludovici-salvatoris* de Baleares, presentan una tolerancia escasa a la sequía y un rendimiento fotosintético pobre cuando se compara con especies no endémicas con las que coexiste como *R. alaternus, Quercus ilex, Q. humilis, Pistacia lentiscus* y *P. terebinthus*, lo cual se ha interpretado como consecuencia de su carácter relicto y recesivo (Gulías *et al.* 2002). Las especies vegetales de la laurisilva canaria, un ecosistema que ocupa en la actualidad áreas pequeñas y fragmentadas, son relictos de climas menos áridos y por tanto su sensibilidad al cambio climático es en principio alta. De hecho algunas especies de la laurisilva como *Persea indica* pueden ser empleadas como indicadoras del cambio climático (Larcher *et al.* 1991). Varias de las principales especies de estas formaciones tienen una escasa capacidad para regular la pérdida de agua por transpiración, por lo que son muy sensibles a una disminución de la disponibilidad hídrica (Zohlen *et al.* 1995, Cermak *et al.* 2002). Los intensos cambios de uso, la presión sobre los ecosistemas debida al desarrollo del turismo y la reiterada introducción de especies exóticas, muchas de las cuales devienen invasoras, son amenazas importantes que hacen a los ecosistemas terrestres insulares más sensibles al cambio climático. Otros ecosistemas insulares que comparten hasta cierto punto los rasgos y sensibilidades mencionadas son los sistemas aislados o fragmentados en general y las denominadas islas edáficas en particular. Entre estas últimas cabe mencionar los ecosistemas de yesos, los de suelos serpentínicos y los de saladares. Estos sistemas son muy valiosos por su riqueza en endemismos y constituyen reservas naturales de biodiversidad que están amenazadas no sólo por la escasa protección que tienen y la nula concienciación sobre su importancia, si no por el propio cambio climático: estas ecosistemas están en cierta forma inmovilizados por su dependencia edáfica y cuentan con numerosas especies de dispersión poco eficaz (Escudero *et al.* 2000).

2.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

2.3.1. Migraciones altitudinales y latitudinales

La vegetación arbórea de Europa ha migrado latitudinal y altitudinalmente en los distintos periodos geológicos como respuesta a los cambios climáticos registrados. Las principales especies leñosas europeas migraron en latitud durante las glaciaciones con tasas de entre 50 y 500 metros por año, excepcionalmente mas de un kilómetro al año en los géneros *Acer, Alnus, Carpinus* y *Ulmus* (Huntley y Webb III 1988). El límite superior del bosque, el que se encuentra limitado por temperatura, ha avanzado en los periodos más favorables del Holoceno entre uno y tres centímetros al año y en los Pirineos centrales se han registrado avances de entre 20 y 80 centímetros al año durante el último siglo (Camarero 1999). El cambio climático previsto permitiría la expansión de especies termófilas, pero la alteración en la manifestación de las precipitaciones con sequías fisiológicas recurrentes, frenaría este avance, comprometería a las especies poco tolerantes a la sequía y afectaría negativamente al límite inferior del bosque (limitado por disponibilidad hídrica). La vegetación leñosa podría extenderse hacia las zonas más altas de las montañas y las comunidades que ya se encuentran en estas zonas altas se extinguirían. En muchos casos, la única migración posible es hacia latitudes norteñas. Pero las tasas de migración no serían eficaces en el actual escenario de cambio global, ya que por un

lado el clima cambia demasiado deprisa y por otro lado el territorio se encuentra muy fragmentado, lo cual restringe significativamente la posibilidad real de migraciones latitudinales o altitudinales de la vegetación. También debe señalarse que la Península Ibérica es el límite sur para la distribución de muchas especies (e.g. *Pinus sylvestris*, *P. uncinata*) cuyas poblaciones relícticas meridionales están con frecuencia aisladas en macizos montañosos, pero en sentido contrario también es el límite septentrional de otras especies como *Abies pinsapo*.

En las montañas, las especies pueden responder al cambio climático migrando verticalmente distancias cortas (por ejemplo, son suficientes 500 m para contrarrestar un aumento de 3°C). En nuestro país y por lo general en todo el planeta, ya se han apreciado mediante estudios paleoecológicos numerosos desplazamientos de las áreas de distribución de algunas especies y formaciones vegetales en respuesta a cambios climáticos pretéritos. Pero todavía no hay demasiadas evidencias en respuesta al calentamiento actual. Recientemente se ha comparado la distribución de la vegetación actual del Montseny con la de 1945 y se ha podido apreciar una progresiva sustitución de los ecosistemas templados (e.g. hayedos) por los mediterráneos (e.g. encinares) (Peñuelas y Boada 2003) (Fig. 2.4). Además, han aumentado los hayedos en las altitudes máximas (1600-1700 m). También los brezales de *Calluna vulgaris* están siendo reemplazadas por las encinas a altitudes medias, de manera que la encina se encuentra ya hasta alturas tan inesperadas como los 1400 m (Peñuelas y Boada 2003). Algo similar se ha observado en el macizo de Peñalara, en la Sierra de Guadarrama, donde los arbustos (*Juniperus* y *Cytisus*) son cada vez más abundantes en altitudes donde antes predominaban los pastos (Sanz-Elorza *et al.* 2003) (Fig. 2.4). Es preciso recordar que con respecto a las montañas, la migración hacia mayores altitudes comporta una reducción concomitante en el área total de cada hábitat, por lo cual las especies con un mayor requerimiento de área pueden extinguirse. Sin embargo, estas observaciones de migraciones altitudinales de especies vegetales clave en los ecosistemas terrestres deben analizarse con cautela ya que los efectos no son sólo atribuibles al cambio climático. El descenso en la cabaña ganadera, con la consiguiente reducción de la presión de herbivoría, y otros cambios en el uso del territorio están hasta cierto punto implicados en estas migraciones.

Los análisis de las relaciones entre el crecimiento de los árboles y la composición isotópica de los anillos con el clima indican que el aumento observado en la variabilidad de esta relación está asociado con la tendencia hacia un aumento de la variabilidad de las oscilaciones meteorológicas a escala intra- e inter-anual, e inter-decadal (Camarero y Gutiérrez 2004). La respuesta sincrónica de los árboles a un número menor de variables ambientales se entiende como una reducción del número de variables climáticas limitantes, las cuales a su vez son más estresantes. Su efecto se traduce también en un menor establecimiento con éxito de los árboles por encima del límite del árbol en lugares no perturbados directamente por acciones antrópicas. Así, la relación negativa entre la tasa de avance del límite del árbol con la variabilidad de las temperaturas de algunos meses (e.g. marzo) sugiere que el ascenso de los árboles a cotas más altas por aumento de temperatura (en sitios concretos de los Pirineos para los que existe información) está limitado.

2.3.2. Expansión de plagas y especies invasoras

El cambio climático alterará las interacciones entre especies, poniendo en muchos en contacto especies que apenas interaccionaban. Algunas de estas nuevas interacciones serán de parasitismo teniendo el cambio climático un impacto doble (*per se* y a través del parásito) en la especie huésped. En los escenarios previstos de cambio climático ciertas plagas termófilas como la procesionaria del pino podrán expandirse y en el caso de las montañas llegar a especies o poblaciones que nunca se habían visto afectada por ella. Por ejemplo, el impacto del cambio climático en las poblaciones autóctonas de pino silvestre en ciertas montañas

mediterráneas estaría mediado por la procesionaria, propia hasta ahora de altitudes inferiores, con la que la interacción es cada vez mas frecuente, y no tanto por los efectos directos del propio cambio climático en esta especie de pino (Hódar *et al.* 2003). Las especies invasoras son especies exóticas introducidas voluntaria o involuntariamente por el ser humano que son capaces de mantener sus poblaciones de forma autónoma, extenderse y alterar diversos procesos ecosistémicos clave (productividad, ciclos biogeoquímicos, etc.) (Mooney y Hobbs 2000).

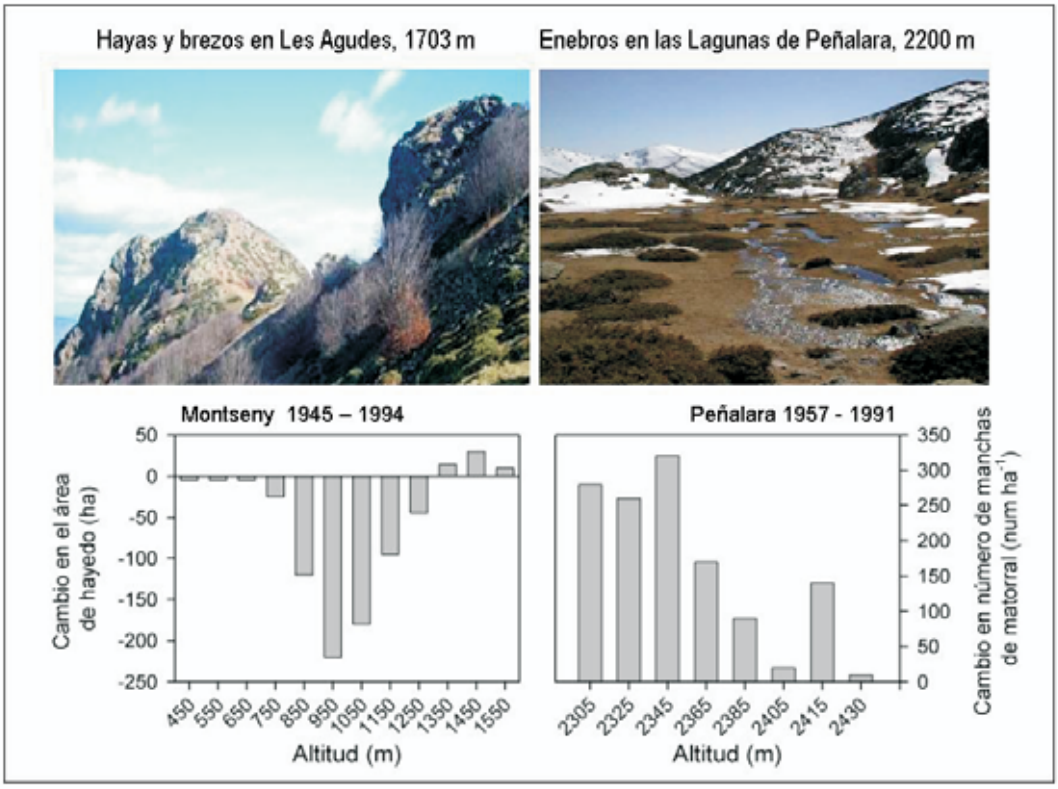


Fig. 2.4. *Migración altitudinal de formaciones vegetales en dos montañas (Macizo del Montseny, Barcelona, y del Peñalara, Sierra de Guadarrama, Madrid) durante la segunda mitad del siglo XX. En Montseny se muestran los cambios en la superficie de los bosques de hayas para un periodo de 49 años de progresivo calentamiento y cambios en los usos del suelo (tomado de (Peñuelas y Boada 2003), mientras que en Peñalara se muestra el incremento en el número de manchas de arbustos por hectárea tras 34 años (elaborado a partir de promedios de los transectos SW-NE y W-E de Sanz-Elorza et al. 2003).*

Las especies vegetales invasoras tienen un gran impacto potencial sobre la regeneración y dinámica natural de muchos ecosistemas terrestres pero existe poca información específica sobre el impacto que el cambio climático podría tener sobre las invasiones biológicas (Valladares *et al.* 2004a). Todo apunta no obstante a un recrudecimiento de estas invasiones (Dukes y Mooney 1999). Las alteraciones climáticas favorecerán aquellas especies invasoras que muestran un comportamiento más plástico que sus homólogas no invasoras. Se ha visto que ciertas especies o poblaciones invasoras presentan una mayor plasticidad fenotípica que las especies autóctonas con las que coexisten o que las poblaciones no invasoras de esas mismas especies. Esto se ha observado en comparaciones de poblaciones relictas de *Rhododendron ponticum* del sur de España y poblaciones invasoras en Europa central (Niinemets *et al.* 2003).

En ciertos casos, el cambio climático *per se,* y no su variabilidad, beneficiará a las especies invasoras. Es previsible una expansión de plantas invasoras tanto en claros como en sotobosques, particularmente si se dan condiciones de alto CO_2 y alto nitrógeno o cualquiera de ambas. Muchas plantas invasoras son eficaces colonizadoras de claros y zonas soleadas por su gran eficiencia fotosintética a pleno sol pudiendo desplazar activamente a las especies autóctonas en estas condiciones (Pattison *et al.* 1998), mientras que otras invaden eficazmente el sotobosque en parte porque se benefician proporcionalmente más de un incremento de CO_2 (Hattenschwiler y Korner 2003) o de nitrógeno en el suelo (Siemann y Rogers 2003) en condiciones de sombra que las especies nativas. Los efectos indirectos del cambio climático sobre las invasiones vía funcionamiento de los ecosistemas podrían favorecer selectivamente a las invasoras sobre las especies nativas aunque la información disponible es aún muy escasa. La tolerancia a la sequía de ciertas plantas invasoras podría darles ventajas competitivas también en condiciones de sombra seca (Valladares *et al.* 2004a).

2.3.3. Cambios en especies dominantes y disminución de la productividad con la sequía

Si es poco probable el movimiento de la vegetación en altitud y latitud, entonces la sequía y los extremos climáticos producirán cambios en las comunidades y podrán dar lugar a la extinción local de las especies peor adaptadas. Los cambios en las especies dominantes de una comunidad conllevan cambios en la productividad de la misma, como se ha visto en la productividad de las herbáceas que crecen bajo distintos arbustos en zonas semiáridas del sur de la Península Ibérica (Pugnaire *et al.* 2004). Por tanto, estos cambios pueden afectar significativamente al almacenamiento de carbono por la vegetación. La progresiva crisis hídrica se verifica ya en algunos encinares, y también en pinares y otros bosques mediterráneos, que se encuentran en su límite hídrico, con tasas de evapotranspiración iguales a las de precipitación (Peñuelas 2001). En estos bosques el recrudecimiento de la aridez durante el verano podría ser la causa última o, al menos, un factor de predisposición a la muerte masiva del arbolado. Ya hay claros indicios de que el aumento de la aridez y de la temperatura no sólo afectará negativamente a la productividad primaria neta de las especies vegetales ahora presentes sino que inducirá su sustitución por otras más resistentes a las nuevas condiciones climáticas (Peñuelas *et al.* 2001, Martinez-Vilalta *et al.* 2002a). Por ejemplo, el incremento de la aridez climática puede comprometer la supervivencia de varias poblaciones de *P. sylvestris* de la cuenca Mediterránea (Martínez-Vilalta y Piñol 2002) y especies como *Quercus coccifera* y *Q. ilex* podrían ir siendo desplazadas por especies más resistentes a la sequía como *Pistacia lentiscus* y *Phyllirea latifolia* (Filella *et al.* 1998, Ogaya y Peñuelas 2003, Vilagrosa *et al.* 2003). A partir de las estrategias hídricas de los principales grupos funcionales de plantas leñosas mediterráneas se plantea que las primeras extinciones locales amenazarían a los esclerófilos lauroides relictos del Terciario (e.g. *Myrtus, Arbutus, Viburnum*), seguidos por los esclerófilos arbóreos (e.g. especies de *Quercus*), mientras que los que se verían menos afectados o incluso favorecidos serían los caméfitos (e.g. tomillos), los malacófilos xerofíticos (e.g. jaras) y en general los arbustos caducifolios de verano (Fig. 2.5). En las zonas de la Península que ya se encuentran en el límite climático para formaciones vegetales como tomillares y salviares, el cambio climático puede implicar una desaparición permanente de la cubierta vegetal y una desertificación, como la que ya se empieza a observar en romerales semiáridos de Murcia donde no se ha registrado re-colonización diez años después de cortar la vegetación (Castillo *et al.* 1997). A más corto plazo que el remplazamiento de grupos funcionales, se registrarían cambios en las dominancias relativas de las especies leñosas del bosque, cambios que ya se están registrando y confirman las predicciones.

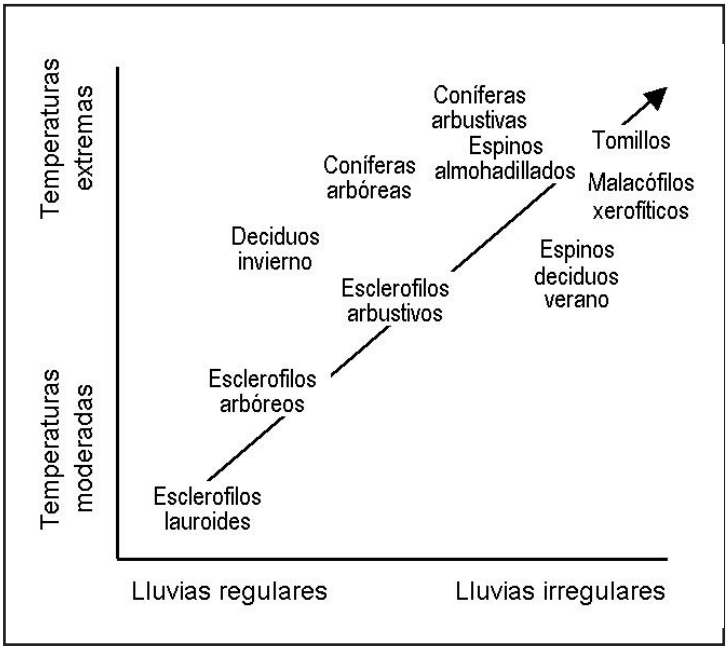


Fig. 2.5. *Distribución de los principales grupos funcionales de plantas leñosas mediterráneas según condiciones climáticas e impacto relativo del cambio climático sobre sus poblaciones (flecha). La ordenación de estos grupos según la regularidad de las precipitaciones (correlacionada con la aridez) y los extremos térmicos (continentalidad, olas de calor) indica que los esclerófilos lauroides (relictos del Terciario) serían los primeros en verse afectados por el cambio climático llegando a desaparecer al menos localmente. Sin embargo, los caméfitos como los tomillos y los arbustos malacófilos como las jaras (aparecidos tras el establecimiento del clima mediterráneo en el Plioceno) serían los menos afectados. En situaciones de inviernos fríos, los esclerófilos sufrirán un impacto proporcionalmente mayor que las coníferas y los árboles y arbustos caducifolios. (Tomado de Valladares et al. 2004c).*

Los experimentos de sequía y calentamiento llevados a cabo en el Garraf (Barcelona) indican que la sequía hace disminuir el número de plántulas y su respectiva riqueza de especies a corto plazo. Esta disminución también se da, pero en proporciones mucho menores, en el tratamiento de calentamiento en estos mismos experimentos. Este efecto se produce principalmente en la germinación, y una vez la plántula se ha establecido, su supervivencia está poco afectada por los tratamientos. Por lo general, las especies que actualmente producen menos plántulas son las que tendrían más probabilidades de desaparecer en un escenario climático más seco (Fig. 2.6). Sin embargo, cuando las condiciones son más severas, hay indicios de que la respuesta de las especies puede ser en algunos casos independiente de la abundancia actual de sus plántulas, es decir, idiosincrásica (Lloret *et al.* 2004).

En un experimento consistente en la exclusión parcial del agua de lluvia y de la escorrentía superficial, (disminución de un 15% de la humedad del suelo) se observaron respuestas diferenciales entre las especies dominantes, dentro de la tendencia general de reducción del crecimiento con la sequía en un bosque dominado por *Quercus ilex, Phillyrea latifolia* y *Arbutus unedo*. La disminución de humedad edáfica retardó los ciclos del agua, del C, del N y del P, y afectó la ecofisiologia y demografía de las especies. Algunas especies resultaron bastante sensibles como *Arbutus unedo* y *Quercus ilex*, mientras que otras como *Phillyrea latifolia* no experimentarían ninguna disminución apreciable en su crecimiento diametral (Ogaya y Peñuelas 2003, Ogaya *et al.* 2003). La mortalidad de los individuos mostró un patrón parecido, puesto que *Arbutus unedo* y *Quercus ilex* mostraron una mortalidad más elevada que *Phillyrea latifolia*. Bajo esas condiciones de sequía, la acumulación de biomasa aérea total del bosque menguó un 42%, poniendo de manifiesto que bajo condiciones más áridas que las actuales, los bosques mediterráneos pueden ver bastante disminuidas sus tasas de crecimiento. Además,

dado que no todas las especies vegetales resultarían igualmente afectadas, a largo plazo podría haber un cambio en la composición específica del bosque, resultando más favorecidas las especies más resistentes a la sequía. En este experimento, se ha estudiado también la aparición y supervivencia de nuevas plántulas de *Quercus ilex* y *Phillyrea latifolia*. Estas especies presentan distintas estrategias de reclutamiento en el bosque estudiado: plántulas de rebrote y de germinación de semilla, respectivamente. Los resultados indican que la aparición de nuevas plántulas de *Phillyrea latifolia* está más afectada por la sequía que el crecimiento de nuevos rebrotes de encina. Estas diferencias desaparecen, sin embargo, con el desarrollo de las nuevas plantas, de manera que la supervivencia de plántulas y rebrotes es parecida pocos años después. Estos resultados indican que los efectos de la seguía son más importantes en las fases iniciales del desarrollo. Aun así, las diferencias entre especies varían con la fase de desarrollo: los adultos de encina parecen menos resistentes a la sequía que los de *Phillyrea latifolia*, pero las pautas de reclutamiento son las contrarias. La cosa se complica todavía más si consideramos que la supervivencia de nuevas plántulas de muchas de estas especies, como por ejemplo la encina, depende de encontrar condiciones en las que no queden expuestas en exceso a la radiación, sobre todo en los estadios iniciales. Si disminuye mucho la cobertura arbórea debido al cambio climático, también puede que disminuya la disponibilidad de áreas dónde las plántulas se puedan instalar.

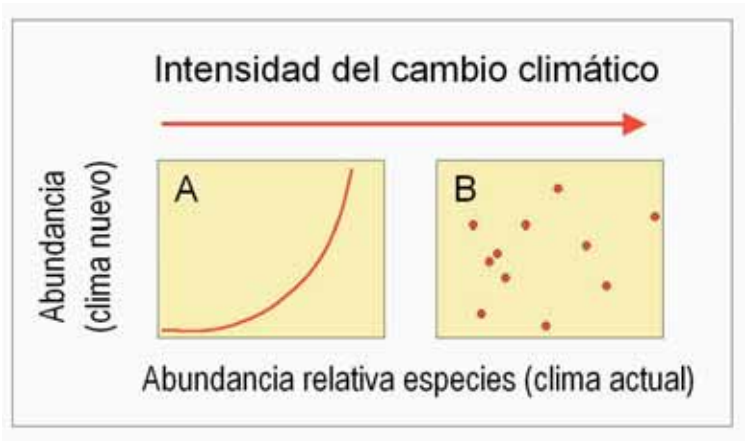


Fig. 2.6. *Efectos del cambio climático sobre la diversidad de plántulas en simulaciones experimentales de sequía e incremento de temperatura en matorrales mediterráneos en El Garraf (Barcelona). Los resultados tras cuatro años indican que cuando el cambio climático es moderado (A) las especies más abundantes en condiciones climáticas actuales tienen mayor probabilidad de supervivencia que las especies poco abundantes dando lugar a un empobrecimiento predecible de las comunidades, mientras que cuando el cambio es más extremo (B) no existe relación entre la abundancia en el clima actual y la abundancia en las nuevas condiciones climáticas (Elaborado de Lloret et al. 2004).*

Los estudios realizados mediante reducción de la precipitación y calentamiento nocturno pasivo de los ecosistemas revelan que la magnitud de la respuesta al calentamiento y a la sequía es muy diferente dependiendo de las condiciones del lugar de estudio. Los sitios fríos y húmedos, como son los del Norte de Europa, son más sensibles al calentamiento, mientras que nuestro país, más cálido y más seco, es más sensible a la sequía. También depende de la estación del año: los procesos son más sensibles al calentamiento en invierno que en verano, y una vez más las respuestas son también dependientes de la especie, e incluso del individuo (Peñuelas *et al.* 2004b). La sequía tendrá impactos similares en pastizales y comunidades herbáceas en general, donde la estacionalidad de las precipitaciones es tan o mas importante que la cantidad de precipitación caída en el año. Se ha visto que la sequía, en particular la de otoño, condiciona la germinación diferencial de las especies y lleva a un empobrecimiento de las comunidades pratenses, con efectos similares en comunidades de distintos estadios sucesionales y situaciones topográficas (Espigares y Peco 1995, Figueroa y Davy 1991). La

modelización de las tendencias y fluctuaciones de la diversidad de las comunidades herbáceas anuales mediterráneas revelan que aunque un 33% de las especies tienen un comportamiento sucesional, la gran mayoría responden a la heterogeneidad temporal asociada con las precipitaciones así como a la heterogeneidad espacial generada por la topografía (Peco *et al.* 1998). Las praderas subalpinas de los Pirineos también se verán afectadas por el cambio climático. Recientes estudios revelan que el calentamiento empobrece estas comunidades, alterando su funcionamiento y las relaciones competitivas entre las especies, favoreciendo cambios en la dominancia y un aumento de la productividad aérea pero no de la subterránea (Sebastiá *et al.* 2004).

2.3.4. Desajustes en los ciclos biogeoquímicos y en las reservas hídricas del suelo

A pesar de que a corto plazo la sequía retrasa la descomposición de la hojarasca, la descomposición no se ha visto afectada a largo plazo en experimentos de reducción de precipitación y calentamiento nocturno pasivo. Los cambios de temperatura y de humedad alteraron no sólo los ciclos del carbono, sino también los del N y los balances de energía (Peñuelas *et al.* 2004b). Las simulaciones más completas del efecto del cambio climático en sistemas forestales españoles se han realizado para formaciones mediterráneas (principalmente encinares) en Cataluña, con información estructural del bosque obtenida de Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (Gracia *et al.* 2000). En simulaciones para los próximos cuarenta años, la producción neta del ecosistema variará poco pese a que sus componentes incrementarán considerablemente (la producción bruta en el año 2040 se incrementará en un 56% respecto a la actual y la respiración total lo hará en un 58%). Al incremento de la respiración contribuye el incremento de la producción de hojarasca, que aumentará un 84 %, en parte como consecuencia de la reducción de la vida media de las hojas de los perennifolios, que pasa del valor promedio actual de 2,6 años a un valor de 1,9 años en el 2040. Estos cambios fenológicos comportan importantes cambios fisiológicos y en particular un incremento de la transpiración anual. Como consecuencia, la reserva hídrica en los suelos forestales, que es hoy de 32 mm (l/m^2) cuando se considera el promedio anual en cada punto, pasa a ser de sólo 24 mm, lo que representa una disminución del 25% de la reserva hídrica; este hecho es particularmente crítico en un ambiente con déficit hídrico estival como es ahora la región mediterránea. A pesar de lo que han revelado los estudios ecofisiológicos a nivel foliar, la eficiencia en el uso del agua de todo el ecosistema disminuye con el estrés hídrico, debido principalmente a que la ganancia de carbono disminuye cerca de un 90% durante la sequía como ha sido determinado en diversos encinares europeos (Reichstein *et al.* 2002).

2.3.5. Disminución de la capacidad de secuestro de carbono

La estima del balance de carbono de los matorrales y bosques se hace más compleja por el efecto de la sequía, que altera en cascada diversos procesos ecofisiológicos y funcionales del dosel. Sequías inducidas experimentalmente en encinares han puesto de manifiesto que bajo condiciones más áridas que las actuales, los bosques mediterráneos menguarán bastante sus tasas de crecimiento y por lo tanto, su capacidad para secuestrar carbono atmosférico (Ogaya y Peñuelas 2003). A pesar de las incertidumbres existentes, parece claro que la eficiencia en el uso del agua de los bosques mediterráneos disminuirá con la sequía y que el balance de carbono tenderá a hacerse positivo (el bosque se vuelve fuente de CO_2) no sólo durante el verano, sino también en años secos y cálidos (Gracia *et al.* 2001, Joffre *et al.* 2001, Reichstein *et al.* 2002). Dado el importante papel de las condiciones hídricas y térmicas del suelo en la respiración del ecosistema, el balance neto de carbono durante los periodos secos dependerá de la duración e intensidad de la sequía y de la cantidad de agua disponible para las raíces de los árboles en las capas profundas del suelo (Pereira *et al.* 2002). Los resultados de la simulación del balance de carbono en escenarios de cambio climático para los bosques de Cataluña revelan que su papel como sumideros de carbono de nuestras formaciones forestales

puede verse seriamente comprometido durante las próximas décadas (ver Capítulo 9, Sector Forestal). Pero no sólo los bosques secuestran carbono. Aunque los bosques son los que mayor capacidad tienen de almacenar el carbono en la parte aérea, otras formaciones como los pastizales, tienen una gran capacidad de almacenar el carbono en la parte subterránea. En el caso de los pastizales pirenaicos se ha visto que el abandono de las prácticas tradicionales lleva a una disminución de su capacidad de secuestrar y almacenar carbono (Casals *et al.* 2004).

2.3.6. Incremento del impacto de las perturbaciones

Las perturbaciones ya sean crónicas o episódicas tendrán un impacto creciente debido a que tendrán lugar sobre ecosistemas sometidos a estrés por el cambio climático. La mayor frecuencia de perturbaciones episódicas, como las sequías intensas, en combinación con perturbaciones crónicas como la herbivoría, previsiblemente van a exacerbar la degradación de la vegetación mediterránea y acelerar los procesos de erosión (Zamora *et al.* 2004). La perturbación sobre la que hay más información y sobre la que se han realizado mas modelizaciones y predicciones en la Península Ibérica es el fuego. La evolución climática hacia extremos más cálidos y áridos, con un incremento de biomasa y de inflamabilidad en respuesta al aumento de CO_2, unida al abandono de tierras de cultivo, la forestación y el acúmulo de combustible, incrementará la intensidad y, sobre todo, la frecuencia de los incendios, reestructurando el equilibrio del carbono (Peñuelas 1996). La capacidad de respuesta de las especies vegetales a estos cambios en el régimen de incendios determinará en buena medida la alteración de la estructura de los ecosistemas y su patrón de respuesta a cambios en el clima y en el régimen de perturbaciones. Si bien puede admitirse que muchas comunidades y plantas mediterráneas son resistentes a perturbaciones severas como el fuego o la roza (Cruz *et al.* 2003, Calvo *et al.* 2002), la capacidad de respuesta de las plantas varía mucho según el tipo y severidad del incendio, el tipo básico de regeneración de las especies constituyentes (e.g. rebrotadoras frente a germinadoras, Ojeda 2001) o el nivel de resistencia de los individuos (especies rebrotadoras) o de las poblaciones (especies germinadoras) a fuegos muy frecuentes o fuegos seguidos por una carga de herbivoría excesiva (Ojeda 2001). Así pues, una alteración en el régimen de frecuencia de perturbaciones puede producir cambios drásticos en la composición y estructura de comunidades aparentemente resistentes a las perturbaciones, como al parecer ha ocurrido en melojares (formaciones de *Quercus pyrenaica*, una especie rebrotadora (Luis-Calabuig *et al.* 2000) de la cuenca del Duero y como se ha puesto de manifiesto mediante el aumento experimental de la frecuencia de incendios (Calvo *et al.* 2002). En términos generales, el aumento de la frecuencia de incendios aumentará la expansión de especies netamente germinadoras y heliófilas, intolerantes a la sombra como las jaras (Luis-Calabuig *et al.* 2000) y disminuirá la presencia de esciófilas, forzando las comunidades a estadios sucesionales tempranos (Terradas 1996). En resumen, si bien algunas comunidades vegetales Mediterráneas podrían haber evolucionado con la presencia recurrente de incendios como presión selectiva, hasta el punto de llegar a ser el fuego un elemento inherente al sistema, el aumento de la frecuencia de los incendios como consecuencia del cambio climático tendrá consecuencias negativas y drásticas sobre la biodiversidad y estructura de estas comunidades (ver capítulo 12).

2.3.7. Impacto creciente de los eventos extremos

Los eventos climáticos extremos son difíciles de predecir, pero son muy importantes ya que su impacto ecológico y evolutivo es muy elevado (Gutschick y BassiriRad 2003). Tanto las sequías extremas como las olas de calor dejan profundos efectos en los ecosistemas que se notan durante años (Peñuelas *et al.* 2000, Groom *et al.* 2004). En una reciente revisión se muestra que son los eventos extremos los que determinan la evolución de muchas especies por selección direccional, y los rasgos funcionales que se seleccionan no son sólo aquellos que

confieren tolerancia a los eventos extremos sino también aquellos que optimizan la captación y utilización de recursos (Gutschick y BassiriRad 2003). El concepto de evento extremo debe, no obstante, ser tomado desde el punto de vista del organismo, incluyendo sus rasgos funcionales y su capacidad de aclimatación, y no desde el punto de vista ambiental, contemplando sólo la rareza estadística de un evento climático determinado. Es decir, una misma ola de calor puede tener un impacto notable en un organismo activo pero no aclimatado al calor y un impacto mínimo en un organismo que se encuentre en fase de resistencia o que esté bien aclimatado porque este evento haya estado precedido por un periodo de calentamiento progresivo. La recurrencia de eventos extremos (sequías y olas de calor) tiene un efecto acumulativo, llegando a situaciones umbral tras las cuales el impacto del clima es desproporcionadamente alto.

2.3.8. Impacto en ecosistemas terrestres insulares

El cambio climático tendrá un impacto previsiblemente mayor en los ecosistemas insulares que en sus homólogos continentales dada la limitación a la regeneración y recolonización natural que el aislamiento impone. Los impactos mencionados para los ecosistemas arbóreos y arbustivos de la región mediterránea se aplican a islas como las Baleares, pero teniendo en cuenta este efecto multiplicador debido al aislamiento que es directamente proporcional a la distancia al continente y inversamente proporcional al tamaño de la isla. Las islas Canarias mantienen una parte importante de la vegetación actual gracias a los vientos alisios que traen humedad y que son atrapados por las montañas en las islas con mayores alturas como Tenerife, Gran Canaria, La Palma y La Gomera. El cambio climático podría comprometer formaciones como la laurisilva que se sostienen mediante este fenómeno orográfico de captación de humedad. Sin embargo, estudios recientes revelan que las tendencias observadas y las predicciones emergentes son contrarias a lo esperado: las nubes bajas incrementan en frecuencia lo que hace que el área potencial para la laurisilva se extienda hacia cotas mas bajas de altitud (Sperling *et al.* 2004). No obstante, dado que las zonas bajas están densamente pobladas es improbable que la laurisilva pueda llegar a extenderse. Las especies invasoras son particularmente problemáticas en los ecosistemas insulares españoles (Vilà y Muñoz 1999) y el cambio climático podría favorecer la expansión de alguna de estas especies (Dukes y Mooney 1999).

2.3.9. Corolario: prediciendo lo impredecible

Las simulaciones del impacto del cambio climático en las plantas revelan importantes diferencias según el grupo funcional al que pertenezca la especie (Fig. 2.7). Tanto la variabilidad climática natural como la debida al cambio climático y el propio cambio climático, simulado como un escenario de 25% de reducción de lluvia y un incremento de 4 ^{o}C, tuvieron efectos que variaron de nulos a muy importantes dependiendo de que se tratara de un esclerófilo mediterráneo (*Quercus coccifera*), un caméfito (*Thymus vulgaris*) o una herbácea perenne (*Stipa tenacissima*), y también dependiendo de que la variable de respuesta fuera la biomasa reproductora, el índice de área foliar (LAI) o el periodo de crecimiento (Fig. 2.7). El cambio climático *per se* y la variabilidad climática asociada a este cambio tuvieron efectos negativos en el periodo de crecimiento de *Q. coccifera* mientras que apenas afectó a este parámetro en las otras dos especies. Lo contrario ocurrió con LAI, que apenas se vio afectado en *Q. coccifera* mientras que varió mucho en *S. tenacissima*. El cambio climático tuvo un efecto potencial muy intenso reduciendo la biomasa reproductora en *Thymus vulgaris* (Mulligan *et al.* 2004). Sin embargo, el acortamiento del periodo de crecimiento de dos de las especies contrasta con las observaciones fenológicas obtenidas para diversas especies de árboles y arbustos para las que hay datos (Peñuelas *et al.* 2002). No obstante, estas simulaciones sugieren profundos efectos del cambio climático en el componente vegetal de los ecosistemas,

efectos que se manifiestan diferencialmente sobre la reproducción, la ecofisiología o el crecimiento y dependen de la especie.

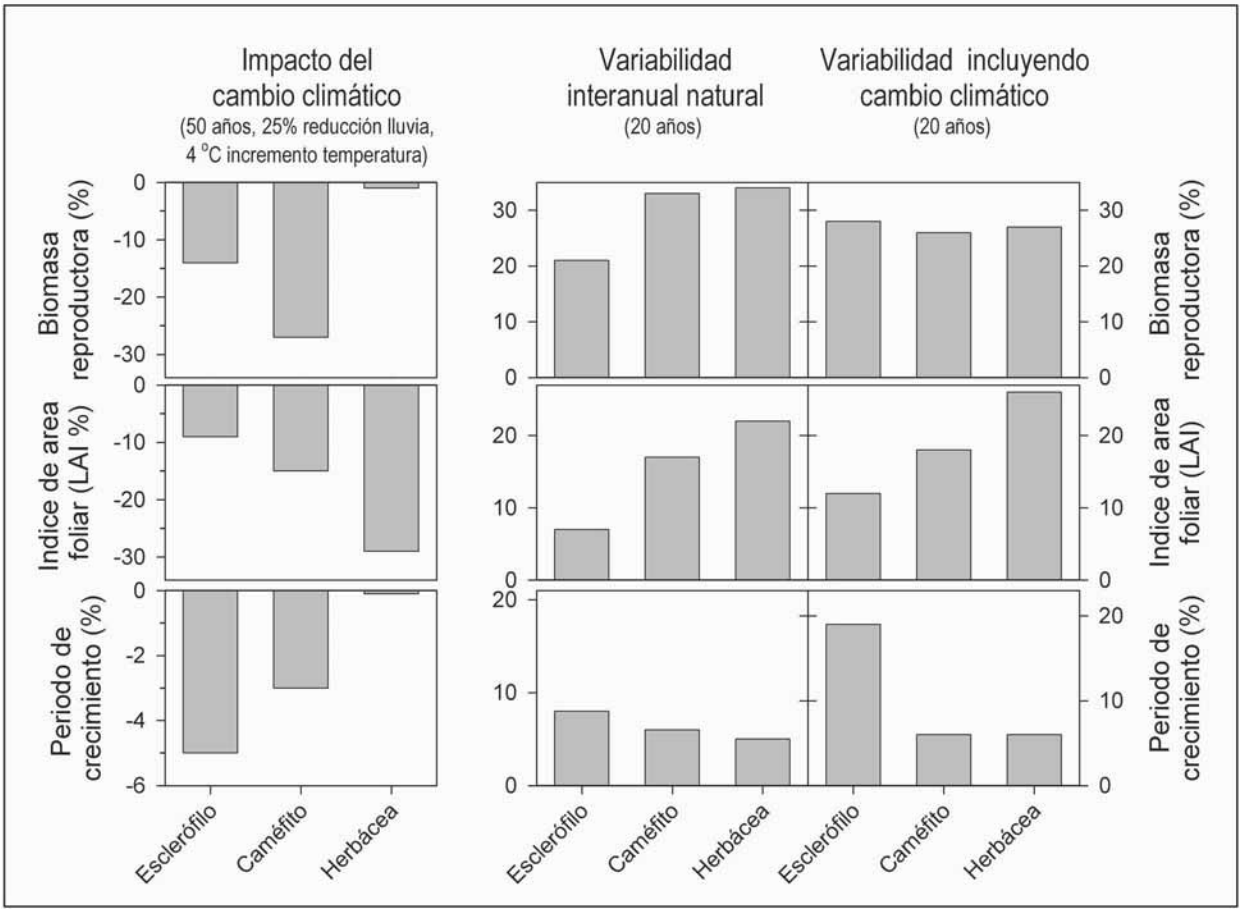


Fig. 2.7. *Impacto de un cambio climático simulado (reducción de un 0.5% de precipitación anual e incremento anual de 0.08 oC durante 50 años) en la biomasa reproductora (Kg m-2), el índice de área foliar (LAI, m2 m-2) y el periodo de crecimiento (meses año-1) en tres especies vegetales (Quercus coccifera – esclerófilo-, Thymus vulgaris – caméfito-, y Stipa tenacísima –herbácea perenne-). En los seis gráficos de la derecha se muestra el efecto de la variabilidad climática interanual natural y la variabilidad incluyendo el cambio climático en un periodo de 20 años para estos mismos parámetros y especies. El impacto del cambio climático difiere significativamente entre especies de distinta forma de crecimiento, aunque en general provoca una disminución de la biomasa reproductora, del área foliar y de la duración del periodo de crecimiento. La influencia del cambio climático sobre la variabilidad interanual fue también diferente entre parámetros y especies, tendiendo a provocar un aumento en la variabilidad del área foliar pero una disminución de la variabilidad en la biomasa reproductora; destaca el incremento de la variabilidad con el cambio climático en la duración del periodo de crecimiento del arbusto esclerófilo. Los valores se expresan como porcentaje y se han calculado con el modelo PATTERN a partir de datos climáticos del periodo 1940-1990 de La Alberca de Záncara y con las condiciones y parámetros registradas en Belmonte (Cuenca). (Datos elaborados a partir de las tablas en Mulligan et al. 2004).*

Pero en los sistemas naturales, las especies no están solas. La complejidad de efectos e interacciones entre cambio climático y procesos ecosistémicos no hace nada fácil predecir el sentido y la intensidad de las respuestas de los ecosistemas terrestres al cambio climático, aunque todos los estudios apuntan a que habrá efectos importantes. Lo que sí es cierto, es que las predicciones de la condición de los ecosistemas terrestres españoles en las décadas futuras requieren un mejor conocimiento de sus respuestas a los cambios climáticos y de predicciones regionalizadas del clima y usos del suelo. Esto todavía está lejos de estar

disponible debido a las inherentes variabilidad e impredecibilidad del sistema climático a nivel regional, y en especial en la región mediterránea. Conviene recordar que es muy probable que los cambios y las respuestas no sean simplemente lineales. Con la combinación de cambio climático y cambios en el uso de la tierra podemos prever que en las próximas décadas habrá más ecosistemas en estadios sucesionales tempranos y de menor complejidad ecológica. Las disminuciones de la productividad vegetal y de la reproducción en respuesta a la sequía (y en menor grado también al calentamiento) se traducen en una disminución de la materia orgánica que llega al suelo, y también del reclutamiento de nuevas plantas y del recubrimiento del suelo, todos ellos fenómenos que producen una disminución de la capacidad de éste para retener el agua. Si el contenido de agua del suelo mengua, disminuye la productividad de la vegetación, disminuyendo todavía más la entrada de materia orgánica en un círculo vicioso que se retroalimenta (Peñuelas *et al.* 2003). Las disminuciones del agua del suelo incrementan el riesgo de incendio y las disminuciones de la cubierta vegetal y de la materia orgánica del suelo incrementan, además, el riesgo de erosión.

Cuanto más árida es el área considerada, más tarda la vegetación en recuperarse tras sequías múltiples y prolongadas y /o incendios, tanto porque tarda mucho en construir nueva biomasa como porque a menudo tiene lugar una degradación del suelo, especialmente sí hay sobreexplotación durante los periodos secos o si hay recurrencia de los incendios. Se facilita así la erosión y, en casos extremos, se puede llegar a la desertización, un problema presente ya en zonas dónde los suelos de los ecosistemas degradados son incapaces de retener el agua proporcionada por las tormentas ocasionales y extremas del otoño, las cuales provocan avenidas y más erosión. En las zonas con terrazas de origen agrícola, la erosión es probablemente una amenaza menos inmediata que en zonas similares sin terrazas. Las áreas quemadas del Levante son susceptibles de padecer erosión porqué en una gran proporción se localizan en campos generalmente sobre sustratos margosos muy sensibles a la erosión, dónde la precipitación es limitada (350–600 mm, o menos) y principalmente concentrada en otoño, y, dónde dado el uso agrícola previo, hay un menor número de especies rebrotadoras. Estas características agravarían los efectos directos de la sequía y llevarían el ecosistema a condiciones más áridas. El atractivo de estos ecosistemas para actividades recreativas como por ejemplo la observación de la naturaleza o la caza podría disminuir y la cantidad de carbono almacenada y absorbida también. Es decir, que los bienes y servicios de los ecosistemas pueden verse alterados profundamente.

Para dimensionar el papel que el cambio climático puede tener sobre los ecosistemas terrestres es importante recordar que todos los cambios descritos en las últimas décadas han tenido lugar con un calentamiento que es sólo un tercio o menos del previsto para finales del siglo XXI.

2.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Las zonas y los ecosistemas terrestres españoles más vulnerables al cambio climático son los ecotonos o zonas de contacto entre dos o más sistemas y las islas en sentido amplio (incluyendo ecosistemas aislados así como las islas edáficas –yesos, serpentinas y saladares especialmente-, y las zonas de alta montaña; véase la sección 2.2.11 para la vulnerabilidad de ecosistemas insulares). Lógicamente, no todas las especies de un ecosistema determinado son igualmente vulnerables. En estudios de pastizales de alta montaña en el Pirineo catalán se ha visto que los componentes boreo-alpinos son los mas afectados por el calentamiento (Sebastiá *et al.* 2004). Los ecotonos son vulnerables por su gran sensibilidad a las condiciones ambientales, aunque más que el ecotono en sí, lo que es vulnerable al cambio climático es su situación geográfica o topográfica. Dada la fragmentación del territorio, no obstante, cualquier tensión climática que se ejerza sobre un ecotono no podrá aliviarse con el traslado del mismo a otras zonas, al estar esta movilidad muy restringida en la práctica. Entre los ecotonos, el límite

inferior del bosque determinado por la aridez es donde con mayor rapidez se podrán sentir los efectos del cambio climático. Las respuestas observadas en el límite altitudinal superior del bosque en los Pirineos sugieren que ciertas variables como el reclutamiento o el crecimiento radial y longitudinal son indicadores más sensibles del cambio climático que la posición altitudinal del límite del bosque (Camarero y Gutiérrez 2004). Por tanto, deben evaluarse con cuidado las variables a medir en los ecotonos para detectar efectos climáticos. Las zonas de contacto entre regiones biogeográficas, en particular la zona de transición entre la región mediterránea y la atlántica o eurosiberiana, se verán afectadas también de un modo rápido por el cambio climático, el cual incrementará la extensión de la primera a expensas de la segunda. Los melojares de *Quercus pyrenaica* se expandirán a expensas de robledales y bosques atlánticos y los fragmentos aislados de estos últimos que quedan dispersos en rincones del Sistema Central (Peña de Francia, Gredos, Guadarrama) tenderán a desaparecer. Las transiciones entre matorrales y encinares sufrirán de forma análoga una expansión de los primeros a expensas de los segundos.

Mientras los ecotonos sufrirán en general cambios graduales, los ecosistemas insulares y los ecosistemas de ribera experimentarán con mayor probabilidad cambios bruscos o tipo umbral. En el caso de las islas el umbral vendrá determinado por el área mínima, mientras que en los ecosistemas de ribera vendrá determinado por el caudal o el nivel freático mínimo. Por debajo de estos umbrales mínimos los ecosistemas corren riesgo de colapso, mientras que por encima de ellos podrían no mostrar apenas los efectos del cambio climático.

Los diversos trabajos de revisión de D.M. Richardson, P. W. Rundel, B.B. Lamont y otros sobre la ecología de los ecosistemas mediterráneos en un escenario de cambio global recogidos en el libro de Arianoutsou y Papanastasis (2004) señalan que contrariamente a lo esperado, los ecosistemas mediterráneos son muy sensibles al cambio climático. Disminuciones en la predecibilidad de la lluvia (estimada como el inverso de la varianza estacional o anual de la precipitación) están reduciendo la diversidad y la regeneración de determinados ecosistemas mediterráneos. Cambios en el régimen de fuegos (frecuencia y severidad) acoplados con el cambio climático general están teniendo ya profundas consecuencias para estos ecosistemas y afectan mayoritariamente a especies pirófitas estrictas (e.g. especies serótinas) que sólo reclutan tras el fuego. Análisis recientes del régimen de fuegos en la España mediterránea han revelado que el incremento en frecuencia y área quemada esta asociado con el clima, de forma que los fuegos son mayores y mas frecuentes en años de veranos secos, y que los veranos lluviosos generan un incremento de combustible que da lugar a fuegos más catastróficos unos dos años después en promedio (Pausas 2004).

2.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

2.5.1. Actuaciones sobre especies clave

Evidencias procedentes de diversos estudios coinciden en apuntar hacia un progresivo declinar de especies clave en nuestros ecosistemas terrestres como la encina. La sensibilidad observada en la encina ante el cambio climático se apoya en su mediocre tolerancia ecofisiológica a sequías severas (Joffre *et al.* 2001, Martinez-Vilalta *et al.* 2002a), su baja eficiencia en el uso del agua durante la sequía (Reichstein *et al.* 2002), el envejecimiento de las masas de encina y del monte bajo que no se gestionan mediante aclareos y resalveos, los episodios de “seca” de la encina, el balance de carbono negativo durante el verano, el largo periodo de regeneración de mas 20 años de los carbohidratos empleados en el rebrote tras un incendio (Gracia *et al.* 1997, Gracia *et al.* 2001), y los resultados de Ogaya y Peñuelas (2003, 2003) que sugieren una escasa competitividad de esta especie en condiciones de sequía intensa. Esta paulatina crisis hídrica sin duda se verifica ya en algunos encinares, y también en pinares y otros bosques mediterráneos, que se encuentran en su límite hídrico con tasas de evapotranspiración iguales a las de precipitación (Peñuelas 2001).

En estos bosques el recrudecimiento de la aridez durante el verano, unida a periodos climáticos desfavorables, podría ser la causa última o, al menos, un factor de predisposición a la muerte masiva del arbolado. La recuperación y puesta en práctica de los aspectos básicos de la gestión tradicional del matorral y bosque mediterráneo, así como la aplicación de técnicas silvícolas nuevas que mejoren la eficiencia en el uso del agua tanto de los pies individuales como del ecosistema en general son las principales medidas disponibles para corregir la tendencia general de decaimiento y para prevenir respuestas bruscas tipo umbral ante el incremento de la aridez y de la irregularidad de las precipitaciones (Gracia *et al.* 1997, Gracia *et al.* 2001, Joffre *et al.* 2001). El mismo tipo de análisis cabe hacerse con otras especies clave de nuestros ecosistemas, de las cuales se muestran más ejemplos en otros capítulos. No obstante, las actuaciones sobre una única especie son poco eficaces si se busca algo más que la conservación de esta especie determinada. Incluso en muchos casos para la conservación de esta especie es preciso regenerar o conservar las condiciones ambientales que permiten su existencia y la actuación debe hacerse por tanto a nivel de ecosistema siempre que sea posible.

2.5.2. Actuaciones sobre sistemas clave

Un aspecto importante a la hora de actuar para paliar los efectos del cambio climático es tener registros adecuados de la evolución de los distintos ecosistemas en el transcurso de los años. Pero la pérdida de hábitats confunde los efectos del cambio climático. Debe tenerse en cuenta que esta pérdida de hábitats da lugar a rápidos cambios en la distribución de frecuencias de las condiciones ambientales tanto por cambios biofísicos en el hábitat como por efectos de muestreo (Pyke 2004). Estos efectos de muestreo son debidos a que la pérdida de hábitats rara vez se produce al azar, de forma que los hábitats que permanecen son una muestra sesgada de las condiciones climáticas de la región. Mediante el seguimiento de estas muestras sesgadas se puede sobreestimar o subestimar el efecto del cambio climático si las muestras están en las zonas más cálidas y secas de la región o en las más frescas y húmedas respectivamente. Así pues, es preciso considerar en los seguimientos previos a cualquier actuación zonas climáticamente infrarrepresentadas y compensar la tendencia de proteger y estudiar áreas pequeñas y poco representativas de las condiciones ambientales generales de una región.

Existe un abanico de sistemas que merecen particular atención bien por su papel clave en la provisión de bienes y servicios o bien por su carácter endémico o relicto. Estos sistemas requieren actuaciones que contrarresten los efectos del cambio climático y conduzcan a su eficaz conservación. De entre ellos destacan:

- Formaciones forestales relictas de climas pasados (e.g. laurisilva canaria, bosques de *Rhododendron ponticum* en los “canutos” de Cádiz y Málaga, loreras de *Prunus lusitanica* en Extremadura).
- Formaciones arbustivas o arbóreas de zonas áridas como en las que aparecen *Maytenus senegalensis, Ziziphus lotus, Tetraclinis articulata,* y *Whitania frustecens.*
- Formaciones fragmentadas o aisladas como los abedulares y hayedos de la zona Centro, las tejedas, acebedas, y masas aisladas de coníferas como las de *Pinus sylvestris* en Sierra Nevada, *P. uncinata* en el Sistema Ibérico, *Abies alba* en el Montseny y las de *Abies pinsapo* en la Serranía de Ronda.
- Las zonas vulnerables citadas (ecotonos, sistemas insulares y alta montaña).
- Encinares y dehesas de encina que muestran signos de escasa regeneración y vulnerabilidad al cambio climático.

2.5.3. Diseño integrado de espacios naturales protegidos

El diseño de nuevos espacios protegidos y la re-estructuración de los espacios existentes debe incorporar los conceptos contemplados aquí, que en resumen incluirían una buena representación tanto en tamaño como en distribución espacial de los principales ecosistemas de una región, y permitirían migración y cambios de distribución de especies y sistemas mediante la inclusión de gradientes altitudinales y corredores biológicos entre distintas zonas. Es preciso un mayor énfasis en la gestión del medio ambiente en sentido amplio ya que los espacios protegidos pueden quedar obsoletos, y los sistemas y especies que se pretende conservar o proteger pueden cambiar o desaparecer, muy especialmente en escenarios de cambio climático (Harrison *et al.* 2001).

2.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

La sensibilidad de muchos de los ecosistemas terrestres españoles al cambio climático hace que las medidas encaminadas a su conservación repercutan en diversos sectores socio-económicos. Algunos ejemplos importantes son:

- La buena gestión del recurso hídrico, indispensable para el mantenimiento de muchas formaciones naturales, entre en conflicto con explotaciones turísticas intensivas o instalaciones de campos de golf en zonas áridas.
- La conservación de las zonas de alta montaña no es compatible con un aprovechamiento masivo e intensivo de la temporada de esquí.
- Los cultivos intensivos de invernadero en zonas áridas no permiten ni una buena conservación de los sistemas naturales ni un buen aprovechamiento del agua. La gestión de ciertas zonas para la caza mayor lleva a sistemas con una elevada presión de herbivoría que resultan pobres en especies y vulnerables al cambio climático y a las perturbaciones.
- La explotación forestal apoyada en monocultivos amenaza la funcionalidad de los ecosistemas y su sostenibilidad a largo plazo.

Las conclusiones de este capítulo tienen claras repercusiones sobre lo que se aborda en otros capítulos (e.g. Sector Forestal, Recursos Edáficos, Biodiversidad Animal y Vegetal entre otros).

2.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

Cox *et al.* (2000) han estimado que el incremento de respiración causado por el incremento de temperaturas podría convertir a muchos ecosistemas en fuentes y no sumideros de CO_2 para el año 2050. No obstante, el efecto de la sequía no se ha tenido en cuenta, la cual, como han mostrado Reichstein *et al.* (2002) puede alterar profundamente los balances de agua y carbono estimados a partir de modelos que sólo contemplan la respuesta estomática de la vegetación. En general, las interacciones tanto entre factores (e.g. temperatura, agua y luz) como entre especies (redes de interacciones tróficas, mutualísticas, etc.) incrementan de forma muy notable nuestra incertidumbre sobre el efecto del cambio climático en los ecosistemas terrestres. Este hecho sumado a la escasez de series temporales largas hace que las predicciones de los efectos del cambio climático sobre estos sistemas sean muy poco robustas. Además, la baja precisión espacial de las predicciones hace que la incertidumbre aumente mucho a nivel local, a pesar de que muchos procesos operan a este nivel (e.g. extinciones locales). La carencia de información sobre la ecofisiología de especies clave (e.g. tolerancia a la sequía en interacción con la sombra, la capacidad de aclimatación de la respiración a temperaturas altas, los efectos globales de los compuestos orgánicos volátiles) sumada a la carencia de datos genéticos y moleculares hace difícil estimar la capacidad de evolución de las especies en un mundo cambiante. Además, resulta difícil aislar los efectos debidos al cambio climático de los debidos a la simultánea participación de otros motores del cambio global. Para

ello es preciso la experimentación y no sólo la observación y el seguimiento. En la Tabla 2.1 se resume el nivel de certidumbre que se tiene sobre los principales impactos que el cambio climático tendrá sobre los ecosistemas terrestres españoles.

Tabla 2.1. *Nivel de certidumbre sobre los efectos más relevantes del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres en España*.

Certidumbre	Efectos más relevantes del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres en España
****	Cambios en la fenología de las especies
****	Cambios en las interacciones entre especies
****	Expansión de especies invasoras y plagas
****	Cambios en la dominancia de las especies de una comunidad
****	Cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas
***	Disminución de la productividad por sequía
***	Migraciones altitudinales de especies clave
***	Disminución de la calidad nutritiva de las plantas
***	Disminución de la capacidad de secuestro de carbono
***	Extinciones locales
***	Incremento del impacto de las perturbaciones y los eventos extremos
**	Tolerancia de nuevas condiciones por aclimatación y plasticidad de especies clave
**	Extensión del periodo de crecimiento real de la vegetación
**	Incremento de la emisión de VOC
*	Tolerancia de nuevas condiciones por adaptación (evolución) de especies clave
*	Migraciones latitudinales de especies clave
*	Incremento de la eficiencia del uso del agua por las plantas
*	Colapso de redes tróficas
*	Aceleración de ciclos biogeoquímicos por calentamiento y sequía

(** certeza muy alta, *** certeza alta, ** certeza media, * certeza baja)**

2.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

El efecto del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres puede ser detectado mediante diversos tipos de indicadores, que varían desde el seguimiento de especies de flora y fauna particularmente sensibles hasta la monitorización de variables ecosistémicas en zonas de especial interés. Sobre los primeros podrán encontrarse recomendaciones específicas en los capítulos de biodiversidad vegetal y animal. Es preciso hacer constar no obstante la idoneidad de los análisis de viabilidad poblacional (PVA) para la detección de los efectos del cambio climático. Estos análisis ya se están llevando a cabo para el caso de ciertas especies raras o amenazadas (e.g. casi 40 especies de plantas en peligro crítico están siendo monitorizadas dentro del marco del Atlas de la Flora Amenazada bajo la responsabilidad del Ministerio de Medio Ambiente) y están permitiendo detectar efectos atribuibles en cierto medida al cambio climático. Aquí proponemos una relación de variables cuyo seguimiento ha permitido y permitirá detectar efectos del cambio climático en el funcionamiento de los ecosistemas. Las

variables difieren en cuanto a su costo en términos tanto económicos como del nivel técnico requerido y se valoran en función de ese costo (C, costosa, E, económica, E-C el costo depende del protocolo de medida).

Variables fenológicas

Producción de flores y frutos de especies clave (ampliación de la lista del Instituto Meteorológico a especies naturales representativas; E), fenología de comunidades vegetales (estimación de momentos de dormancia general, producción máxima, floración máxima, etc.; E), aparición de insectos y aves migradoras (ampliación de la lista del Instituto Meteorológico a especies naturales representativas; E),

Variables abióticas

Cambios térmicos y de precipitación en zonas extremas, ecotonos y hábitats de especies o poblaciones relictas o al límite de su distribución (E), seguimiento de erosión en zonas como las anteriores (C), seguimiento del nivel freático en zonas como las anteriores (C), seguimiento de temperatura y humedad del suelo en zonas representativas de los principales ecosistemas (E),

Variables estructurales

Indice de área foliar (LAI; E-C), acumulación de biomasa y necromasa (C), desarrollo de raices (C), movimientos altitudinales de ecosistemas (límites superior e inferior del bosque, ecotonos, limites altitudinales de especies clave; E), cartografía dinámica de ecosistemas (seguimiento temporal de su extensión y distribución espacial; C),

Variables ecológicas y fisiológicas

Intercambio neto de carbono del ecosistema (técnica de Eddy Flux covariance; C), productividad (E-C), carbohidratos de reserva en tejidos vegetales (almidón, carbono móvil, particularmente en especies rebrotadoras; C), mineralización de la materia orgánica (C), regeneración natural de especies clave (C), seguimiento de la rizosfera (diversidad, productividad; C), simulación experimental de calentamiento y sequía (C), emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC; C), seguimiento de poblaciones de especies invasoras (E-C), seguimiento de plagas y patógenos (E-C).

En el caso de cualquiera de las variables referidas, su seguimiento debe incluir plazos temporales largos debido a las marcadas oscilaciones intra e interanuales tanto de las variables climáticas como de las respuestas de los ecosistemas al cambio ambiental. Para ello debe en primera instancia aprovecharse las iniciativas ya existentes en España y antes de iniciar ninguna acción nueva es preciso comprobar que no exista ninguna serie temporal similar ya en marcha. A modo de ejemplo, resulta de especial valor estratégico el mantenimiento de las observaciones fenológicas del Instituto Nacional de Meteorología, de la red de seguimiento de la sanidad forestal (Ministerio de Medio Ambiente) e iniciativas como la red RESEL de seguimiento de erosión y fisicoquímica del suelo (Rojo y Sánchez-Fuster 1996) ver capitulo sobre recursos edáficos). La fuerza de las iniciativas existentes es su antigüedad, por lo que deben priorizarse las series que cuenten con registros ininterrumpidos de largos periodos temporales. Este apoyo a series existentes debe completarse además con el apoyo de iniciativas mas recientes e incluso de iniciativas nuevas que rellenen lagunas importantes del conocimiento o bien áreas geográficas mal registradas. Muchas de estas series se apoyan en la colaboración de diversos grupos científicos y tienen unos requerimientos logísticos

moderados, lo cual favorece su continuidad. Mención especial merecen las estaciones de seguimiento del balance de carbono de los ecosistemas mediante covariación "Eddy flux" como la de El Saler (Parque Natural de la Albufera de Valencia) a cargo del CEAM, y las instalaciones experimentales para el estudio de los efectos del cambio climático en el Montseny y El Garraf (Barcelona) a cargo del CREAF. Estas instalaciones a diferencia de las iniciativas mencionadas mas arriba son costosas, pero la información que aportan es de gran valor. Para que estas instalaciones se revaloricen y que la información que suministran permita detectar el efecto del cambio climático en los ecosistemas terrestres no basta con mantenerlas activas durante largos periodos de tiempo sino que deben integrarse en redes que permitan comparar resultados con otros sistemas (e.g. matorrales, pastizales) y con otras regiones.

2.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

2.9.1. La importancia de la concienciación social

La introducción de estrategias multiuso para la gestión y rehabilitación de los ecosistemas terrestres requiere un gran esfuerzo educacional y de investigación, y otro gubernamental para dar esperanza al futuro desarrollo de estos ecosistemas terrestres y de sus recursos en el marco de los cambios actuales de clima y usos del suelo. Para hacer llegar al gran público la problemática del cambio climático y sus efectos e interacciones con los ecosistemas terrestres, tenemos el cambio fenológico como herramienta fácil y popular que muestra a todo el mundo como el cambio climático afecta la vida. También se tendrían que aprovechar acontecimientos como la sequía de 1994 para concienciar de los efectos de una reducción de agua en nuestros ecosistemas. En estos y en todos los otros términos mencionados se tendrían que difundir las actividades de investigación en los medios de comunicación. También se tendrían que apoyar las actividades de comunicación donde participen conjuntamente los actores implicados en la investigación y en la gestión forestal y de espacios naturales.

2.9.2. Gestión sostenible de los ecosistemas, reforestación y restauración ecológica

La gestión de los ecosistemas terrestres y la planificación del tipo e intensidad de actuación humana debe basarse en un equilibrio entre la visión global de los procesos ecosistémicos, el conocimiento regional y la acción local. La dinámica de nuestros ecosistemas, casi todos semi-naturales, se puede entender como una serie de degradaciones antropogénicas y regeneraciones subsiguientes. De hecho, tanto la sobreexplotación como la protección completa pueden llevar a estadios inferiores de atractivo escénico y de utilidad económica de muchos ecosistemas terrestres como los bosques y matorrales mediterráneos. Estas formaciones mediterráneas actuales no se entienden sin la intervención humana, y un paradigma claro lo suponen los sistemas sabanoides o adehesados. Aunque los cambios en el clima y en el régimen de incendios y perturbaciones podrían conducir a que las dehesas se mantengan por medios distintos al uso humano, en la actualidad tanto las dehesas como la diversidad que albergan dependen de una correcta gestión forestal y ganadera (Díaz *et al.* 2003). La gestión de estos sistemas es la gestión de elevados niveles de diversidad biológica, que aunque en sí mismos no contribuyan a la sustentabilidad del sistema, sí podrían contribuir a su mantenimiento y conservación gracias al valor que la sociedad otorga a los sistemas ricos en especies (Blondel y Aronson 1995). A pesar de que está demostrada la necesidad de la intervención humana para mantener la coexistencia local entre el pastizal y el arbolado en la dehesa aún no están dilucidados los procesos y mecanismos por los cuales resulta tan importante la intervención humana para el mantenimiento de esta coexistencia (Marañón *et al.* 1999). Por tanto, la gestión de estos sistemas debe ser adaptativa y debe poder ir variando en función de la propia evolución del sistema y del efecto del manejo que en cada caso se aplique (Rojas 2001, Charco 2002, Valladares 2004b).

Existe abundante evidencia de que en las intervenciones dirigidas a la rehabilitación o restauración de los ecosistemas terrestres, la actuación óptima se basa en ayudar a la naturaleza a que se recupere, acelerando los procesos naturales de sucesión ecológica y minimizando la intervención (Suding *et al.* 2004). Estas actuaciones deben contemplar la tendencia del cambio climático y no limitarse a aplicar protocolos clásicos, adecuados a las condiciones climáticas predominantes hasta ahora. El conocimiento de los mecanismos de resistencia de los ecosistemas al estrés permite comprender los procesos evolutivos implicados en la adaptación de las diversas especies a los cambios ambientales y predecir hasta cierto punto su respuesta al incremento de la adversidad asociada al cambio global (Valladares 2004b). Y este conocimiento debe ser incorporado en los programas de restauración, por ejemplo, mejorando o seleccionando las características de las plantas que vayan a ser empleadas en proyectos de reforestación o restauración. El conocimiento de estos mecanismos puede hacer posible además la utilización de especies sensibles como bioindicadoras del estrés asociado al cambio climático.

Los gestores de la naturaleza y de nuestros hábitats, tanto el rural como el urbano, deberán considerar las propiedades de emisión de compuestos orgánicos volátiles de las distintas especies vegetales cuando quieran evitar la formación de contaminantes atmosféricos secundarios. De hecho, mientras que deberán considerar las especies con emisiones altas como candidatas a reforestar zonas áridas y con altas temperaturas, pues esas pueden ser las especies más resistentes a esas condiciones, tendrán que escoger las especies con bajas emisiones para reforestar zonas urbanas y suburbanas así como zonas industriales con alta contaminación antropogénica (por ejemplo de óxidos de nitrógeno) si no quieren favorecer la formación de contaminantes secundarios como el ozono. Con el conocimiento climático y ecológico que se tiene actualmente de las costas del Mediterráneo, una reforestación adecuada en las laderas de estas montañas costeras podría utilizarse para reactivar mecanismos de disparo y retroalimentación de las tormentas de verano y guiar así el sistema hacia una configuración con más vegetación, estabilizando alguno de los efectos anticipados como resultado del cambio climático (Millán 2002). Esto podría aplicarse también a otras zonas donde la vegetación afecta significativamente a las características locales de la atmósfera. En definitiva, la gestión forestal y de los espacios naturales no puede olvidar el papel de bosques y matorrales en la preservación del medio ambiente atmosférico y en la actuación como amortiguadores de ambientes contaminantes y ricos en CO_2.

2.9.3. Secuestro de carbono versus diversidad biológica y funcionalidad de los ecosistemas contra la desertificación

La gestión de los ecosistemas terrestres debe considerar el importante papel que juegan las emisiones gaseosas de las plantas en la química atmosférica y en el clima local y global, y el papel de las plantas como sumideros de gases atmosféricos tan importantes como el CO_2. Para paliar el cambio climático a través de una mayor captación y menor pérdida de CO_2 se puede actuar mediante la aforestación y la reforestación pensando en alargar la inmovilización del carbono en los productos forestales y en proteger los suelos. La gestión forestal tendría que incorporar el cambio de condiciones ambientales en el momento de definir las intensidades de intervención y su frecuencia. Por ejemplo, teniendo en cuenta la creciente sequía hay que reducir las densidades de rebrotes en bosques de alta densidad, algo que ya se ha visto como una manera efectiva de disminuir el impacto de sequías extremas.

Casi el 90% del carbono en forma de biomasa lo acumulan los bosques, lo que supone el 50% del carbono orgánico terrestre. Sin embargo, Körner (2003) ha evidenciado la asimetría temporal que supone el lento crecimiento de un árbol y la brusquedad de las perturbaciones (incendio, tala, herbivoría, decaimiento) que libera rápidamente mucho carbono a la atmósfera. En el caso del monte bajo de encinas y robles, dominante en muchas regiones ibéricas, se ha

experimentado un brusco cambio a partir de la industrialización y la despoblación rural. El uso tradicional de estos montes para leña y carbón se ha abandonado alargándose mucho los turnos de corta. Este monte bajo envejecido muestra un crecimiento muy lento, lo que puede implicar una mayor vulnerabilidad ante el efecto de estreses abióticos (e.g. sequía) o bióticos (e.g. plagas defoliadoras). En un experimento realizado a pequeña escala (Luis-Calabuig *et al.* 2000) se pretendía determinar si el aclareo del monte favorecía el desarrollo de porte arbóreo del roble melojo (*Quercus pyrenaica*) a partir de formaciones arbustivas densas y continuas aparecidas por repetición de incendios. No se observaron diferencias en el crecimiento de los robles entre los tratamientos de eliminación del matorral y la situación original. Sin embargo en el tratamiento de aclareo se observó que se favorecía el incremento en el perímetro del tronco frente al crecimiento en altura en los 10 brotes que se dejaron al haber disminuido la competencia por la luz. Con un tratamiento silvícola a más largo plazo sería posible mejorar la estructura de estos ecosistemas. La perturbación intensa asociada a los tratamientos silvícolas tradicionales producen una liberación rápida de carbono pero si no se realiza tratamiento alguno se corre el riesgo de que el escaso crecimiento de estas masas envejecidas y su mayor vulnerabilidad ante situaciones de estrés lleve a un decaimiento agudo y una alta mortalidad, y, de nuevo, provocar la liberación brusca de carbono. Esta paradoja es actualmente irresoluble debido a nuestro desconocimiento del funcionamiento del monte bajo y crea serias dudas sobre el papel de estas formaciones de especies de *Quercus* como sumidero de carbono. Estas dudas, presentes también en la mayoría de los ecosistemas terrestres españoles, se trasladan desde la investigación a la gestión y deben resolverse para decidir cómo manejar este paisaje valorando también su papel como reservorio de biodiversidad. El enfoque que debería prevalecer en la gestión es que la conservación de almacenes de carbono es tan importante como la creación y mantenimiento de sumideros.

En general, las políticas y actuaciones encaminadas a aumentar el secuestro del carbono atmosférico por parte de la vegetación son poco compatibles con la conservación de la biodiversidad o su explotación sostenible. Una de las pocas compatibilidades identificadas hasta la fecha sería la de seleccionar áreas poco productivas para el mantenimiento de bosques y formaciones de alta biodiversidad capaces de almacenar el carbono secuestrado durante largos periodos de tiempo y emplear zonas más productivas para otros usos (Huston y Marland 2003).

2.9.4. Conservación de la naturaleza y espacios naturales protegidos

Los modelos paleoecológicos establecen que los principales centros de dispersión postglaciar europeos han sido el sur de la Península Ibérica, Italia y los Balcanes (Willis y Whittaker 2000). Por tanto, si una especie arbórea se extingue del sur de Europa, las posibilidades de extinción continental ante futuros cambios climáticos son mucho mayores que si la extinción afecta a las Islas Británicas o a Escandinavia (Carrión 2003). Esto es en sí mismo un sólido argumento para insistir tanto a nivel nacional como comunitario en la importancia de la conservación de nuestros ecosistemas terrestres y la aplicación de políticas de desarrollo sostenible.

Con el cambio climático previsto, la vegetación podría extenderse hacia las zonas más altas de las montañas, pero las comunidades que ya se encuentran en estas zonas altas se extinguirían (Peñuelas y Boada 2003). En muchos casos, la única migración posible es hacia latitudes norteñas. Pero las tasas de migración no serían eficaces en el actual escenario de cambio global, ya que por un lado el clima cambia demasiado deprisa y por otro lado el territorio se encuentra muy fragmentado, lo cual restringe significativamente la posibilidad real de migraciones latitudinales o altitudinales de la vegetación. Por ello a la hora de gestionar los espacios naturales protegidos o de seleccionar nuevos espacios a proteger es preciso maximizar la conectividad entre las distintas unidades y ecosistemas de la zona para compensar la fragmentación. Además, es importante conservar procesos y sistemas, no tanto

lugares o especies concretas, y establecer escalas espaciales apropiadas para los procesos ecológicos. Para asegurar una conservación eficaz y a largo plazo de muchos de estos procesos hay que incorporar zonas con distinto nivel y tipo de intervención humana y con distinta susceptibilidad al cambio climático. Los espacios naturales protegidos deberían establecer una "reserva de riesgo", un componente creado específicamente para reducir el riesgo ecológico asociado al cambio climático. Además, la gestión de los espacios naturales tiene que incorporar una escala de paisaje que considere la combinación de espacios de diverso tipo, favoreciendo su uso múltiple y controlando, pero no suprimiendo, el efecto de perturbaciones como los incendios.

2.9.5. Necesidad de coordinación y acercamiento entre la investigación y el seguimiento

Es preciso acercar organismos, instituciones y equipos humanos y tecnológicos dedicados al seguimiento del cambio ambiental con aquellos dedicados a la investigación de sus efectos en los ecosistemas terrestres. La obtención de resultados fiables sobre estos efectos solo es posible mediante el análisis científicamente riguroso de datos muy diversos, resultantes de una necesaria interdisciplinariedad, y este análisis sólo es posible si tales datos (ambientales, ecológicos, fisiológicos, etc.) se recogen y almacenan no menos rigurosamente durante periodos de tiempo largos.

2.9.6. Corolario: la financiación de los bienes y servicios de los ecosistemas requiere creatividad y flexibilidad en las políticas para alcanzar un mayor compromiso social

El cambio climático agudizará de forma muy previsible la crisis ambiental que sufre la naturaleza de nuestro país en general y los ecosistemas terrestres en particular. Una de las principales causas que subyacen a la escasa sostenibilidad de la gestión actual de los ecosistemas terrestres españoles es la falta de rentabilidad de muchos de ellos. Cuando los ecosistemas no son rentables, no se invierte en ellos. Y en esto no afecta el que sean de propiedad pública o privada, ya que la extensión de los ecosistemas terrestres hace que ni siquiera el Estado tenga capacidad para gestionarlos sin asegurar una rentabilidad mínima. Esto es evidente en el caso de los ecosistemas forestales, donde las políticas europeas están dominadas por los países productores de madera, mientras que los bosques mediterráneos, pese a ocupar superficies considerables, se ven como algo marginal. De esta forma, España es el país europeo con mayor proporción de bosque económicamente improductivo debido por un lado a la abundancia de monte no rentable, sobre todo en zonas de clima mediterráneo seco, y por otro a la existencia de espacios protegidos. Sin embargo, la sociedad actual asigna a los ecosistemas terrestres una serie de funciones que superan con mucho las productivas, valorándose cada vez más no sólo la regulación hidrológica y la protección frente a la erosión, sino el uso recreativo, el de conservación de biodiversidad y del paisaje, y el almacenamiento de carbono. Todas estas funciones hacen aumentar las prestaciones sociales reconocidas a los ecosistemas terrestres, pero no tienen contrapartidas económicas directas. Dado que los propietarios no reciben ingresos por estos servicios no hay fuentes de financiación para realizar inversiones orientadas al cumplimiento de las funciones sociales. Los científicos no tienen la respuesta a esta clase de problemas, pero la corrección de las disfunciones que se irán acentuando con el cambio climático sólo se realizarán si se resuelve el problema de financiación. Por tanto, las administraciones deben buscar, con imaginación, fuentes nuevas de recursos. Si el ecosistema ofrece servicios, estos deben ser retribuidos de algún modo por los beneficiarios (a veces el conjunto de la sociedad, a veces colectivos concretos o particulares). Si el monte produce agua limpia, las sociedades de suministro de agua y los municipios deben implicarse en la gestión forestal. Si sirve de paso a conducciones, las compañías eléctricas también. Lo mismo cabe decir de las urbanizaciones, hoteles y otros establecimientos turísticos que se benefician del paisaje. Es precisa una implicación social que desarrolle nuevas vías para hacer posible una gestión acorde con los nuevos servicios reconocidos a los ecosistemas terrestres (Peñuelas *et al.* 2004a). La solución no puede venir de la economía de las

administraciones ni del esfuerzo de algunos propietarios, sino de políticas imaginativas y flexibles que logren un mayor compromiso colectivo para que los ecosistemas sean tratados en función de los servicios que nos prestan y de su valor intrínseco.

2.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Nuevos estudios ecológicos revelan constantemente nuevos patrones, así como modificaciones y excepciones a las respuestas conocidas de las especies y de los ecosistemas terrestres a la creciente sequía y al calentamiento. Esto revela que nuestro conocimiento es aún limitado y posiblemente insuficiente para satisfacer la urgente necesidad de predicciones y recomendaciones precisas para la gestión de los ecosistemas terrestres en un mundo cambiante. De las múltiples carencias de conocimiento evidenciadas en esta revisión se desprenden las siguientes líneas de investigación principales que deberían verse reforzadas:

1. Obtención de series temporales largas que permitan establecer tendencias y analizar la dinámica de las respuestas y de la reacción. El seguimiento de ecosistemas a largo plazo permitirá detectar:
    a. las bases físicas del propio cambio ambiental,
    b. el impacto del cambio climático sobre los ecosistemas,
    c. los resultados de los intentos de mitigación del cambio climático y sus efectos
2. Estudio de la interacción entre cambio climático y cambio de uso del territorio. Desarrollo de experimentos y manipulaciones para separar los efectos debidos a ambos factores.
3. Estudio de las interacciones entre factores climáticos (temperatura, luz, agua. CO_2) y sus efectos sobre los ecosistemas.
4. Estudio de las interacciones entre especies y de la sensibilidad de redes de interacciones al cambio climático.
5. Extensión de los estudios ecológicos y ecofisiológicos a ecosistemas poco conocidos, no sólo aquellos dominados por especies singulares (ver apartado 2.5.2) sino también encinares y matorrales mediterráneos fuera del área levantina (e.g. páramos y zonas continentales, alta montaña).
6. Análisis de los efectos indirectos del cambio climático. Efectos en cascada. Reacciones sinérgicas y ciclos autocatalíticos como por ejemplo la disminución de productividad, el recrudecimiento de las plagas y el aumento del riesgo de incendios.
7. Análisis de los tiempos de expresión de los efectos, de reacción de los ecosistemas y de adaptación y evolución en los nuevos escenarios.
8. Selección de indicadores tempranos de cambio.
9. Determinación de valores mínimos de tolerancia (área mínima, disponibilidad hídrica mínima, tamaño y estructura mínima de la red de interacciones interespecíficas) en sistemas vulnerables, particularmente en aquellos propensos a respuestas de tipo umbral como los ecosistemas insulares y de ribera.
10. Efectos del cambio climático sobre la expansión de especies invasoras.
11. Estudio de procesos subterráneos (sumideros de C, dinámica de raíces y microorganismos edáficos).
12. Realización de balances de carbono completos para los diferentes ecosistemas terrestres mediante la optimización y parametrización de modelos y estimaciones precisas no sólo de biomasa (aérea y subterránea) sino también de necromasa
13. Mejora de las técnicas de restauración ecológica para la recuperación de la cubierta vegetal y otras funciones y servicios del ecosistema en zonas degradadas.

2.11. BIBLIOGRAFÍA

Arianoutsou M. y Papanastasis V. 2004. Ecology, Conservation and Sustainable Management of Mediterranean type ecosystems of the World. Millpress, Rotterdam.

Atkin O.K. y Tjoelker M.G. 2003. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. Trends in Plant Science 8: 343-361.

Blondel J. y Aronson J. 1995. Biodiversity and ecosystem function in the Mediterranean basin : Human and non-human determinants. En: Davis G.W. y Richardson D.M. (eds.). Mediterranean-Type ecosystems: The function of biodiversity. Springer-Verlag, Berlin. Pgs: 43-105.

Calvo L., Tarrega R. y Luis E. 2002. Regeneration patters in a *Calluna vulgaris* heathland in the Cantabrian mountains (NW Spain): effects of burning, cutting and ploughing. Acta Oecologica 23: 81-90.

Camarero J.J. 1999. Growth and regeneration patterns and processes in *Pinus uncinata* Ram treeline ecotones in the Pyrenees and in an isolated population in the western distribution limit in Spain. University of Barcelona, Barcelona.

Camarero J.J. y Gutiérrez E. 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. Climatic Change 63: 181-200.

Carrión J.S. 2002. Patterns and processes of Late Quaternary environmental change in a montane region of southwestern Europe. Quaternary Science Reviews 21: 2047-2066.

Carrión J.S. 2003. Sobresaltos en el bosque mediterráneo: incidencia de las perturbaciones observables en una escala paleoecológica. Ecosistemas 2003-3: URL: http://www.aeet.org/ecosistemas/033/revision1.htm.

Carrión J.S., Munuera M., Dupré M. y Andrade A. 2001. Abrupt vegetation changes in the Segura mountains of southern Spain throughout the Holocene. Journal of Ecology 89: 783-797.

Carrión J. S., Yll E.I., Walker M.J., Legaz A., Chaín C. y López A. 2003. Glacial refugia of temperate, Mediterranean and Ibero-North African flora in southeastern Spain: new evidence from cave pollen at two Neanderthal man sites. Global Ecology and Biogeography 12: 119-129.

Casals P., García-Pausas J., Romanyà J., Camarero L., Sanz M.J. y Sebastià M.T. 2004. Effects of livestock management on carbon stocks and fluxes in grassland ecosystems in the Pyrenees. En: Lüscher A., Jeangros B., Kessler W., Huguenin O., Lobsiger M., Millar N. y Suter D. (eds.). Systems in Grassland Dominated Regions. European Grassland Federation. Pgs: 136-138.

Castells E., Roumet C., Roy J. y Peñuelas J. 2002. Intraspecific variability of phenolic concentrations and their responses to elevated CO_2 in two Mediterranean perennial grasses. Environmental Experimental Botany 47: 205-216.

Castillo V.M., Martínez-Mena M. y Albaladejo J. 1997. Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. Soil Science Society of America Journal 61: 1116-1121.

Cermak J., Jiménez M.S., González-Rodríguez A.M. y Morales D. 2002. Laurel forests in Tenerife, Canary Islands. II. Efficiency of the water conducting system in *Laurus azorica* trees. Trees 16: 538-546.

Charco J. 2002. Conclusiones generales y propuestas para la regeneración de los bosques mediterráneos ibéricos. En: Charco J. (ed.). La regeneración natural del bosque mediterráneo en la Península Ibérica. ARBA-Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. Pgs. 279-290.

Corcuera L., Camarero J.J. y Gil-Pelegrín E. 2004. Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. Trees Structure and Function 17: (en prensa).

Costa M., García-Antón M., Morla C. y Sáiz H. 1990. La evolución de los bosques en la Península Ibérica. Ecología 1: 32-43.

Costa M., Morla C. y Sainz H. (eds.) 1998. Los bosques de la Península Ibérica. Una interpretación geobotánica. Geoplaneta, Barcelona.

Cox P.M., Betts R.A. y Jones C.D. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature 408: 184-187.

Cruz A. y Moreno J.M. 2001. No allocation trade-offs between flowering and sprouting in the lignotuberous, Mediterranean shrub *Erica australis*. Acta Oecologica-International Journal of Ecology 22: 121-127.

D´Errico F. y Sánchez Goñi M.F.. 2003. Neandertal extinction and the millennial scale climatic variability of OIS 3. Quaternary Science Reviews 22: 769-788.

Díaz M., Pulido F.J. y Marañón T. 2003. Diversidad biológica y sostenibilidad ecológica y económica de los sistemas adehesados. Ecosistemas 2003-3: URL: http://www.aeet.org/ecosistemas/033/investigacion4.htm.

Dukes J.S. y Mooney H.A. 1999. Does global change increase the success of biological invaders? Trends in Ecology and Evolution 14: 135-139.

Emmet B., Beier C., Estiarte M., Tietema A., Kristense H.L., Williams D., Peñuelas J., Schmidt I. y Sowerby I. 2004. The responses of soil processes to climate change: results from manipulation studies across an environmental gradient. Ecosystems (en prensa).

Escudero A., Iriondo J.M., Olano J.M., Rubio A. y Somolinos R.C. 2000. Factors affecting establishment of a gypsophyte: the case of *Lepidium subulatum* (Brassicaceae). American Journal of Botany 87: 861-871.

Espigares T. y Peco B. 1995. Mediterranean annual pasture dynamics: impact of autumn drought. Journal of Ecology 83: 135-142.

Ferrio J.P., Florit A., Vega A., Serrano L. y Voltas J. 2003. Delta C-13 and tree-ring width reflect different drought responses in *Quercus ilex* and *Pinus halepensis*. Oecologia 442: 512–518.

Figueroa M.E. y Davy A,J. 1991. Response of Mediterranean grassland species to changing rainfall. Journal of Ecology 79(4): 925-941.

Filella I., Llusia J., Piñol J. y Penuelas J. 1998. Leaf gas exchange and fluorescence of *Phillyrea latifolia, Pistacia lentiscus* and *Quercus ilex* saplings in severe drought and high temperature conditions. Environmental and Experimental Botany 39: 213-220.

Gaertner M.A., Christensen O., Prego J.A., Polcher J., Gallardo C. y Castro M. 2001. The impact of deforestation on the hydrological cycle in the Western Mediterranean: an ensemble study with two regional climate models. Climate Dynamics 17: 857-873.

Genty D., Blamart D., Ouahdi R., Gilmour M., Baker A., Jouzel J. y Van Exter S. 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillation in western Europe from stalagmite data. Nature 421: 833-837.

Gómez-Aparicio L., Zamora R., Gómez J.M., Hódar J.A., Castro J. y Baraza E. 2004. Applying plant positive interactions to reforestation in mediterranean mountains: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. Ecological Applications (en prensa).

Gracia C., Bellot J., Sabaté S., Albeza E., Djema A., León B., López B., Martínez J.M., Ruíz I. y Tello E. 1997. Análisis de la respuesta de *Quercus ilex* L. a tratamientos de aclareo selectivo. En: Vallejo, V.R. (ed.). La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, Valencia. Pgs. 547-601.

Gracia C., Burriel J.A., Mata T. y Vayreda J. 2000. Inventari Ecològic i Forestal de Cataluña. 9 volums. Centre de Recerca Ecológica i Aplicacions Forestals, Bellaterra, Barcelona.

Gracia C., Sabaté S., López B. y Sánchez A. 2001. Presente y futuro del bosque mediterráneo: balance de carbono, gestión forestal y cambio global. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (eds.). Aspectos funcionales de los ecosistemas mediterráneos. CSIC-AEET, Granada. Pgs. 351-372.

Gracia C., Sabaté S., Martínez J.M. y Albeza E. 1999. Functional responses to thinning. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Springer-Verlag, Heidelberg. Pgs. 329-338.

Groom P.K., Lamont B., Leighton S., Leighton P. y Burrows C. 2004. Heat damage in sclerophylls is influenced by their leaf properties and plant environment. Ecoscience 11: 25-33.

Gulías J., Flexas J., Abadía A. y Medrano H. 2002. Photosynthetic responses to water deficit in six Mediterranean sclerophyll species: possible factors explaining the declining distribution

of *Rhamnus ludovici-salvatoris*, and endemic Balearic species. Tree Physiology 22: 687-697.

Gutschick V.P. y BassiriRad H. 2003. Extreme events as shaping physiology, ecology, and evolution of plants: toward a unified definition and evaluation of their consequences. New Phytologist 160: 21-42.

Harrison P.A., Berry P.M. y Dawson T.P. (eds.). 2001. Climate Change and Nature Conservation in Britain and Ireland: Modelling natural resource responses to climate change (the MONARCH project). UKCIP Technical Report, Oxford.

Hattenschwiler S. y Korner C. 2003. Does elevated CO_2 facilitate naturalization of the non-indigenous *Prunus laurocerasus* in Swiss temperate forests? Functional Ecology 17: 778-785.

Hódar J.A., Castro J. y Zamora R. 2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climate warming. Biological Conservation 110: 123-129.

Hódar J. A. y Zamora R. 2004. Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species. Biodiversity and Conservation 13: (en prensa).

Hughes L. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already here? Trends in Ecology and Evolution 15: 56-61.

Hulme M., Barrow E.M. y Arnell N.W. 1999. Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. Nature 397: 688-691.

Huntley B., Alfano M.J., Allen J.R.M., Pollard D., Tzedakis P.C., de Beaulieu J.L., Grüger E. y Watts B. 2003. European vegetation during marine oxygen isotope stage-3. Quaternary Research 59: 195-212.

Huntley B. y Webb III T. 1988. Vegetation history. Handbook of vegetation. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.

Huston M.A. y Marland G. 2003. Carbon management and biodiversity. Journal of Environmental Management 67: 77-86.

IPCC. 2001. Climate change 2001: the scientific basis. En: Houghton J.T., Ding Y., Griggs J., Noguer M., Van der Linden P.J., Dai X., Maskell K. y Johnson C.A. (eds.). Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Joffre R., Rambal S. y Winkel T. 2001. Respuestas de las plantas mediterráneas a la limitación de agua: desde la hoja hasta el dosel. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (eds.). Aspectos funcionales de los ecosistemas mediterráneos. CSIC-AEET, Granada. Pgs. 37-85.

Jordano P., Bascompte J. y Olesen J.M. 2003. Invariant properties in coevolutionary networks of plant–animal interactions. Ecology Letters 6: 69–81.

Keeling C.D., Chin J.F.S. y Whorf T.P. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO_2 measurements. Nature 382: 146-149.

Kirschbaum M.U.F. 2004. Direct and indirect climate change effects on photosynthesis and transpiration. Plant Biology 6: 242-253.

Körner C. 1995. Towards a better experimental basis for upscaling plant responses to elevated CO_2 and climate warming. Plant, Cell and Environment 18: 1101-1110.

Körner C. 2000. Biosphere responses to CO_2 enrichment. Ecological Applications 10: 1590-1619.

Körner C. 2003. Slow in, rapid out-carbon flux studies and Kyoto targets. Science 300: 1242.

Larcher W., Wagner J., Neuner G., Méndez M., Jiménez M.S. y Morales D. 1991. Thermal limits of photosynthetic function and viability of leaves of *Persea americana*. Acta Oecologica 12: 529-541.

Lloret F., Pausas J.G. y Vilà M. 2003. Response of Mediterranean plant species to different fire regimes in Garraf Natural Park (Catalonia, Spain): field observations and modelling predictions. Plant Ecology 167: 223-235.

Lloret F., Penuelas J. y Estiarte M. 2004. Experimental evidence of reduced diversity of seedlings due to climate modification in a Mediterranean-type community. Global Change Biology 10: 248-258.

Lloret F. y Siscart D. 1995. Los efectos demográficos de la sequía en poblaciones de encina. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 2: 77-81.

Llusià J., Peñuelas J. y Gimeno B.S. 2002. Seasonal and species-specific Mediterranean plant VOC emissions in response to elevated ozone concentrations. Atmospheric Environment 36: 3931-3938.

Luis-Calabuig E., Tarrega R. y Valbuena L. 2000. Ten years of recovery of *Cistus ladanifer* after experimental disturbances. Israel Journal of Plant Sciences 48: 271-276.

Maestre F.T. y Cortina J. 2004. Do positive interactions increase with abiotic stress? A test from a semi-arid steppe. Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences (en prensa).

Maestre F.T., Cortina J., Bautista S. y Bellot J. 2003. Does *Pinus halepensis* facilitate the establishment of shrubs in Mediterranean semi-arid afforestations? Forest Ecology and Management 176: 147-160.

Marañón T., Ajbilou R., Ojeda F. y Arroyo J. 1999. Biodiversity of woody species in oak woodlands of southern Spain and northen Morocco. Forest Ecology and Management. 115: 147-156.

Martínez-Vilalta J. y Piñol J. 2002. Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. Forest Ecology and Management 161: 247-256.

Martinez-Vilalta J., Piñol J. y Beven K. 2002a. A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. Ecological Modelling 155: 127-147.

Martinez-Vilalta J., Prat E., Oliveras I. y Piñol J. 2002b. Xylem hydraulic properties of roots and stems of nine Mediterranean woody species. Oecologia 133: 19-29.

Mesa-Jimenez S. 2002. Historia de los bosques de la Península Ibérica. En: Charco J. (ed.). La regeneración natural del bosque mediterráneo en la Península Ibérica. ARBA-Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. Pgs. 153-169.

Milchunas A.H., Sala O.E. y Laurenroth W.K. 1988. A generalized model of the effects of grazing by large herbivores on grassland community structure. American Naturalist 132: 87-106.

Millán M.M. 2002. El ciclo hídrico en el Mediterráneo: un estudio del efecto de las masas arboladas. En: Charco J. (ed.). La regeneración natural del bosque mediterráneo en la Península Ibérica. ARBA-Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. Pgs. 19-45.

Mooney H.A. y Hobbs R.J. 2000. Invasive species in a changing world. Island Press, Washington.

Moreno J.M., Cruz A., Fernández-González F., Luna B., Pérez B., Quintana J.R. y Zuazua E. (en prensa). Ecología del monte mediterráneo en relación con el fuego: El jaral-brezal de Quintos de Mora (Toledo). En: Vallejo V.R. (ed.), La Restauración de los Montes Quemados. CEAM, Valencia.

Moreno J.M., Zuazua E., Luna B., Céspedes B. y Torres I. (en prensa). Harmonizing needs in studies of fire effects and fire-restoration in southern Europe. En. Avdelas A., Yeroyanni M. y Fabbri K. (eds.). Proceedings of the EU-MEDIN Forum on Disaster Research. The Road to Harmonisation. Thessaloniki 26-27 May 2003. Comisión Europea.

Moreno J.M. y Vallejo R. 1999. Fire impacts on the ecosystem and restoration: summary of the main findings from the Delfi-Fire database. Proceedings of the International Symposium; Delfi Action; Forest Fires: Needs y Innovations; Athens; 18/19 November 1999; Pgs. 239-261.

Moreno J.M., Vázquez A. y Vélez R. 1998. Recent History of Forest Fires in Spain. En: Moreno J.M. (ed.), Large Forest Fires. Backhuys Publishers, Leiden, NL. Pgs. 159-185.

Mulligan M., Burke S.M. y Ramos M.C. 2004. Climate change, land-use change and the "desertification" of Mediterranean Europe. En: Mazzoleni S., di Pasquale G., Mulligan M.,

di Martino P. y P. Rego P. (eds.). Recent dynamics of the Mediterranean vegetation and landscape. John Wiley y Sons, Chichester. Pgs. 259-279.

Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G. y Nemani R.R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature 386: 698-702.

Niinemets U., Valladares F. y Ceulemans R. 2003. Leaf-level phenotypic variability and plasticity of invasive *Rhododendron ponticum* and non-invasive *Ilex aquifolium* co-occurring at two contrasting European sites. Plant Cell and Environment 26: 941-956.

Norby R. J. y Luo Y. 2004. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multi-factor world. New Phytologist 162: 281-293.

Nowak R.S., D.S. Ellsworth y S.D. Smith. 2004. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO_2- do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? New Phytologist 162: 253-280.

Ogaya R. y Peñuelas J. 2003. Comparative field study of *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*: photosynthetic response to experimental drought conditions. Environmental and Experimental Botany 50: 137-148.

Ogaya R., Peñuelas J., Martínez-Vilalta J. y Mangirón M. 2003. Effect of drought on diameter increment of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* in a holm oak forest of NE Spain. Forest Ecology Management 180: 175-184.

Ojeda F. 2001. El fuego como factor clave en la evolución de plantas mediterráneas. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (eds.). Ecosistemas Mediterráneos. Análisis funcional. CSIC-AEET, Madrid. Pgs. 319-349.

Parmesan C. y Yohe G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature 421: 37-42.

Pattison R.R., Goldstein G. y Ares A. 1998. Growth, biomass allocation and photosynthesis of invasive and native Hawaiian rainforest species. Oecologia 117: 449 - 459.

Pausas J. G. 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). Climate Change 63: 337-350.

Peco B., Espigares T. y Levassor C. 1998. Trends and fluctuations in species abundance and richness in Mediterranean annual pastures. Applied Vegetation Science 1: 21-28.

Peñuelas J. 1996. Overview on current and past global changes in the Mediterranean ecosystems. Orsis 11: 165-176.

Peñuelas J. 2001. Cambios atmosféricos y climáticos y sus consecuencias sobre el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas terrestres mediterráneos. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (eds.). Ecosistemas Mediterráneos. Análisis funcional. CSIC-AEET, Madrid. Pgs. 423-455.

Peñuelas J. y J. Azcon-Bieto. 1992. Changes in leaf deltac-13 of herbarium plant species during the last 3 centuries of CO2 increase. Plant Cell and environment 15: 485-489.

Peñuelas J. y Boada M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). Global Change Biology 9: 131-140.

Peñuelas J. y Filella I. 2001. Phenology: responses to a warming world. Science 294: 793-795.

Peñuelas J., Filella I. y Comas P. 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. Global Change Biology 8: 531-544.

Peñuelas J., Filella I., Lloret F., Pinol J. y Siscart D. 2000. Effects of a severe drought on water and nitrogen use by *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. Biologia Plantarum 43: 47-53.

Peñuelas J., Filella I., Llusia J., Siscart D. y Pinol J. 1998. Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. Journal of Experimental Botany 49: 229-238.

Peñuelas J., Filella I., Zhang X., Llorens L., Ogaya R., Lloret F., Comas P., Estiarte M. y Terradas J. 2004a. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. New Phytologist 161: 837-846.

Peñuelas J., Gordon C., Llorens L., Nielsen T., Tietema A., Beier C., Bruna P., Emmet B.A., Estiarte M. y Gorissen T. 2004b. Non-intrusive field experiments show different plant responses to warming and drought among sites seasons and species in a North-South European gradient. Ecosystems 7 (6): 598-612.

Peñuelas J., Idso B., Ribas A. y Kimball B.A. 1997. Effects of long-term atmospheric CO_2 enrichment on the mineral concentration of *Citrus aurantium* leaves. New Phytologist 135: 439-444.

Peñuelas J., Lloret F. y Montoya R. 2001. Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain. Forest Science 47: 214-218.

Peñuelas J. y Llusià J. 2002. Linking photorespiration, monoterpenes and thermotolerance in *Quercus*. New Phytologist 155: 227-237.

Peñuelas J. y J. Llusià J. 2003. BVOCs: plant defense against climatic warming? Trends in Plant Science 8: 105-109.

Peñuelas J. y Llusià J. 2001. The complexity of factors driving volatile organic compound emissions by plants. Biologia Plantarum 44: 481-487.

Peñuelas J. y Matamala R. 1990. Changes in n and s leaf content, stomatal density and specific leaf area of 14 plant species during the last 3 centuries of CO_2 increase. Journal of Experimental Botany 41: 1119-1124.

Peñuelas J., Sabaté S., Filella I. y Gracia C. 2003. Sistemas naturals: ecosistemes terrestres. Páginas: En: I. d. E. Catalans (ed.). Informe sobre el canvi climatic a Catalunya. Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, Barcelona.

Pereira J.S., Correia A.V., Correia A.P., Branco M., Bugalho M., Caldeira M.C., Cruz C.S., Freitas H., Oliveira A.C., Pereira J.M.C., Reis R.M. y Vasconcelos M.J. 2002. Forests and biodiversity. En: Santos F.D., Forbes K. y Moita R. (eds.). Climate change scenarios, impacts and adaptation measures. Gradiva, Lisboa. Pgs. 364-413.

Pérez-Obiol R. y Julià R. 1994. Climatic change on the Iberian Peninsula recorded in a 30,000 year pollen record from lake Banyoles. Quaternary Research 41: 91-98.

Piñol J., Terradas J. y Lloret F. 1998. Climate warming wildfire hazard, and wildfire occurence in coastal eastern Spain. Climate Change 38: 345-357.

Pons A. y Suc J.P. 1980. Lés témoignages de structures de végétation Méditerranéennes dan le passée antérieur à l'action de l´home. Natur. Monsp. HS 69-78.

Poorter H. y Navas M L. 2003. Plant growth and competition at elevated CO2: on winners, losers and functional groups. New Phytologist 157: 175-198.

Prieto F. y Rodríguez-Murillo J.C.. 2003. Contribución de los incendios forestales en España a las emisiones de gases de efecto invernadero: tendencias observadas y posibles futuros escenarios. Congreso de la Asociación Nacional de Ecología Terrestre (AEET), Barcelona.

Pugnaire F.I., Armas C. y Valladares F. 2004. Soil as a mediator in plant-plant interactions in a semi-arid community. Journal of Vegetation Science 15: 85-92.

Pugnaire F.I. y Luque M.T. 2001. Changes in plant interactions along a gradient of environmental stress. Oikos 93: 42-49.

Pyke C.R. 2004. Habitat loss confounds climate change. Frontiers in Ecology and the Environment 2: 178:182.

Rambal S. y Debussche G. 1995. Water balance of Mediterranean ecosystems under a changing climate. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (eds.). Global change and Mediterranean-type ecosystems. Springer Verlag, New York. Pgs. 386-407.

Rehfeldt G., Wykoff W.R. y Ying C.C. 2001. Physiological plasticity, evolution, and impacts of a changing climate on *Pinus contorta*. Climatic Change 50: 355-376.

Reichstein M., Tenhunen J.D., Roupsard O., Ourcival J.M., Rambal S., Miglietta F., Peressotti A., Pecchiari M., Tirone G. y Valentini R. 2002. Severe drought effects on ecosystem CO_2 and H_2O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? Global Change Biology 8: 999-1017.

Reille M. y Pons A. 1992. The ecological significance of sclerophyllous oak forests in the western part of the Mediterranean basin: a note on pollen analytical data. Vegetatio 99-100: 13-17.

Reyero J.M. 2002. La naturaleza de España. Organsimo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Rice K.J. y Emery N.C. 2003. Managing microevolution:restoration in the face of global change. Frontiers in Ecology and the Environment 1: 469-478.

Rodá F., Ibáñez J. y Gracia C. 2003. L'estat dels boscos. En: L'estat del Medi Ambient a Catalunya. Generalitat de Catalunya.

Rodá F., Mayor X., Sabaté S. y Diego V. 1999. Water and nutrient limitations to primary production. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Springer-Verlag, Heidelberg. Pgs. 183-194.

Rodríguez-Murillo J.C. 1997. Temporal variations in the carbon budget of forest ecosystems in Spain. Ecological Applications 7: 461-469.

Rodríguez-Murillo J.C. 1999. El ciclo mundial del carbono. Método de cálculo por los cambios de uso de la tierra. Balance de carbono en los bosques españoles. En: Hernández-Álvarez F. (ed.). El calentamiento global en España. CSIC, Madrid. Pgs. 97-139.

Rojas E. 2001. Política forestal y conservación de la biodiversidad en los montes mediterráneos. En: Camprodon J. y Plana E. (ed.). Conservación de la biodiversidad y gestión forestal. Universitat de Barcelona, Barcelona. Pgs. 75-84.

Rojo L. y Sánchez-Fuster M.C. 1996. Red de Estaciones Experimentales de seguimiento y evaluación de la erosión y desertificación.LUCDEME (RESEL) Catálogo de Estaciones. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio Ambiente., Madrid.

Sabaté S., Gracia C. y Sánchez A. 2002. Likely effects of Climate Change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean Region. Forest Ecology and Management 162: 23-37.

Santandreu M. y Lloret F. 1999. Effect of flowering phenology and habitat on pollen limitation in *Erica multiflora*. Canadian Journal of Botany 77: 734-743.

Sanz-Elorza M., Dana E.D., Gonzalez A. y Sobrino E. 2003. Changes in the high-mountain vegetation of the central Iberian Peninsula as a probable sign of global warming. Annals of Botany 92: 273-280.

Sebastiá M.T., Casals P., Domínguez G. y Costa J. 2003. Agricultura i silvicultura. En: I. d. E. Catalans (ed.). Informe sobre el canvi climatic a Catalunya. Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, Barcelona.

Sebastiá M.T., Mola B., Arenas J.M. y Casals P. 2004. Biomass responses of subalpine grasslands in the Pyrenees under warming conditions. Land Use Systems in Grassland Dominated Regions. European Grassland Federation 9: 290-292.

Siemann E. y Rogers W.E. 2003. Changes in light and nitrogen availability under pioneer trees may indirectly facilitate tree invasions of grasslands. Journal of Ecology 91: 923-931.

Sperling F.N., Washington R. y Whittaker R.J. 2004. Future climatic change of the subtropical North Atlantic: implications for the cloud forests of Tenerife. Climatic Change 65(1-2): 103-123.

Stefanescu C., Peñuelas J. y Filella I. 2004. The effects of climatic change on the phenology of butterflies in the Northwest Mediterranean Basin. Global Change Biology 9: 1494-1506.

Stevenson A.C. y Harrison R.J. 1992. Ancient forests in Spain: a model for land-use and dry forest management in south-west Spain from 4000 BC to 1900 AD. Proceedings of the Prehistoric Society 58: 227-247.

Suding K., Gross K. y Houseman G. 2004. Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. Trends in Ecology and Evolution 19: 46-53.

Tardif J., Camarero J.J., Ribas M. y Gutiérrez E. 2003. Spatiotemporal variability in radial growth of trees in the Central Pyrenees: climatic and site influences. Ecological Monographs 73: 241-257.

Terradas J. 1996. Ecologia del foc. Proa, Barcelona.

Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.-D., Rebmann C., Moors E.J., Granier A., Gross P., Jensen N.O., Pilegaard K., Lindroth A., Grelle A., Bernhofer C., Grünwald T., Aubinet M., Ceulemans R., Kowalski A. S., Vesala T., Rannik Ü., Berbigier P., Loustau D., Thorgeirsson H., Ibrom A., Morgenstern K., Clement R., Moncrieff J., Montagnani L.,

Minerbi S. y Jarvis P.G. 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature 404: 861-865.

Valladares F. 2003. Light heterogeneity and plants: from ecophysiology to species coexistence and biodiversity. En: Esser K., Lüttge U., Beyschlag W. y Hellwig F. (eds.). Progress in Botany. Springer Verlag, Heidelberg. Pgs. 439-471.

Valladares F. 2004a. El bosque mediterráneo, un sistema antropizado y cambiante. En: Valladares F. (ed.). Ecología del bosque mediterraneo en un mundo cambiante. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Valladares F. 2004b. Global change and radiation in Mediterranean forest ecosystems: a meeting point for ecology and management. En: Arianoutsou M. y Papanastasis V. (eds.). Ecology, Conservation and Sustainable Management of Mediterranean type ecosystems of the World. Millpress, Rotterdam. Pgs. 1-4.

Valladares F., Aranda I. y Sánchez-Gómez D. 2004a. La luz como factor ecológico y evolutivo para las plantas y su interacción con el agua. En: Valladares F. (ed.). Ecología del bosque mediterraneo en un mundo cambiante. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Valladares F., Balaguer L., Martinez-Ferri E., Perez-Corona E. y Manrique E. 2002. Plasticity, instability and canalization: is the phenotypic variation in seedlings of sclerophyll oaks consistent with the environmental unpredictability of Mediterranean ecosystems? New Phytologist 156: 457-467.

Valladares F., Dobarro I., Sánchez-Gómez D. y Pearcy R.W. 2004b. Photoinhibition and drought in Mediterranean woody saplings: scaling effects and interactions in sun and shade phenotypes. Journal of Experimental Botany (en prensa).

Valladares F. y Pearcy R.W. 2002. Drought can be more critical in the shade than in the sun: a field study of carbon gain and photoinhibition in a Californian shrub during a dry El Niño year. Plant Cell and Environment 25: 749-759.

Valladares F., Vilagrosa A., Peñuelas J., Ogaya R., Camarero J.J., Corcuera L., Sisó S. y Gil-Pelegrin E. 2004c. Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. En: Valladares F. (ed.). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Vilà M. y Muñoz I. 1999. Patterns and correlates of exotic and endemic plant taxa in the Balearic islands. Ecología Mediterrànnee 25: 153-161.

Vilagrosa A., Bellot J., Vallejo V.R. y Gil-Pelegrin E. 2003. Cavitation, stomatal conductance, and leaf dieback in seedlings of two co-occurring Mediterranean shrubs during an intense drought. Journal of Experimental Botany 54: 2015-2024.

Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J. y Melillo, J.M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. Science 277: 494.

Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.M., Hoegh-Guldbergi O. y Bairlein F. 2002. Ecological responses to recent climate change. Nature 426: 389-395.

Willis K.J. y Whittaker R.J. 2000. The refugial debate. Science 287: 1406-1407.

Winnet S.M. 1998. Potential effects of climate change on US forests: a review. Climate Research 11: 39-49.

Yll E.I., Pérez-Obiol R., Pantaleón-Cano J. y Roure J.M. 1997. Palynological Evidence for Climatic Change and Human Activity during the Holocene on Minorca (Balearic Islands). Quaternary Research 48: 339-347.

Zamora, R., García-Fayos P. y Gómez-Aparicio L. 2004. Las interacciones planta-planta y planta animal en el contexto de la sucesión ecológica. En: Valladares F. (ed.). Ecología del bosque mediterraneo en un mundo cambiante. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Zohlen, A., Gonzalez-Rodriguez A.M., Jimenez M.S., Lösch R. y Morales D. 1995. Transpiración y regulación estomática en árboles de la laurisilva canaria medidos en primavera. Vieraea 24: 91-104.

3. IMPACTOS SOBRE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS CONTINENTALES

Miguel Álvarez Cobelas, Jordi Catalán y Diego García de Jalón

Contribuyentes

M. Alonso, V. Amores, J. Armengol, J. Artigas, J. Barquín, M. M. Bayo, D. Boix, A. Butturini, A. Camacho, P. Carrillo, J. Casas, S. Cirujano, F. A. Comín, L. Cruz Pizarro, A. Gaudes, J. Lucena, M. Menéndez, R. Morales, E. Moreno, I. Muñoz, C. Pérez Martínez, J. Pozo, X. Quintana, I. Reche, M. A. Rodrigo, A. Romaní, S. Sabater, P. Sánchez Castillo, J. Soria, M L. Suárez, S. Bernal, F. Sabater, J. Toja, J. C. Vega, I. de Vicente, M. R. Vidal Abarca

Revisores

F. A. Comín, P. García Murillo, E. Montero, J. R. Picatoste, J. C. Rodríguez Murillo, C. Rojo, A. Sousa, B. A. Valero Garcés

R. Psenner

RESUMEN

Los ecosistemas acuáticos continentales españoles (EACE) son muy diversos, de pequeño tamaño en general, están incluidos en cuencas hidrográficas muy grandes, a menudo dependen de las aguas subterráneas y experimentan intensas fluctuaciones hídricas, relacionadas con el balance hídrico local, que afectan a su funcionamiento ecológico. Su importancia internacional se deriva de que: 1º) las características climáticas, geológicas, físiográficas, hidrológicas y paisajísticas de la Península Ibérica hacen que España posea la mayor diversidad de sistemas acuáticos continentales de Europa; 2º) hay 49 humedales incluidos en la lista del Convenio Ramsar; 3º) son, en su mayoría, ambientes distintos de los europeos templados fríos, con multitud de lugares endorreicos y ecosistemas temporales, así como floras y faunas singulares y muy específicas, parte de las cuales datan de la Era Terciaria; 4º) los lagos alpinos de Sierra Nevada son los lagos glaciares más meridionales de Europa; 5º) la nueva Directiva-Marco Europea del Agua los incluye en la Región Ibérico-Macaronésica, distinguiendo además a los Pirineos como una región particular.

Con un gran nivel de certeza se puede asegurar que el cambio climático hará que parte de los EACE pasen de ser permanentes a estacionales; algunos desaparecerán. La biodiversidad de muchos de ellos se reducirá y sus ciclos biogeoquímicos se verán alterados. La magnitud de estos cambios aún no puede precisarse. Los ecosistemas más afectados serán: ambientes endorreicos, lagos, lagunas, ríos y arroyos de alta montaña (1600-2500 metros), humedales costeros y ambientes dependientes de las aguas subterráneas.

Las posibilidades de adaptación de los EACE al cambio climático son limitadas. A fin de paliar los efectos, son necesarias políticas de ahorro de agua, mejora de su calidad e intensificación de las medidas de conservación de los hábitats terrestres que los rodean. Teniendo en cuenta los previsibles conflictos por el agua que surgirán con el cambio climático, hay una certeza razonable de que la conservación de los EACE pueda ser la menor de las prioridades y la más fácil de ignorar.

Los cambios que verosímilmente experimentarán los EACE afectarán a la conservación ambiental y a los sectores del turismo, la protección civil, el abastecimiento de aguas y la pesca continental. En la relación del cambio climático con los EACE hay una serie de lagunas que se deben a: 1º) carencia de series de datos fiables a largo plazo; 2º) información aún escasa sobre el estado ecológico y la biología de las especies más importantes 3º) desconocimiento de los procesos de histéresis, y 4º) desconocimiento de los efectos que sobre los EACE pueden tener los cambios abruptos o graduales de las comunidades vegetales terrestres y de la geología de las cuencas hidrográficas en que se enclavan. Todos los hechos precedentes, por tanto, tienen implicaciones para las políticas ambiental, turística, pesquera deportiva y científica. Las necesidades de investigación son grandes, pues prácticamente no se ha abordado aún el conocimiento de los EACE en relación con el cambio climático.

3.1. INTRODUCCIÓN

3.1.1. Los ecosistemas acuáticos continentales españoles

El número aproximado de ecosistemas acuáticos continentales asciende a más de 1000 grandes embalses (Dirección General de Obras Hidráulicas 1988), 2500 lagos alpinos mayores de 0,2 ha en las grandes cadenas montañosas (Pirineos, Sierra Nevada, Sistema Central, Sistema Ibérico, Cordillera Cantábrica), 50 lagos cársticos en Ciudad Real, Cuenca, Girona, Huesca y Lleida, 11 grandes cuencas hidrográficas con numerosos cursos fluviales temporales y permanentes, más de 500 lagos generados por actividades mineras (Montes 1993) y alrededor de 800 humedales de extensión superior a 0,2 ha, incluyendo lagos someros y albuferas (INITEC 1991; www.mma.es/conserv_nat/planes/plan_humed/plan_humed.htm).

3.1.2. La dependencia de las aguas subterráneas

Muchos ambientes acuáticos continentales (sobre todo, ríos, lagos y humedales) dependen de las aguas subterráneas. El contraejemplo más evidente es el del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, que se desconectó del acuífero subterráneo en 1986 por sobreexplotación del mismo y desde entonces ha de recibir agua de otra cuenca hidrográfica para subsistir. Los flujos regionales y locales de las aguas subterráneas (Toth 1963) no sólo alimentan a lagos y humedales (Montero 2000), sino que también determinan que muchos cauces fluviales reciban agua por esa vía [véase el Capítulo de Recursos Hídricos]. Es decir, muchos tramos de los ríos españoles son "ganadores" y los caudales e hidroquímica, de los que depende su funcionamiento ecológico, son el resultado de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas (Montes 1995). En cualquier caso, la relación hídrica cuantitativa entre acuíferos y aguas superficiales aún no se ha estudiado suficientemente en España hasta la fecha (véanse Benavente y Rodríguez 1997, de Castro y Muñoz Reinoso 1997). Por otro lado, la recarga de los acuíferos depende de la relación entre la estación del año cuando ocurre la recarga (o el número de veces que ocurre) y la cantidad de agua disponible para la recarga (la pluviosidad; Fetter 2001), estos hechos son especialmente relevantes en zonas semiáridas, como las presentes en buena parte de España, donde la mayor recarga suele suceder tras lluvias intensas (Wood y Sandford 1994).

3.1.3. Importancia internacional de los ecosistemas acuáticos continentales españoles

Se fundamenta en los siguientes aspectos:

1º) Las características climáticas, geológicas, físiográficas, hidrológicas y paisajísticas de la Península Ibérica hacen que España posea la mayor diversidad de sistemas acuáticos continentales de Europa.

2º) Hay 49 humedales incluidos en la lista del Convenio Ramsar (www.mma.es/conserv nat/acciones/humedales/html/comite/lista ramsar.htm; MIMAM, 1999).

3º) Se trata, en su mayoría, de ambientes distintos de los europeos templados fríos, con multitud de lugares endorreicos y ecosistemas temporales muy fluctuantes, los cuales tienen una flora y una fauna singulares y muy específicas.

4º) Aunque las faunas acuáticas continentales se consideran relativamente recientes, muchos humedales tienen una fauna relicta de la Era Terciaria (Alonso 1998).

5º) Los lagos alpinos de Sierra Nevada son los lagos glaciares más meridionales de Europa.

6º) La estrecha dependencia de nuestros ecosistemas acuáticos continentales de las aguas subterráneas y de su cuenca hidrográfica superficial los hace muy vulnerables y objetivo preferente de la nueva Directiva-Marco Europea del Agua (Directiva 2000/60/CE), la cual los incluye en la Región Ibérico-Macaronésica (mapa A, apéndice XI), aunque distinga los Pirineos como una región particular.

3.1.4. Sensibilidad de los ecosistemas acuáticos españoles al clima

Los ambientes acuáticos españoles son extremadamente sensibles al clima porque la inmensa mayoría tiene un tiempo de residencia del agua reducido y, por tanto, depende de la precipitación anual o, incluso, de la estacional. Los niveles y caudales de la mayoría de ríos, lagos, embalses y humedales se vinculan a la precipitación a corto plazo de modo muy directo. Obviamente, la temperatura del aire también condiciona los sistemas acuáticos a través de su influencia directa en la temperatura del agua, que -a su vez- afecta a los procesos metabólicos y biogeoquímicos que suceden en los ecosistemas acuáticos (Carpenter *et al.* 1992).

Por otra parte, las influencias climáticas indirectas son muy importantes en los ambientes acuáticos continentales de la Península Ibérica, ya que éstos resultan muy dependientes de la cuenca hidrográfica donde se enclavan y, por tanto, los efectos del cambio climático sobre los suelos y la vegetación de aquélla tendrán también unos efectos adicionales sobre los ambientes acuáticos (Catalán *et al.* 2002, Comín y Alonso 1988). En general, las cuencas hidrográficas son muy grandes en comparación con los ecosistemas acuáticos situados en ellas, con lo cual éstos acusan una gran influencia del paisaje (Prat 1995). Los cambios en la transpiración de la vegetación terrestre, por ejemplo, probablemente tengan una gran incidencia sobre la disponibilidad del agua en las cuencas hidrográficas (Schindler 1997), como atestigua el estudio de Beguería *et al.* (2003).

3.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

En relación con el cambio climático, la temperatura y la precipitación experimentarán una serie de variaciones aún imperfectamente establecidas [véase el Capítulo de El Clima en España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI], cuyos efectos generales sobre los ecosistemas acuáticos continentales podrían ser los siguientes:

3.2.1. Efectos de los cambios en la precipitación sobre la disponibilidad de agua: promedios y variabilidad

Las tendencias más verosímiles de la pluviosidad futura son de dos tipos: disminuciones de los promedios y aumento de la variabilidad, si bien puede haber variaciones geográficas relevantes [véase el Capítulo El Clima en España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI; apartado 1.3.6]. Ambos fenómenos tienen importantes consecuencias sobre la disponibilidad de agua para los ecosistemas acuáticos continentales porque a largo plazo podrían hacer desaparecer muchos de los que ahora son temporales y convertirse en temporales algunos de los que ahora son permanentes. El aumento de la variabilidad en las precipitaciones determinará una mayor variabilidad en los caudales (Arnell *et al.* 1996). Sin embargo, la incertidumbre estacional resulta aún elevada. La previsible reducción de la precipitación estival quizá no sea muy trascendente para los ecosistemas acuáticos continentales, ya que en la actualidad sus valores actuales son bajos. En cambio, las variaciones en invierno y primavera podrían ser determinantes para los ambientes propensos a la temporalidad, tanto lóticos (por ejemplo, riachuelos, torrentes y ramblas) como lénticos (por ejemplo, lagunas de zonas semiáridas).

3.2.2. Efectos del calentamiento global

La temperatura media del aire también aumentará, probablemente más en los meses fríos y en las noches que en los meses cálidos y durante el día. Por tanto, se producirá un incremento de la temperatura del agua, quizá alargando el periodo otoñal de actividad biológica. En cualquier caso, cabe esperar modificaciones de las tasas de los procesos biogeoquímicos y metabólicos, lo cual eventualmente podría redundar en cambios en la estructura de las comunidades biológicas. Es previsible que la estratificación de los lagos se prolongue durante más tiempo a lo largo del año (Livingstone 2003). En las zonas alpinas, la duración del manto nival y de la cubierta lacustre de hielo se reducirá, anticipando las fases primaverales en estos sistemas y propagándose las repercusiones de estos cambios al funcionamiento del lago durante el resto del periodo cálido.

3.2.3. Efectos del aumento del nivel del mar

Aunque las previsiones no lo estiman en una cantidad demasiado elevada (0,11-0,77 metros hasta 2100; Church *et al.* 2001), pueden llegar a ser importantes en el caso de los humedales costeros porque, o bien los inundarán y destruirán (pues se adentran muy poco en tierra firme), o incrementarán la intrusión salina, cambiando la naturaleza del humedal. De todos modos, el efecto sobre las zonas costeras probablemente sea muy dispar, según las distintas zonas de la Península Ibérica [véase el Capítulo de Zonas Costeras].

3.2.4. Efectos del aumento del CO_2

No es esperable que sus efectos sean significativos sobre los ecosistemas acuáticos continentales. En general, la variabilidad que puede introducir el CO_2 es de menor relevancia que la determinada por variaciones estacionales de nutrientes y factores climáticos. En cierta medida, las entradas de carbono alóctono, procedentes de cuencas hidrográficas muy grandes en comparación con los ecosistemas limnéticos y su oxidación total o parcial en ellos pueden determinar que los ecosistemas acuáticos españoles sean más emisores que sumideros. También se espera el aumento de la solubilidad de la calcita de suelos y rocas debido a una lluvia con más CO_2, lo cual producirá mayores entradas de calcio en lagos y ríos (Roland Psenner, comunicación personal).

3.2.5. Efectos de la disminución de la nubosidad

Si se diera un descenso de la nubosidad durante el periodo cálido del año, supondría un aumento de la cantidad de radiación UV que llega al ecosistema acuático, con los subsiguientes posibles efectos de fotoinhibición de la fotosíntesis, de alteraciones metabólicas de plantas y animales y del incremento de fotooxidaciones de sustancias orgánicas disueltas (Williamson y Zagarese 1994). De todos modos, no parece que este efecto de la nubosidad vaya a ser significativo para todo el territorio, pues las zonas de montaña más expuestas ya poseen floras y faunas adaptadas a condiciones elevadas de dicha radiación (Halac *et al.* 1997, Sommaruga *et al.* 1999). De todos modos, es probable que dichos efectos queden enmascarados por otras consecuencias más relevantes del cambio climático. Algunos ecosistemas de alta montaña podrían eventualmente verse mejor protegidos frente a la radiación ultravioleta si el bosque se desplazara hacia altitudes superiores (Roland Psenner, comunicación personal), como es de esperar (véanse los Capítulos Ecosistemas terrestres y Sector forestal).

3.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los efectos del cambio climático se acumulan a otros efectos antrópicos originados por actividades más inmediatas, como son los cambios en el uso del suelo, las extracciones de agua o los emplazamientos de vertidos y desechos. En ocasiones, puede ser difícil discernir entre ellos, pero -en cualquier caso- debería tenerse en cuenta la posible interacción entre los mismos. Por ejemplo, las inundaciones extraordinarias no están previstas en las obras de regulación de caudales y parece verosímil que dichas inundaciones aumenten si es que lo hacen los eventos extremos. Aunque definir los impactos del cambio climático en detalle resulte una tarea difícil con las previsiones actuales, no resulta en absoluto descabellado pensar que los conflictos socio-económicos relacionados con el agua probablemente aumentarán. En este aspecto, es preocupante la posición marginal que pueden ocupar los argumentos en favor de acciones para la conservación de los ambientes acuáticos continentales en un país que tradicionalmente ha vivido de espaldas a ellos cuando no obtenía un beneficio directo de los mismos.

3.3.1. Análisis de la sedimentación Holocena en lagos y humedales

A lo largo de la historia reciente de la Tierra, no ha habido condiciones análogas a la que nos conduce el presente aumento de CO_2 atmosférico, ya que durante los últimos 400.000 años, en los que tenemos un conjunto de especies y ecosistemas similares a los actuales, no se han dado nunca unas concentraciones de este compuesto tan elevadas como las que es previsible alcanzar cuando se estabilice el aumento actual, incluso en el mejor de los escenarios posible. No obstante, es muy probable que sí pasemos por situaciones transitorias de mayor o menor duración que presenten similitudes con algunos periodos del pasado reciente. En este sentido, el registro de las condiciones ambientales a lo largo del Holoceno (los últimos 10.000 años) que existe en el sedimento de los lagos y humedales puede ser informativo sobre situaciones y tasas de cambio esperables. Las reconstrucciones de variables ambientales a partir de los sedimentos lacustres permiten obtener referencias a escalas temporales superiores a las derivadas de medidas instrumentales (dos siglos, como máximo) y de documentos históricos (Barriendos 1997) y observar así los efectos de cambios climáticos bruscos en el pasado, imposibles de evaluar experimentalmente sobre ecosistemas concretos en la actualidad (Kelts y Talbot 1989, Gierlowski-Kordesch y Kelts 1994, Last y Smol 2001, Cohen 2003). De todos modos, la interpretación de los procesos observados se relaciona con la geología y la geografía locales, pues las respuestas de los lagos a cambios globales siempre resultan muy dependientes de sus propias características geológicas, geográficas y climáticas y de las del entorno físico próximo.

Los cambios climáticos acaecidos en la Península Ibérica durante el Holoceno han tenido un impacto mayor en el balance hídrico que en la temperatura, aunque ambos no sean absolutamente independientes (Harrison *et al.* 1992, Cheddadi *et al.* 1997, Prentice *et al.* 1998). Por ello, las reconstrucciones ambientales basadas en los registros estratigráficos del Holoceno que resultan de más interés son las que se relacionan con el balance hídrico (Fig. 3.1). Las reconstrucciones realizadas muestran que, entre las áreas mediterráneas y atlánticas de España, existió un gradiente hidrológico durante el Holoceno similar al actual y que los ecosistemas de las zonas mediterráneas en los que la disponibilidad hídrica fue siempre relativamente menor reaccionaron más rápidamente a las fluctuaciones climáticas que los situados en las zonas de influencia atlántica.

La fiabilidad de las reconstrucciones de los ambientes lacustres a partir de los datos del Holoceno es elevada a la escala de milenios (Pérez i Obiol y Juliá 1994, Luque y Juliá 2002). Desde el Neolítico, los cambios en la vegetación de los ecosistemas terrestres han podido tener una gran componente antrópica, mientras que los cambios hidrológicos producidos por las actividades humanas se restringen a los últimos siglos (Valero Garcés *et al.* 2000a-c). Si

bien es cierto que un cambio en la vegetación modifica el balance hídrico debido a los cambios de la evapotranspiración en las cuencas originados por las variaciones en la cobertura arbórea, las reconstrucciones existentes resultan de menor fiabilidad a escalas temporales más detalladas. La falta de estudios en los lagos adecuados, la deficiente resolución vertical de los testigos de sedimento y el coste económico que supone su estudio detallado ha limitado este tipo de estudios hasta la fecha (Battarbee *et al.* 2002). A pesar de ello, diversos trabajos muestran la extremada sensibilidad de los sistemas lacustres a las fluctuaciones debidas a las oscilaciones en el Atlántico Norte, como -por ejemplo- los ciclos de 1500 años encontrados en Sanabria (Luque y Juliá 2002) e incluso con teleconexiones mucho más alejadas, como puede ser el registro de las oscilaciones de El Niño en la laguna de Gallocanta (Rodó *et al.* 1997). Apenas hay estudios a escala estacional que analicen el impacto pasado o futuro de los cambios en la distribución anual de las precipitaciones. Sin embargo, existen indicaciones de que los cambios en la precipitación invernal han sido decisivos en el balance hídrico y sobre los cambios en las comunidades vegetales (Valero Garcés *et al.* 2004).

El clima de la Península Ibérica durante el Holoceno ha experimentado variaciones notables, particularmente en la pluviosidad, las cuales pudieran vincularse a los desplazamientos latitudinales y a cambios en la intensidad del anticiclón de las Azores y del frente polar (Valero Garcés y Kelts 1997a). La heterogeneidad espacial que caracteriza los ecosistemas de la España actual ha estado presente durante los últimos 10.000 años, como atestiguan los registros polínicos en los sedimentos de los lagos (Burjachs *et al.* 1997). En general, los ambientes lacustres de influencia mediterránea han padecido oscilaciones más notables de los niveles hídricos (Pons y Reille 1988, Giralt *et al.* 1999, Reed *et al.* 2001), probablemente relacionadas con el balance hídrico estacional, que los de influencia atlántica (Peñalba *et al.* 1997, Allen *et al.* 1996, Sánchez Goñi y Hannon 1999, Luque y Juliá 2002).

La metodología empleada en el estudio de la reconstrucción de las fluctuaciones del clima durante el Holoceno a partir del registro sedimentario lacustre es ahora multidisciplinar (Bradley 1999, Last y Smol 2001). Hasta la fecha, la mayor parte de los estudios considera los análisis de los restos biológicos independientemente del análisis estratigráfico y geoquímico, es decir, la biología pasada del lago no quedaba integrada en el marco geológico (Cohen 2003). Los avances más importantes en nuestros conocimientos se han producido cuando se combinan los estudios holocenos de tipo biológico (restos de Diatomeas, Ostrácodos, Chironómidos y polen de plantas superiores; Battarbee *et al.* 2002, Reed 1998) con los geológicos (geoquímica, facies sedimentarias, indicadores isotópicos, etc.; Valero Garcés y Kelts 1997b). Con vistas al estudio de los efectos del cambio climático sobre los ambientes acuáticos continentales, lo ideal sería lograr la interconexión entre paleoestudios de esa índole con estudios sobre la ecología acuática actual del mismo ecosistema y sus previsibles respuestas futuras.

Hay varios estudios de reconstrucción Holocena en ambientes españoles incluidos en el convenio Ramsar. Que sepamos, se han publicado trabajos sobre Banyoles (Pérez i Obiol y Juliá 1994), Chiprana (Valero Garcés *et al.* 2000a-c), Gallocanta (Rodó *et al.* 2002), Tablas de Daimiel (Dorado *et al.* 2002) y Zóñar (Valero Garcés *et al.* 2004).

3.3.2. Efectos sobre el número de ecosistemas y su tamaño

Claramente, su número se verá reducido si la evapotranspiración en verano aumenta y no lo hace la precipitación, pero no sabemos en qué medida [véase el Capítulo El Clima en España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI; apartado 1.3.6]. En concreto, muchos ambientes temporales podrían desaparecer, si bien el aumento previsto de las precipitaciones en primavera y una mayor evapotranspiración estival podrían contrarrestar aquel efecto.

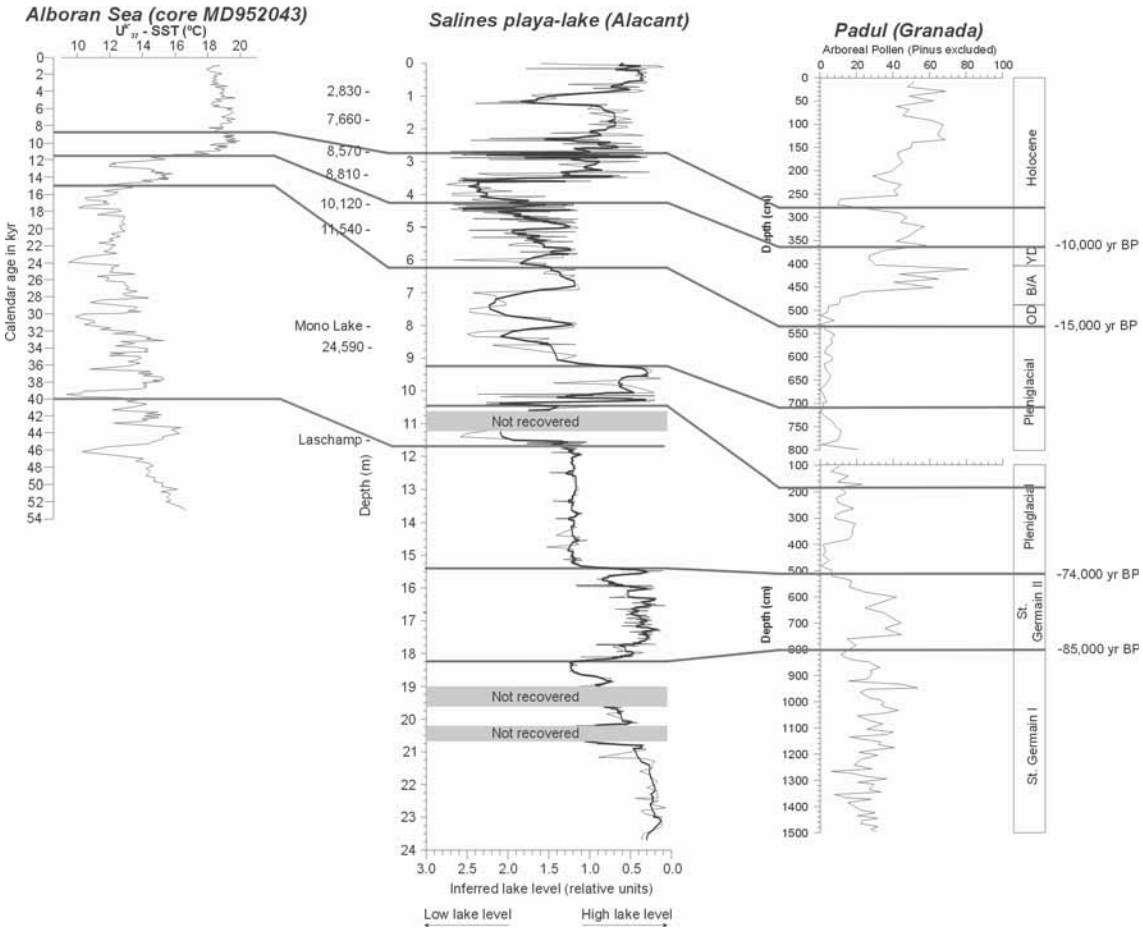


Fig. 3.1. *Reconstrucción de la evolución del nivel del lago de Salines (Alicante) y su comparación con el diagrama polínico de la secuencia de la turbera de Padul en Granada (modificado de Pons y Reille 1988) y con la reconstrucción de la temperatura superficial del mar (SST) realizada en el sondeo MD952043 (mar de Alborán; modificado de Cacho et al. 1999). Las líneas en negro muestran la correlación visual entre las diferentes secuencias. La línea gruesa del diagrama de Salines muestra la principal evolución del nivel del lago (media móvil de 5 muestras). Fuente: Giralt y Juliá (2004).*

En general, parece que la variabilidad de las fluctuaciones de tamaño será mayor. Teniendo en cuenta que: 1º) el tamaño de los ecosistemas acuáticos depende de su balance hídrico y 2º) algunos términos del mismo (precipitación, evaporación) probablemente se vean alterados por el cambio climático (Ayala-Carcedo y Iglesias 2000, CEDEX 1997, MIMAM 1998), resulta probable que muchos ambientes reduzcan su tamaño. Esto es especialmente cierto en ambientes semiáridos, como la mayor parte de los sistemas españoles, para los cuales se puede encontrar una buena relación entre la aridez de la zona y la extensión del lago (Mason *et al.* 1994). Por eso, algunos lagos pueden pasar de profundos a someros, y de estratificarse térmicamente a no hacerlo. Este efecto no tendrá lugar en la mayoría de los lagos de montaña situados en cuencas con balance hídrico positivo; en esas ubicaciones la estratificación térmica se reforzará y se alargará en otoño, como ya se ha observado en el lago Redó de los Pirineos (Catalán *et al.* 2002). Por otro lado, bastantes ambientes pasarán de ser permanentes a temporales, tanto en el caso de ríos como en el de lagos o humedales. Los embalses destinados a usos distintos de la simple regulación (irrigación, abastecimiento, etc.) pueden pasar años enteros en niveles muy bajos, prácticamente secos.

Los pequeños lagos cársticos pueden verse influenciados en cierta medida por el cambio climático, debido a su extrema dependencia de los acuíferos subyacentes y de la dinámica de recarga/descarga de éstos. En cuanto a los lagos endorreicos, los posibles efectos sobre su tamaño dependerán del régimen pluviométrico local, que continuará siendo muy variable geográficamente.

En los ambientes fluviales, es muy difícil –por ahora- discernir los efectos del posible aumento de la torrencialidad de otoño a primavera. Los cambios en la estacionalidad de la precipitación generarán cambios en caudales e hidroperiodos, los cuales es de esperar que tengan efectos significativos sobre la estacionalidad del transporte de materiales y de la estacionalidad de las poblaciones animales y vegetales (Carpenter *et al.* 1992).

3.3.3. Efectos sobre la calidad del agua

Resultados no publicados (Alvarez Cobelas, comunicación personal) indican que no hay relación entre la calidad del agua y la precipitación para las diez estaciones fluviales de la Confederación Hidrográfica del Guadiana en el Alto Guadiana (periodo 1973-2002), lo cual sugiere que los posibles efectos del cambio climático sobre la calidad de las aguas resulten inciertos por ahora. La calidad de las aguas puede empeorar a partir de la primavera, al reducirse el efecto de la dilución por aumentos en la evapotranspiración y, secundariamente, porque quizá haya menos aportes de agua. El aumento de la precipitación torrencial, asociado al cambio climático, podría también afectar a la calidad del agua de modo puntual (Murdoch *et al.* 2000). La precipitación excesiva (por encima de la media internanual) tras sequías prolongadas incrementa las concentraciones de sustancias en algunos humedales, como Las Tablas de Daimiel (Sánchez Carrillo y Álvarez Cobelas 2001).

Obviamente, el de la calidad del agua es un aspecto aplicado del cambio climático que requiere investigación, inexistente hasta ahora en España. Actualmente, ya se sabe que la capacidad de retención de nutrientes y la autodepuración disminuyen con el caudal en ríos en condiciones naturales (Butturini y Sabater 1998) y que los cauces contaminados se apartan de esa relación (Martí *et al.* 2004); no obstante, quedan muchos aspectos por discernir sobre la interacción entre caudal, temperatura, carga de nutrientes y usos del territorio en las cuencas hidrográficas hasta obtener una parametrización que permita aplicaciones y predicciones.

3.3.4. Efectos sobre los ciclos biogeoquímicos

Se ha sugerido que el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación darán lugar a disminuciones en la exportación de carbono y nitrógeno orgánicos desde los ecosistemas terrestres a los cauces fluviales (Clair y Ehrman 1996). No obstante, existen observaciones en el sentido de que el incremento de la precipitación sobre zonas ricas en acumulación de materia orgánica en la cuenca hidrográfica, como podrían ser algunas del noroeste español, ha generado un aumento, al menos transitorio, en la exportación hacia los ríos de carbono orgánico disuelto y metales (Freeman *et al.* 2001).

3.3.5. Efectos sobre la biota

Aunque la sequía estival de muchos cauces fluviales ha favorecido la existencia en nuestra flora y fauna de organismos adaptados a esta situación extrema y, por tanto, la existencia de especies endémicas de macroinvertebrados, peces y vegetación riparia, es probable que asistamos -al menos de forma transitoria- a un claro descenso de la biodiversidad si la superficie de ambientes extremos aumenta [véanse los Capítulos de Biodiversidad Vegetal y Biodiversidad Animal]. En la vegetación de las riberas fluviales, se espera un aumento de los

tarayes (*Tamarix*) frente a salicáceas (*Salix*) y chopos (*Populus*; Stromberg *et al.* 1996). La adelfa (*Nerium oleander)* es probable que se expanda. El tamujo (*Flueggea tinctoria*), típico de ríos temporales ácidos y fríos, podría sustituir en muchas zonas al aliso (*Alnus*). En la vegetación emergente de los humedales, se pueden ver favorecidas las especies claramente anfibias frente a las genuinamente acuáticas (por ejemplo, *Phragmites* y *Scirpus* pueden acabar dominando en la mayor parte de los humedales sobre *Typha* o *Cladium*); en cualquier caso, parece seguro que se modificarán bastante las interacciones competitivas (Alvarez Cobelas *et al.* 2001).

Las proliferaciones masivas de fitoplancton pueden aumentar en los ambientes eutróficos e hipertróficos, como muchos embalses y lagunas donde una temperatura más elevada puede favorecer los eventos de crecimiento súbito y excesivo (Carpenter *et al.* 1992, McKee *et al.* 2003).

En sistemas fluviales que no sufran desecación, el aumento de la temperatura generará más producción primaria en la zona riparia, la cual -junto con una mayor concentración de carbono orgánico particulado y disuelto de origen alóctono- puede favorecer una mayor producción primaria y bacteriana en lagos, ríos y humedales (Bazzaz 1990, Schindler 2001). No obstante, hay que tener en cuenta que la temperatura tiene un mayor efecto sobre la respiración que sobre la fotosíntesis, de modo que es previsible que se aceleren los procesos biogeoquímicos relacionados con la descomposición de materiales. De la misma forma, la producción secundaria aumentará porque la temperatura es un factor clave en el metabolismo animal (Benke 1993). La tendencia al calentamiento de la masa de agua parece conducir a una inestabilización de la composición de las comunidades de macroinvertebrados fluviales y a una reducción en su diversidad global por efecto de la dominancia de unas pocas especies, sin que ello suponga una disminución de su riqueza faunística (Gutiérrez Teira 2003).

Los ríos que mantienen en el estío un flujo exclusivamente subálveo pueden albergar Tricópteros limnefílidos especializados, los cuales vivirán durante la época seca en forma de larvas en diapausa o como pupas. Si la sequía es más intensa, las adaptaciones de muchas especies de insectos acuáticos consistirán en pasar esa época en forma de huevo; esta facultad resulta notable en especies criófilas endémicas de Plecópteros, tales como *Thyrrenoleuctra* y *Guadalgenus*. Las especies de ciclo vital largo (varios años) quizá tengan problemas adaptativos en ríos de montaña media, debido a que éstos pudieran convertirse en tramos temporales. Estos problemas probablemente serán más agudos en los Sistemas Central e Ibérico, cuyo sustrato geológico es impermeable, con lo cual sus caudales de base durante el estiaje (ya de por sí bajos) tenderán a desaparecer.

Los peces fluviales de mayor tamaño (barbos y bogas) son capaces de desarrollar estrategias migratorias de diferente índole para tolerar el estiaje pronunciado, bien remontando hasta encontrar aguas permanentes, o bien descendiendo hasta la confluencia con los ríos principales. Los peces endémicos más peculiares son de pequeño tamaño (*Squalius alburnoides, Chondrostoma lemmingii*, *Iberocypris*) y su adaptación básica consiste en resistir el estío en pozas aisladas en condiciones de superpoblación (Carmona *et al.* 1999). Su aislamiento ha inducido la adopción de mecanismos reproductores partenogenéticos, como es el caso del calandino (*Squalius alburnoides*; Fernández Delgado y Herrera 1994) con individuos triploides. El hábitat de los Salmónidos se reducirá (Eaton y Scheller 1996).

Las capturas de salmones en los ríos de la cornisa cantábrica ya lo están haciendo (Fig. 3.2); en el Atlántico Norte, estas disminuciones de las capturas del salmón se han relacionado con aumentos en la temperatura del agua de mar, producto del cambio climático (Friedland *et al.* 2003) [véase también el Capítulo de Biodiversidad Animal]. La fauna de los tramos medios puede invadir progresivamente los tramos altos si aumenta la temperatura del agua, sustituyendo a la fauna más estenoterma fría de las zonas más montanas (Rahel *et al.* 1996).

Como consecuencia de esto, las poblaciones de truchas autóctonas se irán fraccionando al reducirse su hábitat, hecho que favorecería procesos de deriva genética y, eventualmente, de especiación. En este proceso, las actuaciones de reintroducción y gestión de especies de interés piscícola pueden ser determinantes en el devenir de poblaciones locales.

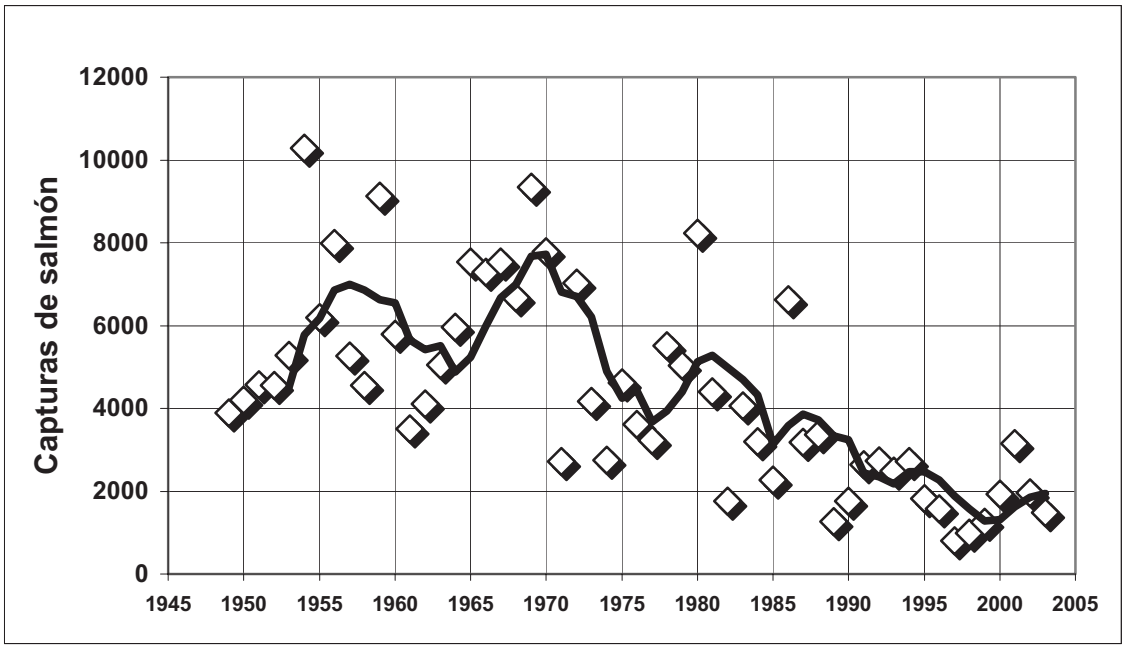


Fig. 3.2. *Capturas a largo plazo de salmones (Salmo salar) en los ríos del Norte de España. La línea continua representa una media móvil de cinco términos. Fuente: Francisco Hervella, Comunidad Autónoma de Galicia.*

En un contexto general, es probable que las interacciones entre la biota bentónica y la pelágica se vean modificadas (Lake *et al.* 2000).

3.3.6. Efectos específicos sobre los distintos tipos de ecosistemas

3.3.6.1. Humedales

Dadas su variedad y heterogeneidad intrínsecas, los efectos del cambio climático dependerán de las particularidades de cada sistema, por lo que es difícil hacer una evaluación general. Dada la irregular morfometría de muchos de ellos, los cambios en el volumen tendrán efectos poco predecibles sobre su superficie inundada. No obstante, hay ciertas tendencias esperables en algunos de los procesos relevantes en este tipo de ambientes; del balance local de los mismos, dependerá el comportamiento específico de un humedal determinado. Así, los aumentos de temperatura incrementarán la tasa de los procesos microbianos (Schindler 1997), la evaporación de la lámina de agua y la transpiración de las plantas emergentes (Sánchez Carrillo *et al.* 2001). Ese aumento de la transpiración probablemente genere ambientes más salinos, favoreciendo sinérgicamente la dominancia de especies más tolerantes a la salinidad (Lissner *et al.* 1999a) y a la falta de agua, como el carrizo (*Phragmites*), pudiendo darse también efectos de retardo (Fig. 3.3). En el balance hídrico serán muy importantes también los cambios antrópicos en los usos del agua en el entorno de los humedales. La disminución de los aportes de agua implica una disminución del hidroperiodo que, a su vez, limitará la recarga del acuífero subyacente al humedal (Sánchez Carrillo *et al.* 2005).

Los cambios en los tipos de vegetación generarán cambios sobre las funciones de los humedales, particularmente en aquellos humedales más complejos (Doñana, por ejemplo, véase el Apartado 3.4.2), favoreciendo preferentemente a uno de los componentes vegetales del paisaje y, por tanto, reduciendo su diversidad (Öquist *et al.* 1996).

En condiciones de sequía, la erosión se verá facilitada. Cuando haya agua abundante, la elevación de temperatura favorecerá una descomposición más rápida de la materia orgánica (Poff *et al.* 2002).

Habrá cambios en las emisiones de metano y de óxido nitroso y en su temporización (Öquist *et al.* 1996). La desecación definitiva de muchos humedales por el cambio climático, obviamente, disminuiría las emisiones de esos gases de efecto invernadero.

Los aumentos de CO_2 incrementarán la fertilización y la producción primaria de los helófitos, pero también la tolerancia vegetal al estrés (fotoinhibición, sequía, salinidad; Lissner *et al.* 1999a-b).

Las sequías previsibles incentivarán los incendios, que pueden resultar importantes en el caso de humedales con mucho carbono acumulado (turba; de Bustamante *et al.* 1995).

Los cambios en la vegetación y en la superficie inundada, dependientes de las alteraciones en la hidrología, probablemente conlleven modificaciones en los ciclos biogeoquímicos y en las poblaciones de invertebrados y vertebrados dependientes de la vegetación (sobre todo, insectos y aves; Roshier *et al.* 2001).

3.3.6.2. Ríos

En general, los caudales de base disminuirán, lo cual supondrá el aumento del número de ríos temporales y de tramos de ríos con caudales únicamente estacionales. Por otro lado, el calentamiento hará subir la temperatura del agua, el cual puede suponer un desplazamiento de la zonación de las biocenosis hacia aguas arriba. En este aspecto es interesante tener en cuenta que el efecto del aumento de la temperatura del aire sobre el aumento de la temperatura del agua no es independiente de la precipitación. En dicha relación, la precipitación influye negativamente y de forma cuadrática (Jones y Thompson 2003). Por lo tanto, un descenso de la precipitación favorecerá el incremento de la temperatura fluvial, hecho que puede ser relevante para las zonas salmonícolas. La disminución de los caudales generará un descenso en la concentración del oxígeno disuelto, especialmente importante si -además- hay contaminación orgánica y aumento de la temperatura (Jenkins *et al.* 1993).

Las inundaciones, con sus secuelas del aumento de sólidos en suspensión en los cauces fluviales, quizá tengan mayor importancia en los ambientes áridos, donde los suelos se erosionan más y las relaciones precipitación-escorrentía no son lineales (Arnell *et al.* 1996).

El aumento de la evapotranspiración en las cuencas hidrográficas de pequeño tamaño tendrá como consecuencia el descenso de los caudales, notándose más los efectos en los tramos de recepción.

Los cambios en la hidroquímica fluvial serán debidos a cambios en la meteorización de los sustratos rocosos de las cuencas hidrográficas en las zonas de clima más húmedo y más caluroso (Ávila *et al.* 1996). Los aumentos de temperatura harán ascender la nitrificación de los suelos y, por escorrentía, el nitrato en los ríos (Jenkins *et al.* 1993). Y lo mismo sucederá con el nitrógeno orgánico en cuencas predominantemente agrícolas (Bernal *et al.* 2003). Este efecto será más patente como resultado de las inundaciones intensas que tengan lugar tras las sequías.

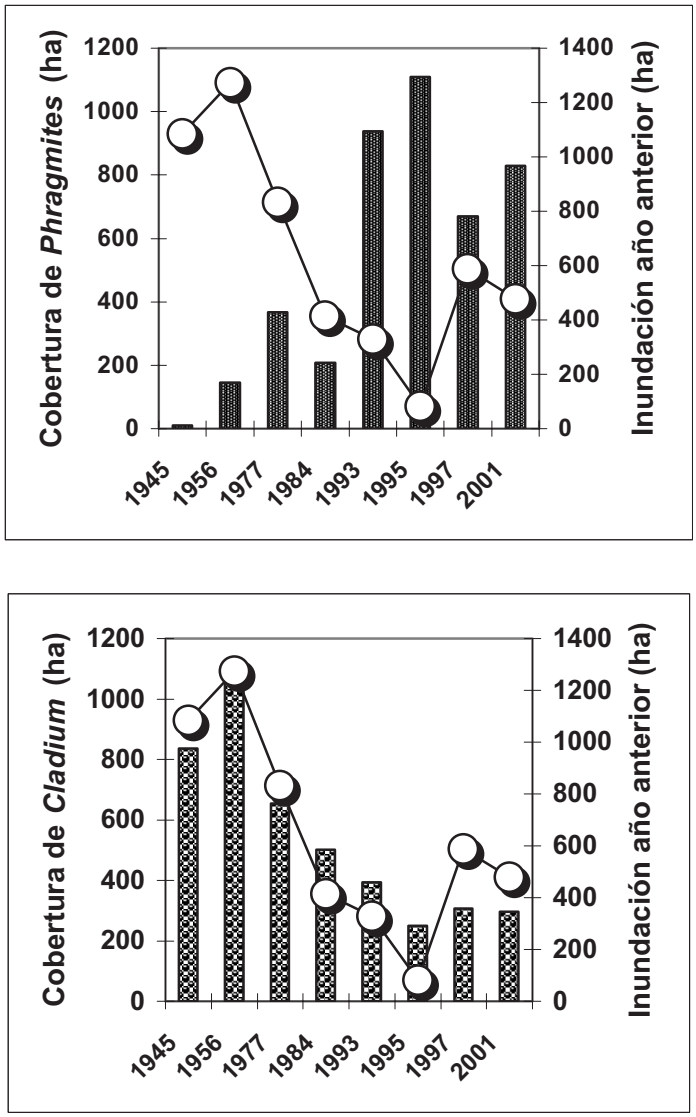


Fig. 3.3. *Cobertura anual (barras verticales, escala izquierda) de las dos especies principales de la vegetación emergente en Las Tablas de Daimiel e inundación en el año precedente (círculos blancos, escala derecha) durante el periodo 1945-2002. Las coberturas representadas se basan en la fotografía aérea disponible para el periodo 1945-1997. Aunque no se muestre aquí, hay también una relación distinta entre la inundación del humedal en el año precedente y la cobertura de cada especie, que es directa en el caso de la masiega (Cladium) e inversa en el caso del carrizo (Phragmites). En condiciones de aridez creciente, resultantes del cambio climático, la expansión del carrizo se vería favorecida. Datos inéditos de Cirujano y Alvarez Cobelas.*

En los ríos de las zonas más áridas (principalmente, en el sureste de la Península Ibérica), la dinámica ecológica será muy susceptible a los cambios en la variabilidad de los caudales, producto del cambio climático (Fisher *et al.* 1998), lo cual también puede afectar a ríos temporales enclavados en otras zonas de la Península.

3.3.6.3. Lagos y embalses

El cambio climático tendrá efectos importantes sobre la duración de la capa de hielo en los lagos alpinos, como sugiere la simulación de Thompson *et al.* (2005), la cual pone de

manifiesto que hay unas cotas más sensibles que otras a los efectos de aquél y que no es trivial el cambio de sensibilidad que puedan experimentar (Fig. 3.4).

En los lagos con estratificación estable (como las lagunas de Ruidera), la temperatura del epilimnion puede aumentar de 1-4 ºC con el cambio climático; sin embargo, si la estratificación es mayor, el hipolimnion se enfriará varios grados. Parece claro que la estratificación será de mayor duración, con lo cual el consumo de oxígeno en las zonas profundas será mayor y la probabilidad de experimentar condiciones anóxicas aumentará. En los lagos alpinos (a partir de 1500 m.s.n.m.), si la duración de la cubierta de hielo y nieve se reduce, el descenso de oxígeno en las capas profundas y la liberación de fósforo desde el sedimento serán menores. Probablemente, la producción de primavera se verá reducida en favor de una mayor producción otoñal.

En los lagos en los cuales la producción tenga lugar en el epilimnion, el calentamiento aumentará la producción primaria si la estratificación es más prolongada. También disminuirá el oxígeno en las capas profundas por el aumento de aquélla y por el incremento de la sedimentación, debido al aumento de la producción primaria, lo cual generará cambios sobre la fauna profunda (Schindler 1997).

La disminución del nivel del lago afectará a la zona litoral en aquéllos que pueden variar de nivel significativamente; dicha franja suele ser la más productiva y actúa como zona de transición entre el ecosistema terrestre y el acuático (Wetzel 1990). Durante los periodos de inestabilidad ecológica de la vegetación en la cuenca hidrográfica, la colmatación de los lagos de menor tamaño enclavados en áreas deforestadas podría acelerarse al reducirse el tampón litoral que limita la entrada de sedimentos de origen terrestre.

Los aumentos de la meteorización de las rocas, que son efecto de la simple cinética térmica o de incrementos en el metabolismo de las comunidades vegetales, debidos al aumento de la temperatura del aire, probablemente generen un incremento de la alcalinidad de los lagos.

Con el aumento térmico, los contaminantes orgánicos presentes en el agua pasan a la atmósfera con mayor rapidez y llegan antes a las altitudes mayores en las que puede haber lagos, con lo cual éstos se contaminarán con mayor facilidad por deposición atmosférica (Grimalt *et al.* 2001). La movilización de metales y metaloides (arsénico, plomo) desde la cuenca a los sistemas acuáticos de zonas frías aumentará (Camarero *et al.* 2004), debido a una mayor movilización de esas sustancias en los suelos y a su transporte atmosférico.

Los posibles efectos del calentamiento global sobre las redes tróficas de los lagos aún son motivo de debate (Jeppesen *et al.* 2003, Scheffer *et al.* 2003).

Finalmente, ignoramos qué factores condicionan la redistribución futura de las faunas lacustres porque, en la mayor parte de los casos, se desconoce la historia de su dispersión pasada.

En general, para los embalses podrían aplicarse las mismas aseveraciones que para los lagos, pero -teniendo en cuenta su mayor tasa de renovación del agua, su extrema dependencia de los usos a los cuales aquélla se dedica y que suelen estar sometidos a mayor eutrofización (Alvarez Cobelas *et al.* 1992)- cualquier predicción resulta sumamente arriesgada (Toja, comunicación personal).

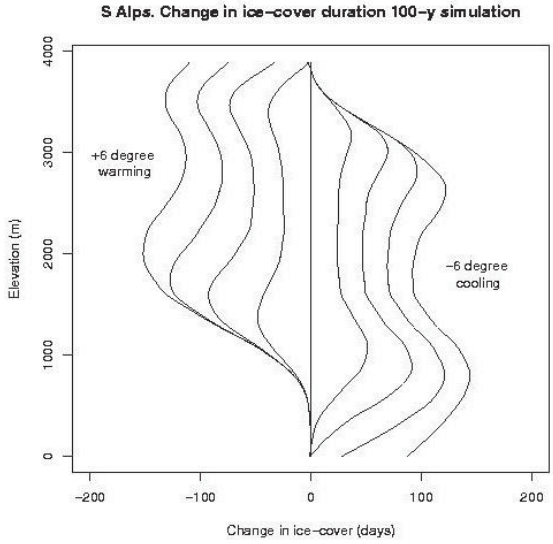


Fig. 3.4. *Simulación de los cambios en la duración de la capa de hielo de los lagos existentes en el sur de los Alpes entre 0 y 4000 metros de altitud. Se han probado nueve escenarios distintos de cambio climático usando una simulación a cien años (ciclos de un año y medio más tiempo atmosférico). Fuente: Thompson et al. (2005).*

3.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Probablemente y de acuerdo con los resultados presentados en los Capítulos El Clima en España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI y Recursos hídricos serán las siguientes:

Ambientes endorreicos.

Muchos están enclavados en zonas donde disminuirá la precipitación promedio y la distribución estacional de ésta se verá muy alterada (La Mancha húmeda, por ejemplo), con lo cual están amenazados de desaparición.

Lagos y lagunas de alta montaña (1600-2100 metros) en las zonas de bosques caducifolios y en las del límite del bosque.

Ríos y arroyos de alta montaña (1800-2500 metros)

Albergan endemismos criófilos de insectos, cuya distribución ya es restringida Es probable que la dimensión de sus hábitats se reduzca con el cambio climático hasta un tamaño crítico para su supervivencia.

Humedales costeros.

El litoral se reorganizará lentamente de modo natural si hay cambios en el nivel del mar. Sin embargo, dado que en nuestras costas hay multitud de obras civiles, quizá ocurran complicaciones adicionales de tipo administrativo que limiten dicha reorganización.

Ambientes dependientes de las aguas subterráneas

El descenso de los niveles piezométricos, verosímilmente debido a usos consuntivos y a la disminución de la recarga con el cambio climático, los afectará bastante.

Espacialmente y teniendo en cuenta las proyecciones de los modelos de clima (Apartado 1.3.6 del Capítulo El Clima en España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI), parece probable que haya un aumento de la precipitación acumulada en el NW de la Península y disminuciones en la zona meridional y en la mediterránea en invierno, que es el momento del año de más trascendencia para la recarga hídrica de los ecosistemas acuáticos.

3.4.1. Casos concretos

La Tabla 3.1 refleja la información obtenida sobre la incidencia de los posibles efectos del cambio climático en algunos aspectos morfométricos y biogeoquímicos de determinados ambientes acuáticos continentales españoles, suministrada por los expertos que llevan trabajando mucho tiempo en dichos ecosistemas. La información es todavía muy preliminar y debe tomarse con muchas reservas, pues carecemos de estudios específicos sobre esos posibles cambios en ninguno de los ecosistemas considerados. En particular, falta información directa relacionada con el cambio climático para la mayoría de los ambientes incluidos en la lista española de humedales Ramsar. Se ofrece también un pequeño apartado dedicado a Doñana, el humedal de la Península Ibérica más conocido internacionalmente.

Tabla 3.1. *Afecciones probables a los ecosistemas acuáticos continentales españoles más estudiados relacionadas con el cambio climático, basadas en la experiencia de los autores contribuyentes a este capítulo. Dichas afecciones se caracterizan como inexistentes (0), escasas (1), apreciables (2), importantes (3) o muy importantes (4). El asterisco indica que se trata de ambientes incluidos en el Convenio Internacional Ramsar para la Conservación de Humedales.*

Nombre	Localización geográfica (punto central)	Cambios en la permanencia (temporal *vs* permanente)	Cambios en el tamaño	Cambios en los ciclos biogeoquímicos	Cambios en la biota
Parques Nacional y Natural de Doñana (Sevilla-Huelva) (*)	36º 34' N 6º 24' W	3	3	2	4
Parque Nacional Tablas de Daimiel (Ciudad Real) (*)	39º 08’ N 3º 43’ W	4	4	2	4
Albuferas de Adra (Almería) (*)	36º 45' N 2º 47' W	2	4	3	4
Lago principal de la Albufera de Valencia (Valencia) (*)	39º 20’ N 0º 20’ W	0	1	4	4
Lagunas dunares del Parque Natural de la Albufera de Valencia	39º 20’ N 0º 20’ W	4	3	3	2

Lagunas de Alcázar de San Juan (Yeguas y Camino de Villafranca) (Ciudad Real) (*)	39º 24' N 3º 15' W	3	2	2	4
Lagunas de Arcas (Cuenca)	39º 59' N 2º 7' W	3	3	1	2
Lago de Banyoles (Girona) (*)	42º 7' N 2º 45' E	0	0	2	2
Lagunas de Cañada del Hoyo (Cuenca)	39º 59' N 1º 52' W	2	2	3	2
Lagunas del Delta del Ebro (Tarragona) (*)	40º 39' N 2º 32' E	2	2	2	2
Laguna de Fuente de Piedra (Málaga) (*)	37º 06' N 4º 46' W	1	0	1	1
Laguna de El Hito (Cuenca) (*)	39º 52' N 2º 41' W	3	2	2	4
Laguna de Gallocanta (Zaragoza-Teruel) (*)	40º 50' N 2º 11' W	4	4	4	4
Laguna de Manjavacas (Cuenca) (*)	39º 25' N 2º 50' W	3	2	2	4
Laguna de la Nava (Palencia) (*)	42º 04'N 4º 44' W	3	2	2	4
Laguna del Prado (Ciudad Real) (*)	38º 55' N 3º 49' W	3	2	2	4
Lagunas de Puebla de Beleña (Guadalajara) (*)	40º 53' N 3º 15' W	3	2	2	4
Lago Redó (Lleida)	42º 38' N 0º 46' E	0	0	2	2
Lagunas de Ruidera (Ciudad Real/Albacete)	38º 56' N 2º 37' W	3	3	2	4
Lago de Sanabria (Zamora)	42º 07' N 6º 43' W	0	1	2	2
Lagunas de Sierra Nevada (Granada)	37º 05' N 3º 05' W	0	4	4	4

Laguna de la Vega o del Pueblo (Ciudad Real) (*)	39º 49' N 2º 56' W	3	2	2	4
Lagunas de Villafáfila (Zamora) (*)	41º 49' N 5º 36' W	0	0	0	1
Aiguamolls de l'Empordá (Girona) (*)	42º 13' N 3º 6' E	1	1	0	0
Humedal de Salburúa (Alava) (*)	42º 51' N 2º 39' W	3	2	2	4
Platja d'Espolla (Girona)	42º 9' N 2º 46' E	0	0	1	1
Río Agüera (Vizcaya-Santander)	43º 18' N 3º 16' W	0	2	2	2
Río Chicamo (Murcia)	38º 12’ N 1º 03’ W	3	4	3	3
Riera de Fuirosos (Barcelona)	41º 42’ N 2º 34’ E	1	0	2	1
Desembocadura del río Guadalhorce (Málaga)	36º 40’ N 4º 27’ W	0	0	1	1
Surgencias en los ríos Asón y Saja (Santander)	43º 10' N 4º 17' W	0	1	1	1
Surgencias del Parc Natural de la Albufera de Valencia	39º 20’ N 0º 20’ W	0	0	3	2
Embalse de Aracena (Huelva)	37º 55' N 6º 28' W	0	0	4	4
Embalse de Arrocampo (Cáceres)	39º 49' N 5º 43' W	0	0	0	0
Pantano de El Hondo (Alicante) (*)	38º 10' N 0º 42' W	3	2	2	4

Embalse de La Minilla (Sevilla)	37º 43' N 6º 10' W	0	0	4	4
Embalse de Sau (Girona)	41º 58' N 2º 25' E	0	3	2	4
Embalse de Torrejón (Cáceres)	39º 47' N 5º 45' W	0	0	1	0
Colas del embalse de Ullibarri (Alava) (*)	42º 54' N 2º 32' W	3	2	2	4
Embalse de Valdecañas (Cáceres)	39º 49' N 5º 28' W	0	0	1	0

3.4.2. Doñana y el cambio climático

Sus ecosistemas acuáticos principales están compuestos por una marisma (de carácter temporal y salinidad variable, alimentada por agua de lluvia y por escorrentía superficial y que alcanza alrededor de las 40.000 ha de extensión), y por un complejo de lagunas costeras enclavadas sobre el manto eólico litoral (alimentadas por agua freática de baja mineralización y muy limpia que cubren unas 44.000 ha, incluyendo los Parques Nacional y Natural). Además entre la costa y el arroyo de la Rocina, persisten unas lagunas turbosas sobre arenas silíceas, prolongándose desde el Parque Natural de Doñana hasta la zona NW del Parque Nacional de Doñana. Constituyen el ambiente acuático más vulnerable de Doñana. El área ocupada por dichas turberas ombrotróficas ha experimentado una reducción considerable desde principios del siglo XVIII (Sousa 2004), aunque ha sido especialmente intensa desde finales del siglo XIX (Sousa y García Murillo 2002, 2003).

¿Los ambientes acuáticos de Doñana sufrirán cambios en su permanencia? Sí. En las lagunas costeras del manto eólico litoral onubense descenderán verosímilmente el volumen de los aportes superficiales y los niveles piezométricos; por lo tanto, es probable que haya una disminución de la superficie inundada, si bien esto -al depender de los cambios en la estacionalidad de las precipitaciones- no resulta demasiado predecible aún (Toja, comunicación personal). Los brezales higroturbosos donde domina *Erica ciliaris*, en la actualidad una valiosa “reliquia” (véase Allier *et al.* 1974, Rivas Martínez 1979, Rivas Martínez *et al.* 1980, Cobo *et al.* 2002) desaparecerán y serán sustituidos por brezales de *Erica scoparia* , de menor valor para la conservación. Esto afectará muy probablemente los ambientes turbosos del Abalario y del Parque Nacional de Doñana, que albergan una gran parte de la flora singular de Doñana (como plantas carnívoras y esfagnos; García Murillo *et al.* 1995, García Murillo 2000, 2003). En ellos se producirá -además- un incremento en la eutrofización. Respecto a la marisma, este cambio en las condiciones se traducirá en un incremento de las poblaciones de helófitos y pastizales, en detrimento de los macrófitos sumergidos, lo cual -a su vez- aumentará los procesos de colmatación y de disminución de superficies inundadas, procesos que se retroalimentan; en definitiva, se acelerará la velocidad de colmatación de la marisma.

¿Sufrirá cambios el tamaño de sus ecosistemas acuáticos? Como se ha dicho antes, habrá cambios, pero dependerán del estadío sucesional de cada ambiente en cuestión. En general, la tendencia más plausible será hacia una simplificación de los hábitats naturales, y de la biodiversidad de la marisma y de las lagunas continentales.

¿El cambio climático afectará a sus ciclos biogeoquímicos? Probablemente sí. Serán especialmente evidentes en los medios higroturbosos, caracterizados por la baja concentración de nutrientes y la acumulación de materia orgánica. La materia orgánica dejaría de acumularse y se incrementaría la concentración de nutrientes disueltos, dando paso a especies oportunistas. En la marisma, al desaparecer o disminuir de manera notable los macrófitos sumergidos, los ciclos biogeoquímicos tomarán otras rutas, ya que los distintos elementos circularán fundamentalmente por los helófitos y los pastizales (Espinar *et al.* 2002).

¿Se verá afectada su biota por el cambio climático? Habrá disminución de la biodiversidad, al disminuir la heterogeneidad de hábitat. Asímismo, se incrementarán las posibilidades de que se instalen especies exóticas invasoras (como está ocurriendo con el helecho *Azolla*; García Murillo 2003).

¿Afectará a Doñana el ascenso del nivel marino? Sí. Buena parte de los terrenos de la marisma están prácticamente al nivel del mar y sólo separados de éste por pequeños diques dunares, de alturas inferiores a un metro. Es verosímil que, de continuar el ascenso del mar con las tasas previstas, una porción extensa de Doñana se vea ocupada por el mar en un siglo.

¿Sufrirá intrusión marina? En la actualidad, no existe (Lozano *et al.* 2002), pero no pueden descartarse cambios futuros si hay conflictos por el uso del agua freática en una zona de agricultura intensiva bajo plástico y extensas urbanizaciones turísticas litorales.

3.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

Las adaptaciones deben llevarse a cabo tanto desde la oferta como desde la demanda de agua. En el primer caso, tratando de garantizar la cantidad de agua disponible para los ecosistemas acuáticos mediante políticas de ahorro. En el segundo, tratando de reorientar la demanda humana hacia usos de bajo consumo.

A escala regional o global, no se vislumbran adaptaciones humanas para mitigar o preservar efectos importantes (emisiones de gases, secuestro de carbono, etc.). A escala local, sí puede haberlas para controlar la inundación, mejorar la biodiversidad y reducir la contaminación (Arnell *et al.* 1996), tanto en lagos. (Annadoter *et al.* 1999) como en humedales (Zedler 2000, Angeler *et al.* 2003). En cualquier caso, parece oportuno señalar aquí que en un régimen de caudales tan intervenido como el español, las asignaciones hídricas a los humedales debieran definirse con claridad en la planificación hidrológica de cuenca, como recomienda el Convenio Ramsar (ramsar.org/key_res viii_01_s.doc).

Sabiendo de antemano que la adaptación de los ecosistemas acuáticos continentales al cambio climático es limitada (Poff *et al.* 2002), en nuestra opinión se deberían abordar las siguientes acciones:

3.5.1. Estimulación del ahorro de agua en la agricultura

Es urgente una política generalizada de ahorro de agua agrícola, para la cual existe ya la tecnología necesaria para aumentar la eficiencia del riego. Un Plan Nacional de Regadíos que

tuviera en consideración el cambio climático debiera contemplar este aspecto. Además, la gestión particular de los ambientes agrícolas podría incentivarse con medidas agroambientales en el entorno de los ecosistemas acuáticos.

3.5.2. Estimulación de la recarga de acuíferos

Íntimamente asociado a la medida anterior debe realizarse, intentando que la recarga supere a la descarga. La puesta en marcha de los Planes Especiales de Cuenca, dentro del Plan Hidrológico Nacional, debiera aprovecharse en este sentido. Un ejemplo de ello sería el desarrollo de un Plan Especial del Alto Guadiana que garantizara la recuperación hídrica y la sostenibilidad tanto de sus acuíferos como de los ambientes acuáticos dependientes de ellos.

3.5.3. Estimulación del reciclado de aguas residuales

Aún por desarrollar extensamente, muchos usos importantes del agua (riego agrícola, por ejemplo) no la requieren con limpieza extrema. Debe incidirse mucho más en este enfoque que hasta la fecha; podría contemplarse la creación de humedales artificiales.

3.5.4. Mejora de la calidad de las aguas superficiales

Hay que reducir las cargas de contaminantes, intentando -además- que aquellos ecosistemas que aún se conservan limpios no se vean afectados por contaminantes en el futuro. El Plan Nacional de Depuración y la transposición y aplicación de la Directiva-Marco Europea del Agua a la normativa española debieran facilitar esa mejora, si bien aún no se ha abordado en España el muy extendido problema de la contaminación difusa (Thornton *et al.* 1998).

3.5.5. Recuperación del espacio inundable en el Dominio Público Hidraúlico

Muy constreñido por las actividades agrícolas y de urbanización, si el Dominio Público Hidraúlico se restaurara en los casos en que se halla muy deteriorado, favorecería el desarrollo natural de los ambientes de ribera con las ventajas que ello conlleva para estimular el desarrollo de esa zona-tampón del efecto terrestre sobre los ambientes acuáticos continentales.

3.5.6. Revegetación (forestal o arbustiva) masiva en cuencas hidrográficas, favoreciendo la ocupación del espacio por las plantas autóctonas

Esta revegetación debe orientarse hacia la restauración natural del bosque de ribera en aquellos cauces fluviales donde haya sido eliminado o se halle muy deteriorado, conservando la vocación natural de cada territorio.

3.5.7. Uso de los trasvases para aportar unas cantidades mínimas que permitan la supervivencia de los ecosistemas acuáticos continentales (caudales ecológicos, niveles de inundación mínimos, etc.)

Esta medida sólo debe aplicarse a zonas de especial interés para la conservación de la Naturaleza (por ejemplo, ambientes del Convenio Ramsar, hábitats incluidos en la Red Natura 2000, etc.) y únicamente en casos excepcionales, pero siempre teniendo en cuenta las necesidades hídricas de los ambientes acuáticos en la planificación hidrológica nacional.

3.5.8. Estimulación de la conservación de los espacios naturales y de la conexión ambiental entre ellos en el marco de un Programa de Restauración a nivel nacional

Se debe prestar especial atención a la conexión hídrica entre ecosistemas dentro de la misma cuenca hidrográfica como medio para promover la dispersión de especies amenazadas.

3.5.9. Favorecimiento de la acreción en humedales costeros

La acreción debe aumentar a un ritmo superior al del ascenso del nivel marino, debiendo favorecerse -en el caso de los deltas- el transporte sedimentario por los ríos. Un caso claro de interacción antrópica con los efectos del cambio climático es el del delta del río Ebro. Durante los pasados 50 años, la construcción de embalses en los tramos medio y bajo del río ha disminuido el aporte de sedimentos al delta, el cual ha reducido su tamaño (Ibáñez *et al.* 1996); las previsiones de aumento de los niveles marinos en determinadas zonas españolas (Apartado 3.2.3) no harán sino reforzar esa tendencia en un futuro próximo.

3.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

3.6.1. Conservación ambiental

La no mitigación de los efectos del cambio climático hará que muchos ecosistemas desaparezcan y que haya que invertir más dinero en conservar los que más apreciemos. Como mínimo, parece imperiosa una labor de vigilancia que permita garantizar que no hay desaparición de refugios y fragmentación de hábitats, a fin de evitar perjuicios para la persistencia de determinadas especies. En algunos casos, pueden hacer falta políticas activas de generación de nuevos emplazamientos de hábitats.

3.6.2. Turístico

Puede llegar a ser importante, con problemas de adaptación al cambio más intensos en las empresas hosteleras y turísticas que en los turistas propiamente dichos (Wall 1998). En el caso de Las Tablas de Daimiel, por ejemplo, se reciben unos 200.000 visitantes anuales; en los años 1994-1995, momento cumbre de la sequía de esa década, el número de visitantes disminuyó a menos de 10.000. Efectos de este tipo son esperables en otros humedales muy visitados, como los del delta del Ebro, Doñana y los Aiguamolls de l'Empordá.

Algunos efectos de carácter puntual también pueden resultar especialmente perjudiciales para ciertos ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, la romería del Rocío, que suele reunir a un millón de personas todos los años, puede acabar afectando a la alimentación hídrica de Doñana si los recursos hídricos de los que se abastecen dichos visitantes disminuyen, lo cual es verosímil en un contexto de cambio climático (García Murillo y Sousa, comunicación personal).

3.6.3. Protección civil (prevención de inundaciones)

Al estar ya canalizados la mayoría de los cauces fluviales de la Península Ibérica, la reducción natural de los efectos de las avenidas, probablemente más frecuentes con el cambio climático, se verá disminuida. También son esperables efectos sinérgicos: con el aumento de las inundaciones, las disfunciones (cambios biogeoquímicos, afecciones a la flora y la fauna, etc.) de la red fluvial serán más patentes.

3.6.4. Abastecimiento de aguas

Importante en el caso de embalses de abastecimiento y de acuíferos destinados al abastecimiento (alrededor de un tercio de la población se abastece con agua de pozo en España; Custodio *et al.* 1998). Un agua embalsada con mayor número de "blooms" de algas - los cuales se verán favorecidos por el cambio climático (véase el Apartado 3.3.7)- tendrá un coste de potabilización superior.

3.6.5. Pesca continental

Como ya hemos visto, el hábitat de los Salmónidos se reducirá. No está claro qué ocurrirá con los Ciprínidos autóctonos (barbos, boga). Pueden verse sustituidos por especies más termófilas y, en general, introducidas ("black-bass", siluro, etc.).

3.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

3.7.1. Carencia de series de datos fiables a largo plazo para el estudio de los efectos del cambio climático

Además de las tendencias, conviene identificar las escalas de variabilidad, tanto a corto como a medio y largo plazo, teniendo en cuenta la estrecha dependencia de los cambios en los ecosistemas acuáticos respecto de los que tienen lugar en los ambientes terrestres de las cuencas hidrográficas. Se echan en falta la observación y el seguimiento a largo plazo de los procesos naturales asociados a los ecosistemas acuáticos continentales. Las series existentes de datos a largo plazo no se han diseñado para ello; en el caso de los registros de calidad del agua, por ejemplo, atienden más bien a los efectos de la contaminación por aguas residuales urbanas. Sería conveniente elegir una serie de ambientes para su seguimiento a largo plazo, con vistas a comprobar los efectos del cambio climático, descartando aquellos lugares sujetos a contaminación y a regulación de caudales. La falta de coincidencia entre las estaciones de aforo de caudales y las de toma de muestras para calidad de aguas en muchas de nuestras redes de vigilancia constituye una limitación en la evaluación de la relación entre la cantidad y la calidad, cuando se quiera llegar a un cierto detalle relacionado con el cambio climático.

3.7.2. Información aún escasa sobre el estado ecológico y la biología de las especies más importantes

Muchos ambientes valiosos apenas se conocen científicamente, salvo desde el ámbito de la avifauna. Como muestra la Tabla 3.1, la mayoría de los humedales Ramsar españoles aún no se ha estudiado desde el punto de vista de la ecología acuática; sólo tenemos datos, y en ocasiones muy preliminares, sobre 17 de los 49 ecosistemas nacionales incluidos en dicha lista.

Los muestreos biológicos no están estandarizados. Sin embargo, para la puesta en marcha de la Directiva-Marco Europea del Agua en España se están haciendo intentos de cubrir esta laguna, estableciendo metodologías de estudio biológico, niveles de referencia de los ambientes acuáticos y revisiones periódicas en relación con los posibles cambios (entre ellos, el climático) que modifiquen dichas condiciones de referencia.

3.7.3. Desconocimiento sobre los procesos de histéresis

Todos los ecosistemas y, en particular, los acuáticos que aquí nos conciernen no presentan nunca la misma respuesta a una misma perturbación. Hay siempre un cierto grado de histéresis

en su comportamiento que es difícil de valorar, aunque probablemente sea mayor cuanto más grande sea el sistema y más cerrados sean los intercambios de materiales y especies. En ese sentido, los sistemas lacustres y los humedales pueden presentar un componente mayor de histéresis (Comín *et al.* 1992). Hay muy pocos estudios en ese sentido y como ejemplo vale la pena constatar que en lagos alpinos la dinámica productiva y las poblaciones de Chironómidos parecen seguir un ajuste con el clima a escalas de varias decenas de años (Catalán *et al.* 2002). Por lo tanto, es probable que los efectos incipientes del cambio climático que ya se está produciendo, se muestren de forma mucho más clara en la próxima década.

3.7.4. Desconocimiento de los efectos de los cambios abruptos o graduales de las comunidades vegetales terrestres y de la geología de las cuencas sobre los ecosistemas acuáticos

Al ser las cuencas tan influyentes sobre nuestros ecosistemas acuáticos, como ya hemos apuntado (Apartado 3.2), los efectos del cambio climático sobre las mismas producirán efectos sobre los ambientes acuáticos. Nada sabemos aún a ciencia cierta sobre la dirección y la magnitud de dichos efectos de cuenca.

3.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

Se relacionan estrechamente con el apartado anterior.

3.8.1. Estudios a largo plazo de observación y seguimiento del cambio

Además de las tendencias, conviene identificar las escalas de variabilidad, tanto a corto como a medio y largo plazo, teniendo en cuenta la estrecha dependencia de los cambios en los ecosistemas acuáticos respecto de los que tienen lugar en los ambientes terrestres de las cuencas hidrográficas.

3.8.2. Uso de modelos de ecosistemas acuáticos continentales

En nuestro caso y dada la dependencia ya citada de las cuencas, la utilidad de los modelos dependerá de la fiabilidad de los elaborados para el ambiente terrestre de las cuencas. Cuanto mejores sean los modelos de cuenca, mejores serán los de ambientes acuáticos.

Tampoco existen modelos empíricos de distribución de las especies en los ambientes acuáticos continentales que la expliquen en función de un número limitado de variables ambientales, entre las cuales podrían contarse las asociadas al cambio climático (temperatura del agua, caudal, hidroperiodo, etc.).

3.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

3.9.1. Política Científica

El Ministerio de Educación y Ciencia debería incentivar la investigación de los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas acuáticos continentales y de la mitigación de los efectos mediante la restauración ecológica. La mayoría de los proyectos aprobados hasta ahora sólo contemplan cambios en el pasado. Apenas se han aprobado proyectos de prospectiva ni de detección de los efectos del cambio climático en la actualidad. Los ministerios de Fomento y Agricultura también deberían implicarse.

3.9.2. Política de Pesca continental

Se verán implicadas las Comunidades Autónomas (consejerías de Agricultura y Pesca o de Medio Ambiente). Dado el previsible cambio en las faunas (Apartado 3.3.5), deberá haber necesariamente adaptaciones administrativas y de gestión de las poblaciones piscícolas.

3.9.3. Política Ambiental

Competencia del Ministerio del Medio Ambiente y de las Comunidades Autónomas (Consejerías de Medio Ambiente y Obras Públicas), deberá pronunciarse sobre la conservación de los espacios naturales protegidos, bastantes de los cuales incluyen ecosistemas acuáticos continentales. Dicha política deberá realizarse a nivel de cuenca hidrográfica, incluyendo las aguas subterráneas, o carecerá de efectividad.

3.9.4. Política de Turismo regional y local

A ejecutar por las CCAA (Consejerías de Turismo) y los Ayuntamientos (Concejalías de Turismo), enclavados en el entorno de espacios naturales protegidos.

3.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

3.10.1. Estudios a largo plazo sobre los efectos ambientales del cambio climático en ecosistemas acuáticos continentales españoles en zonas sensibles al mismo

Puesta en marcha de una serie de estudios a largo plazo en ecosistemas-tipo, situados en cuencas no contaminadas y no reguladas, tales como los lagos pirenaicos (Redó), lago de Sanabria, lagunas de Sierra Nevada, ambientes fluviales del Alto Duero y del Alto Tajo, lagunas sobre rañas del norte de Palencia, humedales Ramsar, etc.

3.10.2. Estudio de la calidad de las aguas en relación con el cambio climático

Inexistente hasta la fecha.

3.10.3. Diseño de un sistema de indicadores biológicos de los impactos del cambio climático

En conexión con los grupos de trabajo que están trasponiendo y aplicando la Directiva-Marco Europea del Agua para España, debería elaborarse uno de algas, macrófitos y macroinvertebrados acuáticos.

3.10.4. Implementación de los modelos existentes para detectar efectos del cambio climático sobre los ecosistemas acuáticos continentales españoles

Inexistentes hasta la fecha.

3.10.5. Finalización urgente de la elaboración de las floras y faunas ligadas a medios acuáticos, especialmente de plantas no vasculares e invertebrados, junto con la descripción de su distribución en la Península Ibérica, Baleares y Canarias

Muchas no se han emprendido, pero son fundamentales para saber lo que hay en la actualidad y lo que puede desaparecer y aparecer por efectos del cambio climático.

3.10.6. Estudio sobre la dispersión y la ecología de plantas y animales invasores (*Azolla caroliniana*, *Eirocheir sinensis*, *Dreissena polymorpha*, *Micropterus salmoides, Esox lucius*, etc.) en relación con el cambio climático

Es de prever que aumente la invasión de determinadas especies procedentes de otras zonas del globo. Poco se sabe todavía sobre la ecología implicada en las invasiones de especies acuáticas en la Península Ibérica, aparte de su simple detección.

3.10.7. Estudio de impactos y adaptaciones al cambio climático a nivel genético, ecofisiológico, poblacional y ecológico

Imprescindible, dado el desconocimiento existente sobre el tema.

3.10.8. Estudios de los cambios en la biodiversidad de macrófitos y vertebrados a nivel local asociados al cambio climático

A realizar en los lugares Ramsar, se trata de evaluaciones relativamente sencillas, pero que deben llevarse a cabo periódicamente durante décadas con objeto de evaluar qué cambios han experimentado en la biodiversidad y cómo pueden afectar esos cambios al funcionamiento de los ecosistemas.

3.10.9. Simulaciones *in situ* de los posibles cambios en ecosistemas determinados (pequeños lagos, humedales y cuencas), alterando las condiciones ambientales de manera análoga a los cambios previstos

Estas simulaciones servirían para apreciar de manera realista los cambios en los ecosistemas antes de que se produjeran y generarían informaciones muy valiosas para poner en marcha medidas adaptativas.

3.10.10. Estudio e inventario de comunidades biológicas georeferenciadas a escala regional

A realizar fundamentalmente en las comunidades vegetales, este estudio se haría con vistas a establecer su estado ambiental actual con objeto de poder identificar las futuras transformaciones en las mismas debidas al cambio climático.

3.10.11. Estudio de los efectos de las medidas de mitigación

Imprescindibles para evaluar su eficacia y cambiarlas si no se demostraran como tales.

3.11. BIBLIOGRAFÍA

Allen J.R., Huntley B. y Watts W.A. 1996. The vegetation and climate of northwest Iberia over the last 14000 yr. Journal of Quaternary Science 11: 125-147.

Allier C., González Bernáldez F. y Ramírez Díaz L. 1974. Mapa Ecológico de la Reserva Biológica de Doñana y memoria a E. 1:10.000. División del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Sevilla. 132 pgs.

Alonso M. 1998. Las lagunas de la España peninsular. Limnetica 15: 1-176.

Alvarez Cobelas M.., Muñoz P., Rubio A. y Prat N. 1992. Current state of eutrophication in Spanish inland waters. European Water Pollution Control 2(5): 27-32.

Alvarez Cobelas M., Cirujano S. y Sánchez Carrillo S. 2001. Hydrological and botanical man-made changes in the Spanish wetland of Las Tablas de Daimiel. Biological Conservation 97: 89-97.

Angeler D.G., Chow-Fraser P., Hanson M.A., Sánchez Carrillo S. y Zimmer K.D. 2003. Biomanipulation: a useful tool for freshwter wetland mitigation? Freshwater Biology 48 : 2203-2213.

Annadoter H., Cronberg G., Aagren R., Lundstedt B., Nilson P.A. y Ströbeck S. 1999. Multiple techniques for lake restoration. Hydrobiologia 395/396: 77-85.

Arnell N. *et al.* 1996. Hydrology and freshwater ecology. En: Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A. y Maskell K. (eds.). Climate Change 1995. Cambridge University Press. Cambridge. Pgs. 325-363.

Avila A., Neal C. y Terradas J. 1996. Climate change implications for streamflow and stream water chemisty in a Mediterranean catchment. Journal of Hydrology 177: 99-116.

Ayala-Carcedo F.J. y Iglesias A. 2000. Impactos del posible Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España Peninsular. El Campo 137: 201-222.

Barriendos M. 1997. Climatic variations in the Iberian Peninsula during the late Maunder Minimum (1675-1717): an analysis of data from rogation ceremonies. The Holocene 7: 105-111.

Battarbee R.W., Grytnes J.A., Thompson R., Appleby P.G., Catalán J., Korhola A., Birks H.J.B. y Lami A. 2002. Climate variability and ecosystem dynamics at remote alpine and arctic lakes: the last 200 years. Journal of Paleolimnology 28: 161-179.

Bazzaz F.A. 1990. The response of natural ecosystems to the rising global CO_2 levels. Annual Review of Ecology and Systematics 21: 167-196.

Beguería S., López Moreno J.I., Lorente A., Seeger M. y González Ruiz J.M. 2003. Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the central Spanish Pyrenees. Ambio 32: 283-286.

Benavente J. y Rodríguez M. 1997. Análisis cuantitativo de los flujos subterráneos en las lagunas de Campillos (Málaga). Limnetica 13:15-24.

Benke A.C. 1993. Concepts and patterns of invertebrate production in running waters. Verhandlungen der Internatale Vereinigüng für Limnologie 25: 15-38.

Bernal S., Butturini A., Nin E., Sabater F. y Sabater S. 2003. Leaf litter dynamics and N_2O emission in a Mediterranean riparian forest: implications for soil nitrogen dynamics. Journal of Environmental Quality 32: 191-197.

Bradley R.S. 1999. Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary.. 2nd ed. Harcourt/Academic Press. New York.

Burjachs F., Giralt S., Roca J.R., Seret G. y Julia R., 1997. Palinología Holocénica y desertización en el Mediterráneo Occidental. En: Ibáñez J.J., Valero Garcés B.L. y Machado C. (eds.). El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Geoforma Ediciones, Logroño. Pgs. 379-394.

de Bustamante I., Dorado M., Rojas B., Temiño J., Segura M., García-Hidalgo J., Pérez del Campo P., Valdeolmillos A., Sicilia F., Fernández Reina I. y López Blanco M.J. 1995. Análisis del impacto ambiental de la explotación de los depósitos de turba asociados al río Guadiana en la Llanura Manchega e interés de su conservación. Informe Final. Proyecto para la Fundación Ramón Areces. Madrid.

Butturini A. y Sabater F.1998. Ammonium and phosphate ratention in a Mediterranean stream. Hydrological versus temperature control. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 55: 1938-1945.

Cacho I., Grimalt J.O., Pelejero C., Canals M., Sierro F.J., Flores J.A. y Shackleton N. 1999. Dansgaard-Oeschger and Heinrich event inprints in Alboran Sea paleotemperatures. Paleoceanography 14: 698-705.

Camarero L., Guilizzoni P., Muri G., Psenner R., Rose N., Stuchlik E. y Vidinova Y. 2004. Pan-European survey of heavy metals in alpine/arctic lake sediments: a record of diffuse atmospheric pollution at a continental scale. The Science of the Total Environment (enviado).

Carmona J.A., Doadrio I., Márquez A.L., Real R. y Vargas J.M. 1999. Distribution patterns of indigenous fishes in the Tagus River basin, Spain. Environmental Biology of Fishes 54: 371-387.

Carpenter S.R., Fisher S.G., Grimm N.B. y Kitchell J.F. 1992. Global change and freshwater ecosystems. Annual Review of Ecology and Systematics 23: 119-139.

de Castro F. y Muñoz Reinoso J.C. 1997. Model of long-term water-table dynamics at Doñana National Park. Water Research 31: 2586-2596.

Catalán J., Pla S., Rieradevall M., Felip M., Ventura M., Buchaca T., Camarero L., Brancelj A., Appleby P.G., Lami A., Grytnes J.A., Agustí-Panareda A. y Thompson R. 2002. Lake Redó ecosystem response to an increasing warming in the Pyrennees during the twentieth century. Journal of Paleolimnology 28: 129-145.

Cheddadi R., Yu G., Guiot J., Harrison S.P. y Prentice I.C. 1997. The Climate of Europe 6000 years ago. Climate Dynamics 13:1-19.

CEDEX 1997. Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y las demandas de riego en determinadas regiones de España. Informe técnico para el Ministerio de Medio Ambiente de España. Madrid.

Church J.A., Gregory J.M., Huybrechts P., Kuhn M., Lambeck K., Nhuan M.T., Qin D. y Woodworth P.L. 2001. Changes in sea level. En: Climate Change 2001. Cambridge University Press. Cambridge. Pgs. 639-694.

Clair T.A. y Ehrman J.M. 1996. Variations in discharge and dissolved organic carbon and nitrogen export from terrestrial basins with changes in climate: a neural network approach. Limnology and Oceanography 41: 921-927.

Cobo M.D., Sánchez Gullón E. y García Murillo P. 2002. Flora y vegetación. En: Parque Nacional de Doñana. Canseco Editores. Talavera de la Reina. Pgs. 108-174.

Cohen A. 2003. Paleolimnology. The History and Evolution of Lake Systems. Oxford University Press. Oxford.

Comín F.A. y Alonso M. 1988. Spanish salt lakes: their chemistry and biota. Hydrobiologia 158: 237-246.

Comín F.A., Rodó X. y Comín P. 1992. Lake Gallocanta (Aragón, NE Spain): a paradigm of fluctuations at different scales of time. Limnetica 8: 79-96.

Custodio E., Llamas M.R. y Villarrroya F. 1998. The role of Spanish Committee of the International Association of Hydrogeologists in the management and protection of Spain's groundwater resources. Hydrogeology Journal 6: 15-23.

Dirección General de Obras Hidraúlicas 1988. Inventario de presas españolas, 1986. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid.

Dorado M., Valdeolmillos A., Ruiz B., Gil M.J. y de Bustamante I. 2002. Climatic changes since the Late-glacial/Holocene transition in La Mancha Plain (South-central Iberian Peninsula, Spain) and their incidence on Las Tablas de Daimiel marshlands. Quaternary International 93/94: 73-84.

Eaton J.G. y Scheller R.M. 1996. Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States. Limnology and Oceanography 41: 1109-1115.

Espinar J.L., García L.V., García Murillo P. y Toja J. 2002. Submerged macrophyte zonation in a Mediterranean salt marsh: a facilitation effect from estabilised helophytes?. Journal of Vegetation Science 13: 1-15.

Fernández Delgado C. y Herrera M. 1994. Population structure, growth and reproduction of *Tropidophoxinellus alburnoides* (Steindachter, 1866) in an intermittent stream of the Guadalquivir River basin (southern Spain). Archiv für Hydrobiologie 130: 359-369.

Fetter C.W. 2001. Applied Hydrogeology. Prentice-Hall. New York.

Fisher S.G., Grimm N.B., Martí E., Holmes R.M. y Jones jr, J.B. 1998. Material spiraling in stream corridors: a telescoping ecosystem model. Ecosystems 1: 19-34.

Freeman C., Evans C.D., Monteith D.T., Reynolds B. y Fenner N. 2001. Export of organic carbon from peat soils. Nature 412: 785.

Friedland K.D., Reddin D.G. y Castonguay M. 2003. Ocean thermal conditions in the post-smolt nursery of North American Atlantic salmon. ICES-Journal-of-Marine-Science. 60: 343-355.

García Murillo P. 2000. *Utricularia exoleta* R. Br. En: Blanca G., Cabezudo B., Henández-Bermejo E., Herrera C.M., Muñoz J. y Valdés B. (eds.). Libro Rojo de la Flora Silvestre Amenazada de Andalucía, Tomo II, Especies Vulnerables. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla. Pgs. 361-363.

García Murillo P. 2003. Plantas acuáticas y carnívoras en Doñana. Doñana 2005, 4: 8-11.

García Murillo P.; Sousa A. y Fuertes E. 1995. *Sphagnum inundatum* Russ., nuevo para Andalucía. Anales del Jardín Botánico de Madrid 53: 245.

Gierlowski-Kordesch E. y Kelts K. 1994. Introduction. En: Gierlowski-Kordesch E. y Kelts K.R. (eds.). Global Geological Record of Lake Basins. Volume 1. Cambridge University Press, Cambridge: xvii-xxxiii.

Giralt S. y Juliá R. 2004. Water level reconstruction in closed lakes based on the mineralogical composition of sediments. En: Valero Garcés B.L. (ed.). Limnogeology in Spain: a Tribute to Kerry R. Kelts. CSIC. Madrid. Pgs. 305-325.

Giralt S., Burjachs F., Roca J.R. y Juliá R. 1999. Late Glacial to Early Holocene environmental adjustment in the Mediterranean semi-arid zone of the Salines playa-lake (Alicante, Spain). Journal of Paleolimnology 21: 449-460.

Grimalt J.O., Fernández P., Berdie L., Vilanova R., Catalán J., Psenner R., Hofer R., Appleby P.G., Rosseland B.O., Lien L., Massabau J.C. y Battarbee R.W. 2001. Selectrive trapping of organochlorine compounds in mountain lakes of temperate areas. Environmental Science and Technology 35: 2690-2697.

Gutiérrez Teira B. 2003. Variaciones de las comunidades y poblaciones de macroinvertebrados del tramo alto del río Manzanares a causa de la temperatura. Posibles efectos del cambio climático. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

Halac S., Felip M., Camarero L., Sommaruga-Wögrath S., Psenner R., Catalán J. y Sommaruga R. 1997. An in situ enclosure experiment to test the solar UVB impact on plankton in a high-altitude mountain lake. I. Lack of effect on phytoplankton species composition and growth. Journal of Plankton Research 19: 1671-1686.

Harrison S., Prentice I.C. y Bartlein P. 1992. Influence of insolation and glaciation on atmospheric circulation in the North Atlantic sector: implications of general circulation model experiments for the Late Quaternary Climatology of Europe. Quaternary Science Reviews 11: 283-299.

Ibañez C., Prat N. y Canicio A. 1996. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. Regulated Rivers 12: 51-62.

INITEC 1991. Estudio de las zonas húmedas de la España peninsular. Inventario y tipificación. 8 vols. Dirección General de Obras Hidráulicas. MOPU. Madrid.

Jenkins A., McCartney M.y Sefton C. 1993. Impacts of climate change on river quality in the United Kingdom. Report to Department of Environment. Institute of Hydrology. Wallingford. 39 pgs.

Jeppesen E., Søndergaard M. y Jensen J.P. 2003. Climate warming and regime shifts in lake food webs - some comments. Limnology and Oceanography 48: 1346-1349.

Jones P.D. y Thompson R. 2003. Instrumental records. En: Mackay A.W., Battarbee R.W., Birks H.J.B. y Oldfield F. (eds.). Global Change in the Holocene. Edward Arnold, London. Pgs. 140-158.

Kelts K.R. y Talbot M. 1989. Lacustrine Carbonates as Geochemical Archives of Environmental Change and Biotic/Abiotic Interactions. En: Tilzer M.M. y Serruya C. (eds.). Large Lakes, Ecological Structure and Function. Springer Verlag, New York. Pgs. 288-315.

Lake P.S., Palmer M.A., Biro P., Cole J.J., Covich A.P., Dahm C., Gibert J., Goedkoop W., Martens K. y Verhoeven J. 2000. Global change and the diversity of freshwater ecosystems: impacts and linkages between above-sediment and sediment biota. Bioscience 50: 1099-1107.

Last W. y Smol J.P. (eds.). 2001. Tracking environmental change using lake sediments. 4 vols. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Lissner J., Schierup H.H., Comín F.A. y Astorga V. 1999a. Effect of climate on the salt tolerance of two *Phragmites* australis populations. I. Growth, inorganic solutes, nitrogen relations and osmoregulation. Aquatic Botany 64: 317-333.

Lissner J., Schierup H.H., Comín F.A. y Astorga V. 1999b. Effect of climate on the salt tolerance of two *Phragmites* australis populations. II. Diurnal CO_2 exchange and transpiration Aquatic Botany 64: 335-350.

Livingstone D.M. 2003. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate Central European lake. Climatic Change 57: 205-225.

Lozano E., Coleto C., Manzano M. y Custodio E. 2002. Saline waters in the coastal area of the National Park of Doñana (SW of Spain) in absence of saline water intrusion. 17th Salt Water Intrusion Meeting: 239-249.

Luque J.A. y Juliá R. 2002. Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria (northwest of Iberian Peninsula). Sedimentary Geology 148: 343-355.

Martí E., Aumatell J., Godé L., Poch M. y Sabater F. 2004. Nutrient retention efficiency in streams receiving inputs from wastewater treatment plants. Journal of Environmental Quality 33: 285-293.

Mason I.M., Guzkowska M.A.J., Rapley C.G. y Street-Perrot F.A. 1994. The response of lake levels and areas to climatic change. Climatic Change 27: 161-197.

McKee D., Atkinson D., Collings S.E., Eaton J.W., Gill B., Harvey I., Hatton K., Heyes T., Wilson D. y Moss B. 2003. Response of freshwater microcosm communities to nutrients, fish, and elevated temperature during winter and summer. Limnology and Oceanography 48: 707-722.

MIMAM 1998. Libro Blanco del Agua. Madrid. 855 pgs.

MIMAM 1999. Plan estratégico español para la Conservación y Uso racional de los Humedales. Madrid. 88 pgs.

Montero E. 2000. Contribución al estudio de la geometría y los límites del acuífero del Campo de Montiel. Instituto de Estudios Albacetenses. Diputación Provincial de Albacete. Albacete.

Montes C. (Director) 1993. Estudio de los valores ambientales existentes en las láminas de agua generadas por actividades extractivas en la Comunidad de Madrid. Informe para la Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid. 4 vols. + apéndices. Universidad Autónoma de Madrid.

Montes C. 1995. La explotación y la gestión de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales españoles: una perspectiva ecológica. En: Las aguas subterráneas en la Ley de Aguas Española: Un decenio de Experiencias. Univ. Murcia. Pgs. 305-327.

Murdoch P.S., Baron J.S. y Miller T.L. 2000. Potential effects of climate change on surface-water quality in North America. Journal of the American Water Research Association 36: 347-366.

Öquist M.G. *et al.* 1996. Non-tidal wetlands. En: Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A. y Maskell K. (eds.). Climate Change 1995. Cambridge University Press. Cambridge. Pgs. 215-239.

Peñalba M.C., Arnold M., Guiot J., Duplessy J.C. y Beaulieu J.L. 1997. Termination of the Last Glaciation in the Iberian Peninsula inferred from the pollen sequence of Quintanar de la Sierra. Quaternary Research 48: 205-214.

Pérez I., Obiol R. y Juliá R. 1994. Climatic change on the Iberian Peninsula recorded in a 30,000-yr pollen record from Lake Banyoles. Quaternary Research 41: 91-98.

Poff N.L., Brinson M. M. y Day jr. J.W. 2002. Aquatic ecosystems and global climate change. Pew Center on Global Climate Change. Arlington, Virginia. <www.pewclimate.org/global-warming-in-depth/all reports/aquatic ecosystems>

Pons A. y Reille M. 1988. The Holocene and upper Pleistocene pollen record from Padul (Granada, Spain). A new study. Palaeogeography, Palaeogeography and Palaeoecology 66: 243-263.

Prat N. 1995. El agua en los ecosistemas. El Campo 132: 29-48.

Prentice I.C., Harrison S., Jolly D. y Guiot J. 1998. The climate and biomes of Europe at 6000 yr BP: Comparison of model simulations and pollen-based reconstructions. Quaternary Science Reviews 17: 659-668.

Rahel F.J., Keleher C.J. y Anderson J.L. 1996. Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River drainage of the Rocky Mountains: response to climate warming. Limnology and Oceanography 41: 1116-1123.

Reed J.M., 1998. Diatom preservation in the recent sediment record of Spanish saline lakes: implications for palaeoclimate study. Journal of Paleolimnology 19: 129-137.

Reed J.M., Stevenson A.C. y Juggins S.J. 2001. A multi-proxy record of Holocene climate change in southwestern Spain: the Laguna de Medina, Cádiz. The Holocene 11: 705-717

Rivas Martínez S. 1979. Brezales y jarales de Europa occidental. Lazaroa 1: 5-127.

Rivas Martínez S., Costa M., Castroviejo S. y Valdés Bermejo E. 1980. La vegetación de Doñana (Huelva, España). Lazaroa 2: 5-189.

Rodó X., Baert E. y Comín F.A. 1997. Variations in seasonal rainfall in Southern Europe during the present century: relationships with the North Atlantic Oscillation and the El Niño-Southern Oscillation. Climate Dynamics 13: 275-284.

Rodó X., Giralt S., Burjachs F., Comín F.A., Tenorio R.G. y Juliá R. 2002. High-resolution saline sediments as enhanced tools for relating proxy paleolake records to recent climatic data series. Sedimentary Geology 148: 203-220.

Roshier D.A., Whetton P.H., Allan R.J. y Robertson A.I. 2001. Distribution and persistence of temporary wetland habitats in arid Australia in relation to climate. Austral Ecology 26: 371-384.

Sánchez Carrillo S. y Alvarez Cobelas M. 2001. Nutrient dynamics and eutrophication patterns in a semiarid wetland: the effects of fluctuating hydrology. Water, Air and Soil Pollution 131: 97-118.

Sánchez Carrillo S., Alvarez Cobelas M., Benítez M. y Angeler D.G. 2001. A simple method for estimating water loss by transpiration in wetlands. Hydrological Sciences Journal 46: 537-552.

Sánchez Carrillo S., Angeler D.G., Alvarez Cobelas M., Sánchez Andrés R. y Garatuza J. 2005. Evapotranspiration in semiarid wetlands: relationships between inundation and the macrophyte cover:open ratio. Advances in Water Research (en prensa).

Sánchez Goñi M.F. y Hannon, G.E 1999. High-altitude vegetational pattern on the Iberian Mountain Chain (north-central Spain) during the Holocene. The Holocene 9: 39-57.

Scheffer M., Straile D., van Nees E.H. y Hosper H. 2003. Climatic effects on regime shifts in lakes: a reply. Limnology and Oceanography 48: 1353-1356.

Schindler D.W. 1997. Widespread effects of climate warming on freshwater ecosystems in North America. Hydrological Processes 11: 1043-1057.

Schindler D.W. 2001. The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 58, 18-29.

Sommaruga R., Sattler B., Oberleiter A., Wille A., Wögrath-Sommaruga S., Psenner R., Felip M., Pina S., Girones R. y Catalán J. 1999. An in situ enclosure experiment to test the solar UVB impact on plankton in a high-altitude mountain lake. II. Effects on the microbial food web. Journal of Plankton Research 21: 859-876.

Sousa A. 2004. Evolución de la vegetación higrofítica y de los humedales continentales en el litoral onubense oriental. Tesis Doctoral. Univ. Sevilla. Sevilla.

Sousa A. y García Murillo P. 2002. Méthodologie pour l'étude des effets du Petit Age Glaciaire dans le Parc Naturel de Doñana (Huelva, Espagne). Essai de reconstitution des formations palustres et du drainage superficiel. Publications de l'Association Internationale de Climatologie 14: 359-367.

Sousa A. y García Murillo P. 2003. Changes in the wetlands of Andalusia (Doñana Natural Park, SW Spain) at the end of the Little Ice Age. Climatic Change 58: 193-217.

Stromberg J.C., Tiller R. y Richter B. 1996. Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: the San Pedro, Arizona. Ecological Applications 6: 113-131.

Thompson R., Price D., Cameron N., Jones V., Bipler C., Rosén P., Hall R.I., Catalán J., García J., Weckstrom J. y Korhola A. 2005. Quantitative calibration of remote mountain lake sediments as climatic recorders of air temperature and ice-cover duration (enviado)

Thornton J.A., Rast W., Holland M.M., Jolankai G. y Ryding S.O. 1998. Assessment and control of nonpoint source pollution of aquatic ecosystems. MAB vol. 23. UNESCO. Paris.

Toth J. 1963. A theoretical analysis of ground water flow in small drainage basins. Journal of Geophysical Research 68: 4795-4812.

Valero Garcés B.L. y Kelts K.R. 1997a. Desertificación y cambio global en la Península Ibérica durante el último ciclo glacial a partir de restos lacustres. En: Ibáñez J.J., Valero Garcés B.L. y Machado C. (eds.). El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Geoforma ediciones. Logroño. Pgs. 419-437.

Valero Garcés B.L. y Kelts K.R. 1997b. Técnicas en limnogeología aplicadas al estudio del cambio climático y desertificación en la Península Ibérica. En: Ibáñez J.J., Valero Garcés B.L. y Machado C. (eds.). El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Geoforma ediciones. Logroño. Pgs. 395-4187.

Valero Garcés B.L., Delgado Huertas A., Navas A., Machín J., González Sampériz P. y Kelts K. 2000a. Quaternary palaeohydrological evolution of a playa lake: Salada Mediana, central Ebro Basin, Spain. Sedimentology 47: 1135-1156.

Valero Garcés B.L., González Sampériz P., Delgado Huertas A., Navas A., Machín J. y Kelts K. 2000b. Lateglacial and Late Holocene environmental and vegetational change in Salada Mediana, central Ebro Basin, Spain. Quaternary International 73/74: 29-46.

Valero Garcés B.L., Navas A., Machín J., Stevenson T. y Davis B. 2000c. Responses of a saline lake ecosystem in a semiarid region to irrigation and climate variability. The history of Salada Chiprana, Central Ebro Basin, Spain. Ambio 29: 344-350.

Valero Garcés B.L., Navas A., Mata P., Delgado Huertas A., Machín J., González Sampériz P., Schwalb A., Ariztegui D., Schnellmann M., Bao R. y González Barrios A. 2004. Sedimentary facies analyses in lacustrine cores: from initial core descriptions to detailed paleoenvironmental reconstructions. A case study from Zoñar Lake (Cordoba province, Spain). En: Valero Garcés B.L. (ed.). Limnogeology in Spain: a Tribute to Kerry R. Kelts, CSIC. Madrid. Pgs. 385-414.

Wall G. 1998. Implications of global climate change for tourism and recreation in wetland areas. Climatic Change 40: 371-389.

Wetzel R.G. 1990. Land-water interfaces: metabolic and limnological regulators. Verhandlungen der Internatale Vereinigüng für Limnologie 24: 6-24.

Williamson, C.E. y Zagarese H.E. (eds.) 1994. Impact of UV-B radiation on pelagic freshwater ecosystems. Archiv für Hydrobiologie, Beihefte Ergebnisse der Limnologie 43: 1-226.

Wood W.W. y Sanford W.E. 1994. Recharge of the Ogalalla: 60 years after C.V. Theis's analysis. Procedings of the Playa Basin Symposium: 23-33. Texas Technical University, Lubock.

Zedler J.B. 2000. Progress in wetland restoration ecology. Trends in Ecology and Evolution 15: 402-407.

4. IMPACTOS SOBRE LOS ECOSISTEMAS MARINOS Y EL SECTOR PESQUERO

Ricardo Anadón, Carlos M. Duarte y A. Celso Fariña

Revisores

J. L. Acuña Fernández, M. Alcaraz Medrano, X. A. Álvarez Salgado, J. M. Arrontes Junquera, A. Bode Riestra, A. Borja Yerro, C. Fernández González, M. Estrada Miyares, E. M. Fernandez Suárez, S. Fraga Rivas, M. C. Gil Rodríguez, F. Gómez Figueiras, D. Gomís Bosch, A. Guerra Sierra, U. Labarta Fernández, A. Lavín Montero, S. Lens Lourido, M. I. Palomera Laforga, J. Pantoja, G. Parrilla Barrera, C. Pedrós Alio, J. L. Pelegrí Llopar, J. Rodríguez Martínez, E. Saiz Sendrós, J. Salat Umbert, F. Sánchez Delgado, F. Sardá Amills, L. Valdés Santurio, R. Varela Benvenuto, M. Varela Rodríguez

I. Valiela, K. Brander

RESUMEN

El sistema climático está definido por la interacción entre la atmósfera y el océano, no pudiendo explicarse el cambio climático sin la intervención del océano. A su vez, el océano es alterado por los cambios en los regímenes de vientos, la temperatura, la precipitación o los aportes continentales y la evaporación. Se han detectado incrementos de temperatura en todas las costas españolas, así como cambio en la estacionalidad e intensidad de algunos procesos oceánicos, como los afloramientos. Hay indicios que el cambio del clima oceánico se está acelerando en los últimos años. El cambio climático también afectará a los intercambios de gases de efecto invernadero entre la atmósfera y el océano, y reduciendo la solubilidad del dióxido de carbono.

España presenta una gran variedad de ecosistemas y de especies marinas, que proporcionan recursos (pesca, marisqueo, ocio, cultivo), bienes y servicios. Los ecosistemas están afectados por cambios en las condiciones hidrográficas y ambientales que se derivan del cambio del clima, al igual que los ecosistemas terrestres. El cambio está generando múltiples respuestas directas e indirectas; algunas de estas interaccionan con otros usos humanos (explotación, modificación de costas, etc.), generan incertidumbre sobre la intervención de cada uno de los factores. Los efectos diferirán para ecosistemas de afloramiento o de zonas estratificadas, y de zonas costeras a oceánicas. Se prevé una reducción de la productividad de las aguas españolas, dadas sus características de mares subtropicales o templados cálidos.

Se han detectado cambios en la distribución de las especies, con incremento de especies de aguas templadas y subtropicales. Así mismo, se ha reducido la abundancia de especies boreales. Se conocen cambios en muchos grupos de organismos, desde fitoplancton y zooplancton a peces y algas. Es muy previsible que muchas especies modifiquen su abundancia y distribución en el futuro. Se ha detectado un incremento de especies invasoras, pero no se ha estudiado con precisión el papel del cambio climático en el mismo.

Los cambios en los ecosistemas y en las redes tróficas marinas están afectando a las especies recursos, sobre todo en su fase larvaria y en el reclutamiento. Se reduce la extracción de algunas especies pero se incrementa la de otras especies. No se conoce como será el balance entre pérdidas y beneficios provocado por estos cambios, y no se pueden aislar de los cambios generados por la explotación de las poblaciones.

Los cultivos marinos no subsidiados con alimento pueden verse afectados por la reducción de la productividad marina. Se han apreciado incrementos en la aparición de especies de fitoplancton tóxico o de parásitos de especies cultivadas. Las evidencias apuntan a un incremento de las perdidas en los cultivos asociadas a la presencia de estas especies, favorecidas por el incremento térmico de las aguas costeras.

Las zonas y sistemas más vulnerables al cambio climático son las comunidades bénticas, constituidas por organismos fijos a un substrato o las especies asociadas. Entre las más afectadas se encontrarán las praderas de fanerógamas.

La gestión de los ecosistemas marinos costeros y de las especies marinas, debe ser considerada desde un punto de vista multiespecífico ecosistémico. Debe favorecerse la búsqueda de soluciones que mitiguen los efectos generados por la actividad humana directa, y el seguimiento a medio o largo plazo de las actuaciones.

Entre las principales necesidades de investigación destaca la consolidación de redes de seguimiento ambiental y ecológico a largo plazo, aprovechando y mejorando las ya existentes. Se deben potenciar las bases de datos accesibles. Se debe potenciar la participación española en programas internacionales. Se deben promover planes de investigación dedicados a conocer los impactos generados por el cambio oceánico en especies y ecosistemas, tanto desde un punto de vista retroactivo como prospectivo.

4.1. INTRODUCCIÓN

4.1.1. Breve descripción de la extensión y características de las aguas océanicas de las costas españolas

La costa española, incluyendo los archipiélagos, mide unos 7,880 Km., una cifra apreciable. Está bañada por el Atlántico y el Mediterráneo, océano y mar de muy distintas características. Los márgenes continentales son por lo general estrechos, al igual que lo son sus aguas costeras. Posee una gran diversidad de ambientes, desde condiciones bóreo-atlánticas en la costa gallega, hasta subtropicales en las costas canarias. En todas las costas españolas se detecta un periodo estival de estratificación, siendo su duración variable. Gran parte de la costa atlántica española está afectada por afloramientos, anuales o estacionales, y por la circulación del gran Giro Subtropical y su límite oriental. Esta circulación general está modulada en la costa ibérica por corrientes de dirección variable según la estación del año; es de destacar la corriene asociada al talud continental que recorre el oeste y norte de la península en dirección norte en otoño e invierno. Las costas Mediterráneas están afectadas por corrientes de talud (frías una buena parte del año) y por un prolongado periodo de estratificación. Los diversos procesos (físicos, químicos y biológicos) que tiene lugar en su intercambio entre el Atlántico y y el Mediterráneo, y su influencia sobre las caraterísticas hidrológicas del océano han hecho de Gibraltar paradigma de los estrechos. A estos intercambios se asocian procesos de afloramiento en el sur de la Península.

4.1.2. Estado de los recursos explotados: Importancia en el PIB nacional

La participación del sector pesquero en la actividad económica de España es muy parecida a la media de la UE, y se sitúa alrededor del 1% del PIB. Su importancia es mayor en las regiones del noroeste y norte de España, sin olvidar otras regiones, especialmente Andalucía y Canarias.

La economía de algunas regiones depende en gran parte de la actividad pesquera (representa el 10% del PIB en la comunidad Gallega), la cual tiene un alto valor estratégico para el desarrollo de dichos territorios. Alrededor del sector primario extractivo se genera con efecto multiplicador un conglomerado de actividades complementarias relacionadas (comercialización, transformación, construcción naval, transferencia de tecnología, industria auxiliar y servicios) que configuran un conjunto económico y social inseparable. El sector pesquero es, en aquellas zonas donde está implantado, una actividad tradicional, de la que deriva una valiosa fuente de recursos alimentarios, posibilita transferencias tecnológicas e impulsa una concentración geográfica de relaciones y actividades intersectoriales. Por estas razones hay que considerar que la pesca y los cultivos marinos son de gran importancia para muchas zonas costeras, dado que el empleo está asociado con la captura y transformación de este recurso, independientemente de la cantidad capturada o de la eficiencia del procesos, sobre todo en el caso de pesquerías artesanales.

El sector pesquero español está constituido por una diversidad de flotas que actúan en caladeros nacionales del Atlántico y Mediterráneo, en pesquerías de media distancia (por ejemplo, aguas de Escocia e Irlanda, Gran Sol, Golfo de Vizcaya, Noroeste de África) y en áreas lejanas (Terranova, Malvinas, Golfo de Guinea, etc.). Las flotas artesanales explotan recursos cercanos a la costa.

La producción española total de recursos marinos extractivos presenta una tendencia sostenida de ligero descenso desde de 1970 (1,4 millones t) hasta el 2002 (1,1 millones t) según los datos estadísticos de la FAO (Figura 4.1A). La pesca española en el Mediterráneo, se halla estabilizada por encima de las 100.000 t. La producción pesquera de grandes pelágicos

oceánicos (atunes y peces espada) aumentó notoriamente desde 1970 hasta 1990 y desde entonces se mantiene relativamente estable (Figura 4.1B).

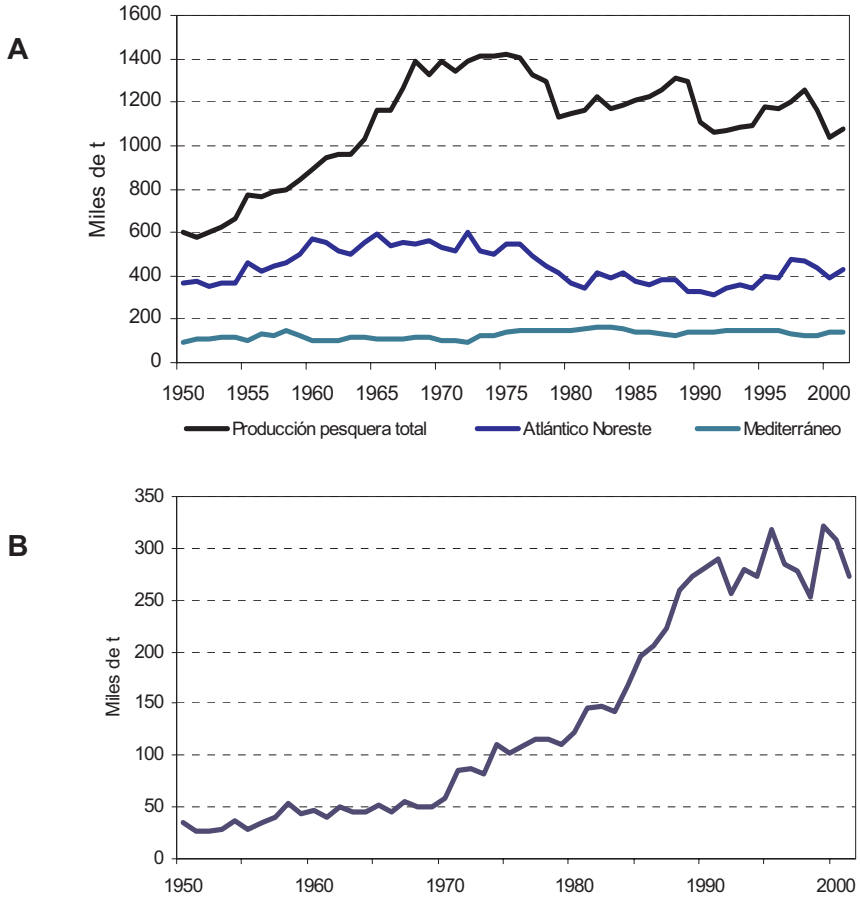


Fig. 4.1. *A: Producción pesquera marina (peces, moluscos y crustáceos) de España: total, en el Atlántico Noreste y en el Mediterráneo 1950-2001. B: Capturas españolas totales de pelágicos oceánicos (túnidos y peces espada) 1950-2001. (Fuente: estadísticas de la FAO).*

Aproximadamente un tercio de la producción pesquera española se realiza en el Atlántico Noreste, y en la actualidad la contribución de los grupos de especies pelágicas y de fondo es muy similar (Fig. 4.2).

Los caladeros del margen ibérico atlántico presentan una situación de fuerte explotación y las capturas españolas de las principales especies pelágicas y de fondo en esta zona, muestran en general una tendencia a la baja más acusada en especies de fondo (merluza, rapes, gallos y cigala), pero se están incrementando la captura de otras como la caballa, aunque no en la misma cuantía.

Además de la pesca, en el Atlántico Noreste se extraen otros productos marinos, como algas, crustáceos y moluscos. La evolución de su extracción presenta una reducción desde la década de los 70 según los datos estadísticos de la FAO (Figura 4.2). En los últimos años parece producirse un ligero incremento de la extracción de algas y moluscos, aunque las estadísticas pueden no ser muy fiables.

La producción marina española de acuicultura (Figura 4.2) fue de 320.000 t en 2003. Gran parte de esta producción (aproximadamente las tres cuartas partes) corresponde al cultivo del

mejillón en las rías de Galicia (Labarta 2000). La producción de cultivo de peces marinos (dorada, lubina, rodaballo, atunes) representa un 6%, con un incremento importante en los últimos años, y la de otros moluscos (almeja, berberecho, etc.) un 4%, estancada en los últimos años (Labarta 2000).

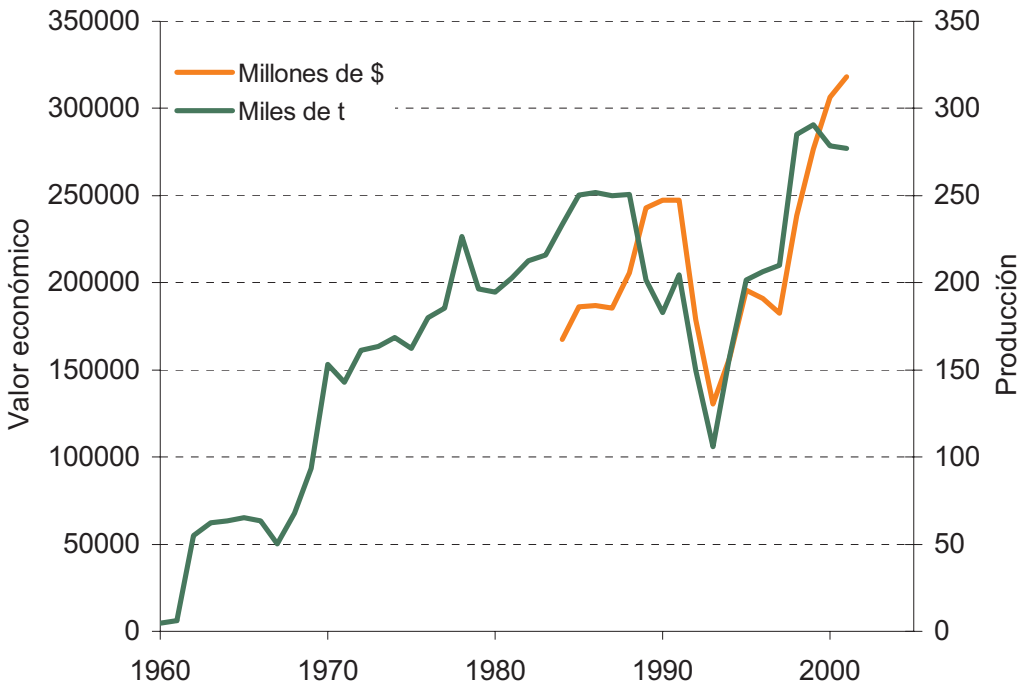


Fig. 4.2. *Producción española de acuicultura marina y valor económico. (Fuente: estadística de la FA) y JACUMAR).*

Otra serie de recursos, del que el principal exponente es el turismo costero, en el que se debe incluir la pesca deportiva, el buceo, la navegación, son recursos importantes, aunque sean analizados en otros capítulos.

4.1.3. Biodiversidad marina y protección

La gran longitud de la costa española, y que estas sean bañadas por diversos mares en un rango latitudinal muy amplio, Golfo de Vizcaya, Atlántico Ibérico, Mediterráneo y las Islas Atlánticas, motiva que exista una gran diversidad de ambientes, costas con mayor o menor flujo de marea, zonas de afloramiento (Canarias, Golfo de Cádiz, costa de Málaga, Galicia y Golfo de Vizcaya), corrientes costeras (costa mediterránea y atlántica), zonas de gran intercambio con estructuras asociadas (giros en el entorno del estrecho de Gibraltar; filamentos en la costa Canaria), áreas subtropicales muy estratificadas (extremo oeste de Canarias), lo que implica situaciones biogeográficas muy contrastadas. A esto se añade la presencia de comunidades con una gran riqueza específica, y la presencia de ambientes muy específicos, como cañones submarinos. En resumen, reúne todas las características para afirmar que es un país con una elevada biodiversidad en el medio marino, y con una gran potencialidad en los recursos. Dentro de los ecosistemas marinos con un gran valor como reservorio de biodiversidad y protegidas por la ley, en algunas regiones españolas, destacan los estuarios y marismas y las praderas de angiospermas marinas (*Posidonia oceanica* en el Mediterráneo; *Cymodocea nodosa, Zostera noltii* y *Halophila decipiens* en las aguas de Canarias; *Zostera marina* y *Zostera noltii* en el

Atlántico Ibérico, y los campos de algas en las zonas intermareales y submareales de las costas rocosas del Atlántico y del Mediterráneo. La zona costera es también rica en aves, algunas de cuyas poblaciones se hallan en peligro; también existen especies de mamíferos marinos que la frecuentan, la mayoría de ellos protegidos, y tortugas marinas.

Al contrario que en el ambiente terrestre, la red de espacios protegidos marinos ha sido muy escasa hasta tiempos recientes. Según datos del WWF en el año 1999, la red de áreas Marinas Protegidas (MPA) constaba de 38 espacios, de los que sólo 13 pueden considerarse plenamente marinos, mientras el resto protegen zonas terrestres y costeras. Un capítulo aparte lo merece la reciente creación del Parque Nacional de las Islas Atlánticas. También lo es la inclusión de las praderas de *P. oceanica* entre las islas de Ibiza y Formentera como Patrimonio de la Humanidad. Además, existen 18 reservas Marinas de interés pesquero gestionadas por el Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, por las Comunidades Autónomas respectivas o bien con gestión mixta (http://www.mapa.es/). La reciente implementación de la Red Natura 2000 ha llevado a un gran aumento de las áreas costeras protegidas, particularmente en las comunidades de la cuenca Mediterránea y Canarias. Así, por ejemplo, Canarias tiene 22 LICs exclusivamente marinos y 3 terrestres-marinos. En total en el archipiélago hay 172.215,9 ha de LICs marinos (Red Canaria de Espacios Protegidos 1995; Natura 2000, Gobierno de Canarias 2000). Sin embargo, todas las zonas marinas conservadas se sitúan en la zona costera y no existen reservas en mar abierto o sobre la plataforma en las aguas del área económica exclusiva española. El diseño de las áreas protegidas tampoco ha sido homogéneo en su desarrollo territorial, ni los criterios utilizados han sido consensuados entre las distintas autonomías, por lo que dejan algunas sombras sobre su complementariedad y optimización.

Existen medidas de protección específicamente relacionadas con la pesca, como áreas reserva, épocas y zonas de veda, tallas mínimas, restricciones en el uso de ciertas artes de pesca y cuotas de pesca de diversas especies (europeas, nacionales o autonómicas). Estas medidas están dirigidas al uso sostenible de los recursos, más que a una conservación estricta de los ecosistemas. En todo caso, se considera a la explotación y la conservación como un binomio que debe desarrollarse de forma conjunta para mantener la sostenibilidad del uso. Las medidas de protección, en el caso de especies migradoras (p.e. atunes, cetáceos o tortugas marinas), deberían englobar a todas las áreas geográficas de su distribución, al igual que sucede con las especies migradoras terrestres. La cooperación o la regulación internacional debe ser un requisito a potenciar.

4.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

El océano afecta al clima y éste, a su vez, afecta a las características y dinámica del océano. Las variaciones y el cambio climáticos pueden tener efectos directos sobre el océano, al variar los flujos de energía y gases con la atmósfera, la cantidad de calor y sales que transporta (temperatura y densidad), la formación y extensión de hielos marinos, y por todo ello a la circulación. Por modificaciones en las pautas de evaporación y precipitación, o de acumulación-deshielo en los campos de hielo continental también se ve afectado su nivel. Todos estos eventos pueden provocar cambios en la circulación termohalina del océano (Broecker 1997, Broecker *et al.* 1999), por lo que reducirá al transporte de calor entre el Ecuador y los polos. Esta situación podría provocar cambios climáticos muy rápidos. También pueden tener un efecto indirecto sobre los organismos y ecosistemas marinos (Fig. 4.3).

Un segundo efecto indirecto puede derivarse de cambios en la disposición de altas y bajas presiones atmosféricas y en la intensidad de los vientos. Esta situación generará cambios en las corrientes marinas, su distribución y estacionalidad, y también del oleaje. Los cambios en las condiciones hidrodinámicas tendrán un efecto directo sobre los ecosistemas y la biodiversidad marina, ya que se modificará la distribución de la temperatura y los nutrientes en

las capas superiores del océano, la producción primaria marina, y en definitiva la red trófica marina, entre los que se encuentran nuestros principales recursos, los peces, los moluscos y los crustáceos. Los cambios en la disposición de estructuras de mesoescala pueden influenciar la supervivencia de los estadios larvarios de múltiples especies, generando cambios en las poblaciones de especies explotadas. Un ejemplo de los efectos de las estructuras de mesoescala se puede ver en González-Quirós *et al.* (2004).

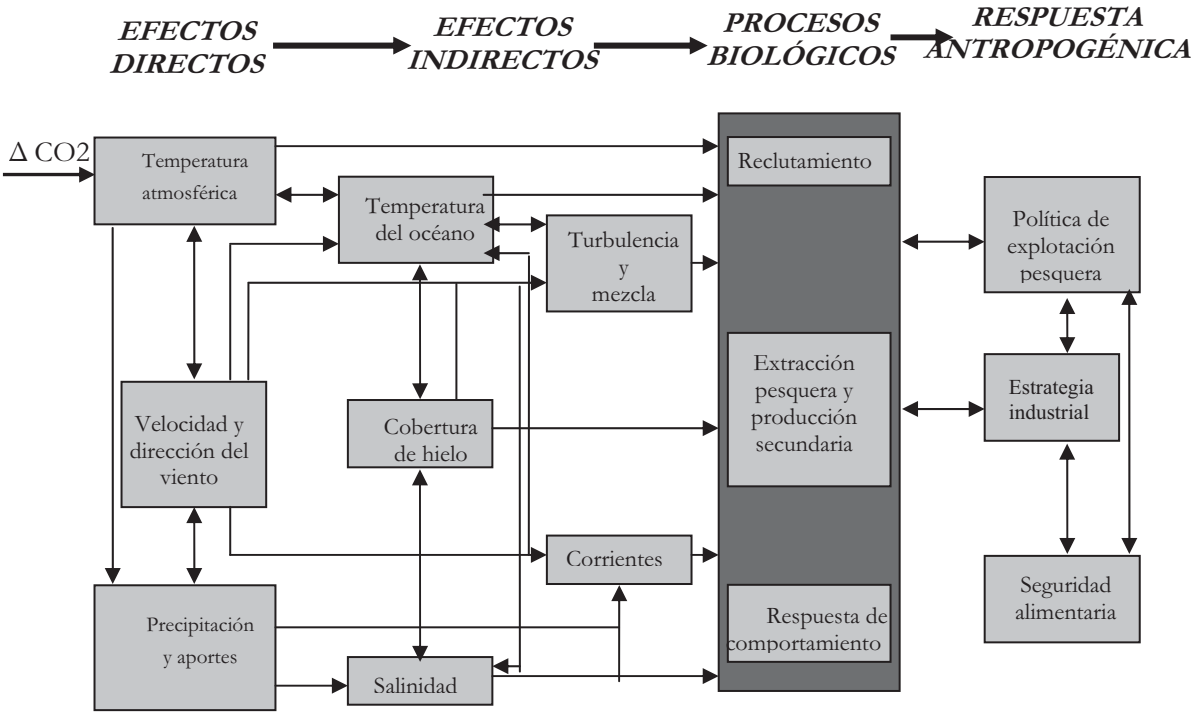


Fig. 4.3. *Vías principales por las que el cambio climático puede afectar a las poblaciones marinas y su explotación, y que son objetivos core del programa GLOBEC del IGBP (GLOBEC 2003).*

Sobre las modificaciones que puede generar el cambio climático hay que añadir los cambios derivados de la actividad humana directa, como explotación de las poblaciones de múltiples especies, que deberían englobarse en un término de orden superior, el Cambio Global. Sin información consistente será difícil delimitar los efectos de una u otra causa.

4.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

4.3.1. Impacto sobre la productividad

El análisis de las respuestas ecofisiológicas de las microalgas marinas, su capacidad fotosintética o su crecimiento, a los cambios en el océano asociados al incremento de CO_2 y al Calentamiento Global no arroja información clara sobre las mismas (Beardall y Raven 2004). Sin embargo, el conjunto de consecuencias de tales efectos en la naturaleza probablemente reflejen las interacciones complejas que pueden ocurrir entre los elementos del cambio climático y otros factores asociados, como la disponibilidad de nutrientes. El previsible incremento del periodo de estratificación (Richardson y Schoeman 2004), o el cambio en procesos de mesoescala (afloramientos, frentes, corrientes costeras) pueden modificar de manera significativa la capacidad productiva del océano, disminuyendo o incrementando la

producción primaria. Este efecto podría extenderse a la producción de ecosistemas costeros, comunidades de macroalgas o de praderas de fanerógamas, aunque pueden generarse procesos en sentido opuesto. Un aumento en la presión parcial de CO_2 en la atmósfera y en las aguas superficiales podría derivar en un aumento de la productividad de las praderas de fanerógamas o comunidades de macroalgas marinas, al estar limitadas por la disponibilidad de CO_2.

El cambio en la productividad marina afectaría directamente a la disponibilidad de alimento para los consumidores y secundariamente a toda la red trófica marina. Algunos cultivos extensivos de organismos filtradores, mejillón, almeja, podrían encontrarse entre los afectados; también estarían afectados otros organismos de gran interés económico como el percebe. Si se produjera como resultado del cambio climático un cambio en la intensidad y frecuencia del oleaje se podrían ver afectadas a poblaciones de la zona intermareal, algunas de las cuales puede tener interés comercial (Borja *et al.* 2004).

4.3.2. Impacto sobre la distribución de las especies

Asociado a los cambios en las propiedades termohalinas en el océano, y a los cambios en otros procesos asociados, es esperable el cambio de distribución de muchas especies, tanto de especies pelágicas como bentónicas. El incremento de la temperatura tendrá un efecto directo, el desplazamiento de los límites geográficos de muchas especies (Southward y Boalch 1994, Southward *et al.* 1995, Alcock 2003). La velocidad del cambio podría acelerarse o retardarse de acuerdo al efecto que sobre las corrientes o la estacionalidad tengan los cambios en la atmósfera. No todos las cambios serán negativos, como por ejemplo la reducción de la producción de las especies, ni se darán en todos los lugares de la costa. Son posibles incrementos de algunas especies, aunque no exista un análisis de las tendencias que serían esperables de acuerdo a los modelos de cambio climático.

Este desplazamiento afectará a la mayoría de los grupos de organismos, tanto vegetales como animales, generando la aparición de especies de origen meridional, o la desaparición de especies de origen septentrional. Como efecto asociado, no se puede descartar la existencia de interacciones entre las nuevas y las antiguas especies, relaciones biológicas, que generen efectos indirectos no dependientes directamente del cambio ambiental. Entre las especies que pueden verse afectadas se encuentran especies anadromas (reproducción en el río y crecimiento en el mar), salmón y esturión o catadromas (reproducción en el mar y crecimiento en el río) anguila. Previsiblemente, también se producirán cambios en la distribución geográfica de especies costeras explotadas, o asociado al cambio en la distribución modificaciones en la abundancia de sus poblaciones.

4.3.3. Impacto sobre las poblaciones de peces. Reclutamiento y distribución

En el ciclo de vida de las especies marinas explotadas el reclutamiento es un proceso clave, que está influenciado directamente por la variabilidad climática. Variaciones en la circulación atmosférica repercuten en las corrientes marinas y éstas pueden modificar el transporte y supervivencia de los estadios larvarios y juveniles. A mayor escala pueden introducir cambios en la cadena trófica. Indirectamente, los cambios climáticos también afectan a los sistemas marinos. La producción marina, primaria y secundaria, puede verse afectada y con ello los alimentos disponibles para las larvas de peces, lo que determinará el grado de éxito del reclutamiento, y a medio plazo el tamaño de las poblaciones (GLOBEC 2003, ICES 2003). Entre los cambios se han descrito reorganizaciones en los regímenes de circulación (shift), a veces muy rápidos (Hare y Mantua 2002, Chavez *et al.* 2003). Que generan cambios en la comunidad pelágica, e incluso en la bentónica. Como ejemplo, Chavez *et al.* (2003) los denominan régimen de sardina y régimen de anchoa.

Otro tipo de cambios se relaciona con modificaciones de baja frecuencia, como la Oscilación del Atlántico Norte (índice NAO). Se han descrito impactos en el crecimiento y reclutamiento de poblaciones comerciales de peces pelágicos y de fondo en el Atlántico Noreste (Drinkwater *et al.* 2003). Se ha indicado que la variación climática (representada por fases positivas y negativas del índice NAO) gobierna la alternancia de períodos de alta y baja abundancia de arenque y sardina en el Noreste Atlántico. El índice NAO positivo se ha incrementado en las últimas décadas, por lo que parece probable que existan cambios asociados en el futuro. Asociado a la NAO se encuentran los descargas fluviales que presentan relación con el reclutamiento de especies en el Mediterráneo (Lloret *et al.* 2001, Lloret y Lleonart 2002). También los sistemas de afloramiento, en los que la producción de peces pelágicos está controlada por procesos de enriquecimiento de nutrientes, concentración de alimentos y retención larvaria (Bakun 1996).

También se pueden producir cambios en las especies como respuesta fisiológica a los cambios térmicos o salinos. Como ejemplo, se han sugerido cambios probables en el límite de distribución de especies de peces anadromos, dado que el cambio térmico puede influir en la síntesis proteica.

Indirectamente, se pueden ver alterados los patrones de migración y distribución espacial de ciertos peces pelágicos oceánicos (atún rojo, atún blanco entre otros muchos) mediante cambios inducidos en la distribución y abundancia de presas. La pesquería española de atún blanco en el Atlántico es estacional y se desarrolla durante la migración de alimentación que esta especie realiza desde aguas de Madeira y Azores hasta el oeste europeo y Golfo de Vizcaya. El avance del frente de migración está relacionado con el aumento gradual de la temperatura superficial. Modificaciones sustanciales en la distribución estacional de las isotermas, podrían afectar las rutas migratorias y secundariamente la pesquería en el Golfo de Vizcaya. Por el contrario, es posible la presencia de especies de origen subtropical en aguas de la Península Ibérica (en Canarias ya estaban presentes). Algunas de estas especies son objeto de pesca deportiva, por lo que pueden afectar indirectamente al turismo de costa.

Aunque está menos estudiado, muchos de los efectos citados pueden afectar a poblaciones de especies demersales o bentónicas, en incluso a poblaciones de aguas muy profundas, como las poblaciones típicas de cañones. El transporte de materiales desde las capas productivas del océano hasta zonas profundas puede ser muy rápido. Sin embargo, el efecto indirecto que el cambio climático puede generar sobre las poblaciones demersales explotadas no está bien explorado.

4.3.4. Impacto sobre los cultivos marinos

Los cambios predecibles sobre la productividad marina son inciertos. Aun reconociendo la existencia de cambios de productividad del fitoplancton asociados a modificaciones hidrográficas (Richardson y Schoeman 2004), las predicción sobre su efecto sobre los cultivos marinos posee bastantes incertidumbres. Los cultivos de especies que aporten suplementos de alimento deberán verse poco afectadas, puesto que modificaciones en la ración serían suficientes para compensar cambios en la productividad. Otra cuestión es si el cambio ambiental supera los límites fisiológicos de las especies (oxígeno disuelto, temperatura, salinidad), en cuyo caso pueden producirse severos daños. Las especies que se cultivan sin suplemento alimentario y de una manera extensiva pueden verse afectadas. En este caso se encontrarían los moluscos: mejillón, almejas, ostras y vieiras en las Rías Gallegas, el delta del Ebro y otros lugares de la costa.

Un efecto potencial sobre los cultivos lo pueden tener eventos climáticos extremos. La existencia de aportes de agua dulce intensos y continuados en zonas confinadas, las Rías

Gallegas por ejemplo, puede producir descensos de salinidad, y provocar mortalidades masivas de organismos del bentos, incluidos los moluscos de parques de fondo o de mejilloneras.

Efectos potencialmente graves en los ecosistemas costeros, que pueden ir asociados a la modificación de las condiciones hidrográficas, pero también al incremento del vertido de nutrientes por las aguas continentales, son las proliferaciones de algas tóxicas. Entre estos efectos deben tenerse en cuenta cambios en la estequiometría de los nutrientes disueltos, pues un aumento en la relación N/Si favorece la proliferación de dinoflagelados sobre diatomeas y una disminución en N/P aumenta la toxicidad de algunas especies. El efecto de estas proliferaciones puede afectar a algunos sectores como la acuicultura de moluscos, y también tener consecuencias sobre la salud humana.

El aumento de parásitos en cultivos de almeja y ostra puede ser otra consecuencia importante del cambio climático sobre los cultivos marinos. La reciente detección del parásito de almejas y ostras *Perkinsus* en las costas gallegas, posiblemente introducido por el cultivo de almeja y ostra japonesas, se ve favorecida por temperaturas superiores a los 20 ºC. Incrementos térmico estivales podrían facilitar su expansión y los daños provocados por estos parásitos.

4.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

4.4.1. Vulnerabilidad y Sensibilidad de los ecosistemas marinos y la pesca (especies y alternativas).

La vulnerabilidad de los ecosistemas marinos a los múltiples cambios simultáneos que se derivan del cambio climático son grandes, afectando sobre todo a los ecosistemas costeros o someros. El aumento del nivel del mar puede hacer vulnerables a las comunidades de fanerógamas marinas que viven enraizadas en los fondos situados entre 0.5 m y 45 m de profundidad, causando erosión submarina y pérdidas o aumentos de hábitat según los casos.

Los cambios en la temperatura del agua de mar pueden hacer vulnerables a muchas especies cuyos límites térmicos provocan, como ya se ha comentado, cambios en los rangos biogeográficos de las especies, con una tendencia a la proliferación de especies subtropicales y convirtiendo en vulnerables a especies septentrionales de nuestras costas. Estos cambios en la distribución de especies afectan no sólo a la aparición de especies de afinidad subtropical, sino también a un incremento del riesgo de invasión por especies exóticas de origen subtropical introducidas de forma accidental. Sirva de ejemplo la presencia, en Canarias, de la especie australiana *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Verlaque *et al.* 2003). Además, la temperatura del agua de mar afecta a los ciclos de vida de las especies presentes en nuestra costa, y sobre todo, a la intensidad y estacionalidad de la reproducción sexual. Las variaciones en el reclutamiento que se deriven de estos cambios generarán cambios en los balances demográficos de las especies implicadas, originando modificaciones en la composición de las comunidades. Otra causa de vulnerabilidad para muchas especies o ecosistemas es el incremento del gasto respiratorio, sensible al aumento de la temperatura, que conducirá a un incremento del consumo de oxígeno, y de producción de CO_2 en los ecosistemas marinos, y particularmente en la actividad microbiana.

El aumento sostenido de la presión parcial de CO_2 al ajustarse con la presión parcial creciente en la atmósfera, está causando una acidificación del agua de mar, reflejada en una disminución detectable del pH del agua de mar (Caldeira y Wickett 2003). Se prevé que esta disminución será suficiente, dentro de los próximos 50 años, como para reducir de forma sensible, incluso detener, la deposición de carbonatos en organismos con esqueletos o conchas calcificadas, como moluscos bivalvos, corales formadores de arrecifes, cocolitofórídos entre otros. Este hecho los convierte en vulnerables. A más largo plazo, para las concentraciones de CO_2 esperadas a finales del siglo XXI, la disminución del pH será suficientemente intensa como

para iniciar la disolución de carbonatos en las aguas costera lo que afectaría a la absorción de CO_2 por el océano.

Las variaciones en los patrones de corrientes y circulación oceánica derivados de los cambios en la distribución de masas de aguas y régimen de vientos generados por el cambio climático afectan, sin duda, al reclutamiento de todas las especies que dependen de estas corrientes para situar sus propágulos en zonas favorables al crecimiento y supervivencia de los reclutas. La vulnerabilidad que estos efectos provocaran en el reclutamiento son difíciles de predecir, ya que los patrones de corrientes resultantes del cambio climático están sujetos a fuertes incertidumbres, particularmente a escala local.

Las presiones derivadas del cambio climático no tienen lugar de forma aislada respecto a la presión directa de la actividad humana sobre los ecosistemas. Las respuestas de los ecosistemas y los organismos a estas presiones simultáneas no son necesariamente acumulativas, pudiéndose desencadenar respuestas sinérgicas que magnifican los efectos del cambio climático en relación a los que tendrían lugar en ecosistemas no sometidos a presiones adicionales. Por todo ello, la predicción de las consecuencias del cambio climático sobre los ecosistemas marinos no se puede derivar de forma directa como la suma de las respuestas de cada una de las dimensiones del cambio climático.

Las presiones adicionales que concurren con las generadas directamente por el cambio climático en nuestro país son (1) el incremento de vertidos de nutrientes y materia orgánica a la costa, (2) la depauperación de los stocks pesqueros, (3) la degradación de los fondos marinos por las actividades de arrastre y fondeo de embarcaciones, (4) la destrucción y afección del habitat por la urbanización de la zona costera y proliferación de estructuras y construcciones sobre la línea de costa, y (5) el aumento del riesgo de episodios contaminantes asociados al incremento del transporte marino derivado de la globalización de la economía.

Los ecosistemas más vulnerables son, por tanto, aquéllos donde concurren todas estas presiones, y, dentro de éstos, los que están conformados por organismos más longevos y de crecimiento más lento, como son los corales rojos del Mediterráneo y los corales negros de Canarias; los campos de algas de cierta profundidad, marismas y praderas de *Posidonia oceánica* del Mediterráneo*,* las praderas de *Cymodocea nodosa* y poblaciones de *Zostera noltii* de Canarias*,* y las praderas de *Z. noltii y Z. marina* de la costa atlántica Ibérica, y las praderas de algas pardas del conjunto de las costas españolas.

Resulta particularmente complicado definir que especies serán las mas vulnerables. Se pueden aplicar criterios generales como longitud del ciclo de vida, especies ligados a ecosistemas vulnerables, especies especialistas, pero el grado de indefinición respecto a las modificaciones generadas por el cambio climático siempre serán grandes.

4.4.2. Análisis de la vulnerabilidad de las pesquerías costeras y lejanas

Un aspecto que no puede olvidarse en las pesquerías es que parte de la reducción de las capturas observadas pueden ser debidos a sobreexplotación, y que por ello deben considerarse dentro de un marco superior, el Cambio Global. Pero no se puede descartar una interacción entre el incremento de la capacidad extractiva y modificaciones en el medio generados por el cambio climático que influyan sobre la vida de especies objeto de explotación (Francis y Sibley 1991). Sin tener datos definitivos, es posible que la pérdida de algunos caladeros tradicionales tengan este origen.

A excepción de las especies con capturas muy fluctuantes (anchoveta, jurel chileno, sardina americana y japonesa, y abadejo de Alaska), existe desde 1980 una sobrepesca global de la

mayoría de las especies comerciales. Se estima que se precisarán elevados subsidios para mantener la flota pesquera mundial que opera con una sobrecapacidad de 30-50%. El estado actual de las pesquerías muestra una capacidad de incremento muy limitada (fig. 4.4A), dado que la mayor parte de los stocks mundiales se encuentra a su máxima

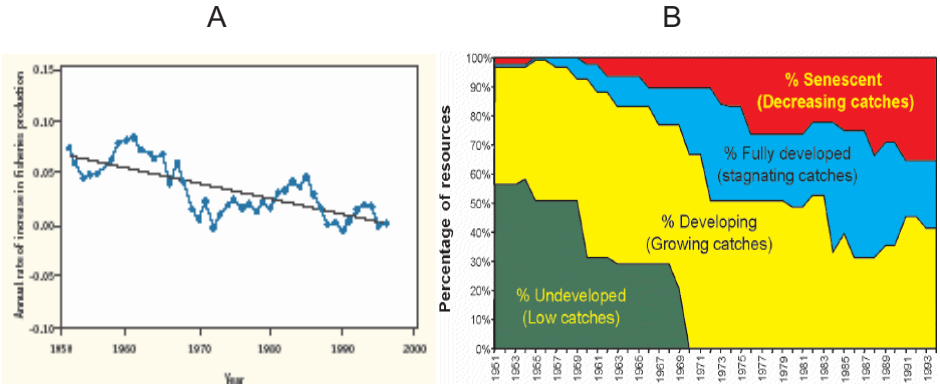


Fig. 4.4. *Tendencias Globales en las pesquerías mundiales, A: Tasa anual de incremento de la producción pesquera. B: Proporción de stocks que están explotados a su máxima capacidad o sobre explotados (FAO 2000).*

capacidad de explotación (FAO 2000) (fig 4.4B). Sin embargo es evidente la sobreexplotación de algunos recursos, como es el caso de los peces predadores en todo el mundo (Myers y Worm 2003), incluido el Atlántico templado y tropical.

La sobrepesca de adultos puede provocar cambios evolutivos en la edad de maduración, y esto secundariamente al hundimiento de los stocks (Olsen *et al.* 2004). En todo caso, la interacción entre sobrepesca de adultos, cambios evolutivos y cambios en el reclutamiento generado por modificaciones en circulación de mesoescala pueden provocar el colapso de las poblaciones de especies actualmente explotadas, o producir beneficios para otras especies. Se puede especular que serán las especies de ciclo de vida largo y baja tasa reproductiva, es decir baja tasa de crecimiento poblacional las que pueden verse más afectadas. En este caso se encontrarían los tiburones, pero también pueden encontrarse en la misma situación los túnidos. Los efectos del cambio climático sobre el reclutamiento, ya mencionados, puede ser una causa del declive de algunas especies o sobre su accesibilidad en los lugares tradicionales (Beare *et al.* 2004).

4.4.3. Análisis de la vulnerabilidad de organismos clave en el medio marino

Las especies clave son aquellas que organizan o estructuran los ecosistemas. Las especies arquitectas que por su morfología o desarrollo crean ambientes nuevos que pueden ser utilizados por otras especies, o las especies que por sus relaciones interespecificas tienen la capacidad de alterar las redes tróficas en las que se engloban, se encontrarían entre ellas.

Las especies de fanerógamas marinas, que constituyen praderas, son uno de los casos significativos de especies clave en las costas españolas. El papel que desempeñan se extiende desde la fijación de sedimentos y la protección del litoral frente al oleaje y los temporales a la provisión de hábitat para sustentar el reclutamiento de un gran número de especies de vertebrados e invertebrados. Las praderas de fanerógamas marinas están sufriendo un declive acusado en el litoral español y en todo el mundo; la tasa de pérdida global es del 2 % anual. El ritmo de pérdida de las praderas de *P. oceanica* en el Mediterráneo es aún mayor, con una tasa promedio de pérdida cercana al 10 % anual en la costa de la Península, y algo inferior (3%

anual) en las costas de las islas Baleares. La pradera de *Zostera noltii* localizadas en las islas Canarias también se encuentra en regresión. A mediados de la década de los noventa la pradera quedó restringida a escasos ejemplares, estando incluida en el Cátalogo de especies amenazadas de Canarias (BOCA 23 julio 2991, Decreto 151/2001) con la categoría de "En peligro de Extinción".

Esta pérdida de superficie refleja aspectos derivados del cambio climático, como la tendencia generalizada a la erosión submarina que se deriva del incremento del nivel del mar, y que descalza los rizomas de estas plantas, aumentando su vulnerabilidad a temporales y oleaje intenso. La degradación de praderas de *P. oceanic*a también se ha asociado a la proliferación de especies de macroalgas invasoras de origen subtropical *Caulerpa taxifolia*, introducida accidentalmente en el Mediterráneo, y *Caulerpa racemosa*, introducida a través del Canal de Suez que ya alcanzó las costas de Baleares hace algunos años, y recientemente ha sido localizada en Canarias (Verlaque *et al.* 2003), donde está asociada a las praderas de *Cymodocea nodosa*, taxón con categoría de "Sensible a la alteración de su hábitat" y *Halophila decipens,* con categoría de "interés especial", Cátalogo de especies amenazadas de Canarias. Aunque la introducción de estas especies no se puede considerar derivada del cambio climático, se ha propuesto que el aumento de temperatura del mar puede, al tratarse de especies de origen subtropical, favorecer su capacidad de excluir a la flora autóctona, particularmente las praderas de *P. oceanica* (Mediterráneo) y *C. nodosa y H. decipiens* (Canarias).

Sin embargo, debe hacerse notar que en la pérdida de la superficie de estos ecosistemas intervienen otras causas relacionadas con la actividad humana: deterioro de la calidad del agua debido al aumento de los vertidos desde tierra, proliferación de construcciones en la línea de costa que inducen la erosión submarina, e impactos directos por anclas y artes de arrastre.

Mientras que el tiempo de recolonización de las praderas de las especies de angiospermas marinas del Atlántico es de aproximadamente una década, la recuperación de las praderas de *Z. noltii* y *P. oceanica*, fanerógamas marinas de crecimiento más lento, conlleva períodos de tiempo estimados en varios siglos, por lo que se han de considerar como irreversibles a fines de gestión de los ecosistemas costeros. La pérdida de *P. oceanica* praderas conlleva la pérdida de las especies que alberga, alguna protegida como la nacra (*Pinna nobilis*), un bivalvo que alcanza hasta 1 m de longitud en el Mediterráneo o en las praderas canarias de *Z. noltii*, especies de fauna protegida que encuentran su hábitat en estas praderas.

Aunque se desconoce el efecto a largo plazo del cambio climático sobre *P. oceanica*, algunos datos recientes permiten suponer que no existan mecanismos que permitan reducir a corto plazo las fuertes pérdidas que está experimentando. Existen evidencias recientes de cambios en su floración y la producción de frutos y semillas. La recopilación y reconstrucción de la floración de *P.* entre la dos episodios de aumento de la floración en dos años con elevadas temperaturas en el Mar Mediterráneo: en el año 2001, tras un verano en el que se alcanzaron temperaturas del agua de mar por encima de lo normal, que no llegó a culminar en producción de semillas, y en el año 2003, en el que se registraron las temperaturas máximas más elevadas en el agua superficial, que dio lugar a una producción y liberación masiva de frutos y semillas que están arraigando en el fondo marino en el verano de 2004. Si se extrapola esta relación para estimar el efecto del calentamiento de entre 1 y 4 ºC esperado hacia el año 2050 indica que la prevalencia de la floración debe aumentar entre un 10% y un 40%. Este aumento de la reproducción sexual podría mejorar la capacidad de recolonización de la especie, aunque nunca sería suficiente para compensar las pérdidas.

Otras comunidades de macrófitos marinos se encuentran también en regresión, aunque el papel que pueda jugar el clima en esta regresión no está claramente establecido; tal es el caso

de praderas del alga parda del género *Cystoseira* en Canarias, como se ha puesto de manifiesto de manera reiterada en informes y proyectos.[1]

4.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

4.5.1. Alternativas en especies explotadas, en estructuras pesqueras, explotación de especies de otras áreas, compensación con precio del producto, Estrategias de actuación en pesquerías

La capacidad de carga de los distintos stocks podrá ir modificándose paulatinamente conforme se produzcan cambios en los ecosistemas. Modificaciones (aumentos o reducciones en la tasa de reproducción) van a implicar estrategias adaptativas de explotación. La modificación en la tasa de reproducción determinará modificaciones en la biomasa de los stocks a las que tendrán que ajustarse el esfuerzo de pesca. Esto se complica en el caso de pesquerías multiespecies y multiartes como las de la Región Ibérica Atlántica y Canarias. Sin embargo, no se han realizado simulaciones de posibles escenarios. Si por efecto del cambio climático el tamaño de un stock decrece con el tiempo, las capturas totales anuales disminuirán y la tendencia será que la pesquería disminuya a largo plazo.

Los problemas derivados de una reducción de los stocks pueden quedar enmascarados por un aumento de los precios y beneficios de los pescadores. Económicamente y a largo plazo, los cambios pueden ser marginales. Si el sector pesquero busca el máximo rendimiento económico, los artes que explotan las clases de edad más viejas (peces de mayor tamaño, más rentables) podrían desplazar o eliminar la actividad de otras artes dirigidas a tamaños más reducidos. Otros posibles casos que podrían suceder son una reducción drástica de la capacidad de carga y colapso de los stocks que provocarían una reducción significativa de la actividad pesquera, que los cambios en la capacidad reproductiva sean marginales y no afecten a la explotación pesquera, que se produzca un incremento de los stoks ya explotados, o que aparezcan especies explotables que antes no existían. En estos últimos casos la adaptación de las flotas o los artes sería mucho más sencilla.

Un cambio similar al de la reducción de stocks se da cuando algunas especies modifican las rutas o la estacionalidad de su migración (Beare *et al.* 2004), y las flotas que las explotan no pueden acceder al stock en esa nueva situación. Los mecanismos de adaptación serían similares a los producidos por cambios en la tasa de reproducción. La planificación de la actividad de las flotas exigiría el conocimiento de las nuevas rutas y las causas de su variación, y probablemente incidiría en nuevas actuaciones en las relaciones europeas o internacionales.

Si el objetivo es la gestión sostenible de la pesquería (Pauly *et al.* 2003) sugieren dos tipos de consideraciones. Ambientales, que implicarían la regulación de subsidios para evitar la sobrepesca, lo que, a su vez, exigiría una reducción de las flotas. De seguridad alimentaria, que implicaría el descubrimiento de nuevas pesquerías o uso alternativo de las ya existentes, con el problema de que se pueden afectar a terceros países pobres, o trasladar daños ambientales a sus costas. Pero se pueden pensar en alternativas que mezclen ambos principios, promoviendo la equidad social y la regulación ambiental. En todo caso implicarían cambios en los sistemas de regulación de las pescas y acuerdos entre las partes interesadas.

---

[1] Realización cuantitativa de las comunidades marinas y valoración de la Biodiversidad del sector de la costa del Palm-Mar"; "Realización de cartografía bionómica del borde litoral de Tenerife (1ª parte:Teno-Rasca)"; Realización de un inventario de las especies que habitan los arrecifes y cuevas submarinas de Canarias"; "Estudio de la biología y ecología del erizo Diadema antillarum y de las comunidades de sucesión en diferentes zonas de blanquizal del Archipiélago. Canario";"Realización de cartografía bionómica del borde litoral de Tenerife (2ª parte: Punta Negra- Roques de Fasnia)".

El establecimiento de áreas de protección, en las que se anule la extracción, o que esta se encuentre limitada, que actúen de forma sinérgica con áreas explotadas y, por tanto, mitiguen los efectos poblacionales de la extracción o del cambio ambiental, es una estrategia que debe consolidarse (Castilla 2003). Se favorecería, así, la sostenibilidad de un ecosistema funcional y diverso, en el que las especies recursos desarrollan su ciclo vital (Pauly 2002). Se está avanzando en esta visión holística de las pesquerías, considerando los cambios en el ecosistema en el que las poblaciones explotadas se encuentran (Bostford *et al.* 1997), y las influencias antropogénicas (cambios físicos del océano resultado del cambio climático, destrucción de habitats, contaminación, "bloom" de algas nocivas).

4.5.2. Estrategias adaptativas en cultivos marinos

La puesta a punto de nuevos cultivos, tanto de animales como de vegetales, puede ser una respuesta adaptativa a los cambios del medio. Pero hay que tomar en consideración los peligros que la introducción de especies foráneas cultivables puede tener sobre las poblaciones autóctonas y sobre el ecosistema que las soporta. El control parasitológico de la introducción de especies cultivables debe ser una prioridad. Especies de parásitos introducidas con algunos cultivos pueden producir daños sobre los ya existentes, sobre todo si incrementan su respuesta con el aumento térmico. Siempre se debe aplicar el principio de precaución para evitar que las especies introducidas escapen a los controles establecidos y se establezcan como especies invasoras.

Establecer la capacidad de carga sostenible de los ecosistemas en los que se implantan los cultivos y las influencias que pueden provocar en el medio puede ser una medida adaptativa básica para lograr una producción sostenible. Una predicción meteorológica y del medio costero que avise con suficiente antelación y precisión de la posibilidad de eventos climáticos extremos (lluvias torrenciales que reduzcan la salinidad del medio, unido a la existencia de protocolos de respuesta permitiría limitar los daños.

4.5.3. Estrategias de preservación de especies clave

La preservación de especies parece una necesidad ineludible, dada la influencia que tiene la biodiversidad sobre la capacidad de resistencia y amortiguación de los ecosistemas a cambios generados por presiones ambientales externas. La preservación de especies clave juega, en este sentido, un papel trascendente dada su capacidad para influir en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas.

Aunque el número de ecosistemas estudiados desde un punto de vista funcional en las costas españolas sea reducido y por ello no estén bien establecidas, la reducción de la presión sobre las mismas parece la mejor decisión adaptativa. Además de la influencia del cambio ambiental, habrá de considerarse la protección de espacios donde estas especies estén a salvo de la presión humana, explotación o turísticas y lúdicas, o la urbanización y crecimiento poblacional en áreas costeras. La definición de una red de Áreas Marinas Protegidas (AMP) en las aguas de Actividad Económica Exclusiva que tenga en cuenta estos criterios, mas los de complementariedad y singularidad puede ayudar a su conservación y sostenibilidad (Palumbi 2001, Castilla 2003).

4.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

La existencia de un incremento en las floraciones de algas nocivas, pero también de organismos animales urticantes, medusas, sifonóforos, durante los meses cálidos, en parte al menos, relacionada con el incremento de la temperatura del agua y de nutrientes inorgánicos, puede provocar molestias y trastornos al sector turístico. Se han detectado incrementos de floraciones de dinoflagelados tóxicos en calas de la costa catalana y de las Canarias, de

medusas en el Mar Menor. Es posible que en el futuro este tipo de citaciones se incremente. No se pueden estimar los efectos sobre el turismo pero parece lógico pensar que actuaría como un factor represor de la demanda. Incrementar nuestro conocimiento de las causas que lo producen, y corregirlas si es posible, sería la mejor opción adaptativa.

La calidad de las aguas en zonas turísticas o productivas pueden ser afectada por vertidos de origen urbano o industrial, no directamente relacionados con el cambio de clima. Cambios en la circulación local generada por éste pueden alterar la situación actual. La mejor acción adaptativa es conocer y corregir las emisiones.

4.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

4.7.1. Relaciones entre calentamiento de mar y su papel como sumidero de carbono

Para escalas de tiempo inferiores a 1000 años el océano es el principal depósito del dióxido de carbono. El CO_2 atmosférico de origen natural y el producido por la quema de combustibles fósiles son una pequeña fracción del que se encuentra en el mar y los sedimentos. Aproximadamente el 35% de las emisiones antropogénicas de CO_2 en los últimos 100 años ha sido absorbida por el mar. Ajustes relativamente pequeños en la circulación oceánica podrían afectar significativamente la cantidad de CO_2 en la atmósfera, incluso si se llegaran a estabilizar las emisiones de origen antropogénico. Si se incrementa la estratificación en los océanos, no habría convección de aguas y se reduciría la mezclo profunda. El CO_2 no sería transferido a las capas profundas del océano limitando su capacidad de almacenamiento.

Otro factor negativo sería el cambio en el pH provocado por la disolución del propio CO_2; puede desplazar el equilibrio CO_2 – bicarbonato limitando la capacidad de almacenamiento de CO_2 en el océano (Feely *et al.* 2004). Efectos asociados a la reducción del pH del agua serían: 1) la reducción de la calcificación en organismos con esqueletos carbonatados, que limitaría la retirada a largo término (sumidero) del carbono disuelto, y 2) la potencial elevación de la lisoclina (profundidad límite a la que se disuelven los carbonatos), lo que podría favorecer la disolución de carbonatos acumulados en el sedimento; en caso extremo, pero no desechable, se encontraría la elevación de la lisoclina a la superficie, lo que provocaría una emisión rápida e importante de CO_2 en la atmósfera, y el incremento del efecto invernadero.

Aunque no están cuantificados en la actualidad, cambios positivos en el almacenamiento biogénico del carbón aumentarían la absorción de CO_2 y disminuiría el efecto invernadero.

4.7.2. Cambios estacionales de vientos y reclutamiento

Ya se ha comentado el efecto descrito de los cambios en la NAO y el reclutamiento, ya sea por una relación directa (efecto sobre el transporta larvario) o indirecta (interacción con la comunidad de presas).

4.7.3. Elevación del nivel de mar y comunidades litorales

Las tasas detectadas de elevación del nivel del mar son lo bastante lentas como para que la mayoría de las especies desplacen significativamente su distribución. En las costas rocosas implicaría la colonización de superficies más elevadas, En las costas sedimentarias expuestas, si se produce una reordenación de los sedimentos, no se esperarían cambios muy apreciables en las comunidades, excepto en aquellas en las que pueda suponer erosión (ver caso de *P. oceanica*). Posiblemente las zonas más afectadas serían las correspondientes a estuarios o lagunas costeras. La imposibilidad de recolocación de los depósitos sedimentarios puede

producir la desaparición de algunos ambientes, o la modificación por salinización de otros. En estas condiciones es fácil que algunas comunidades vean restringida su área de distribución. Entre los organismos afectados pueden encontrarse las aves.

4.7.4. Interacciones entre extracción pesquera y cambio climático

Los cambios y tenencias de la captura pesquera parecen ligados a un incremento previo del esfuerzo pesquero, tanto por capacidad tecnológica, como por el incremento de las flotas de muchos países. Se puede considerar por tanto que son resultado del Cambio Global, más que generados por modificaciones climáticas. A pesar de ello, cada vez existen mas evidencias que, al menos durante las fases larvarias, cambios en la circulación costera, las condiciones termohalinas, la productividad y la disponibilidad de presas pueden ser responsables de las tendencias observadas.

El problema se agudiza cuando se trata de pesquerías multiespecífica. A las respuestas de cada especie hay que añadir la existencia de interacciones entre diferentes especies, no bien conocidas en la actualidad. Es necesario profundizar en el concepto de ecosistema pesquero (Large Marine Ecosystem) (Sherman *et al.* 1992), y adquirir información que nos permita tener una visión más completa de los efectos sinérgicos entre explotación, cambio climático e interacciones de especies.

4.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

4.8.1. Series temporales de *variables oceanográficas*

Existe información diversa sobre variabilidad relacionada con el cambio climático en la cuenca del Atlántico Norte. Los análisis a partir de las observaciones de temperatura hechas en el s. XX del contenido calórico de la capa superior de agua (Levitus *et al.* 2000, Levitus *et al.* 2001), de su origen o de las propiedades termohalinas del Atlántico (Curry *et al.* 2003) son un buen ejemplo. También el estudio de series de datos en puntos clave refuerzan la idea de un cambio en las condiciones oceánicas, como la disminución de la salinidad en el agua ártica de fondo (Dickson *et al.* 2002).

La detección de los cambios de temperatura y salinidad se basan en la existencia de bases de datos con periodos temporales prolongados. La extensión de las series de datos condiciona estos estudios y la capacidad predictiva sobre su variación futura. Pero tambén influye la variabilidad de la circulación y os cambios que pueda provocar el propio cambio de clima, ya que ambos mecanismos pueden provocar la advección de aguas de distintas zonas.

Utilizando como referencia la serie de COADS (1844-2000) de la temperatura superficial del Golfo de Vizcaya, puede apreciarse algunas oscilaciones en el último siglo. A un incremento térmico en superficie desde 1900 hasta 1960, siguió un descenso hasta 1980. Desde ese momento el incremento ha sido continuado y acelerado hasta nuestro días ((Southward y Boalch 1994, Planque *et al.* 2003). Es en este marco en el que deben interpretarse los valores de incremento detectados en nuestras costas en años recientes y que figuran en la tabla 4.1. En resumen, existe una información muy consistente de incremento térmico en aguas superficiales alrededor de la Península Ibérica, en torno a 0’4 - 0’5 ºC por década. También se detectan cambios en aguas intermedias y profundas, lo que concuerda con los resultados obtenidos en estudios que cubren un rango geográfico mayor.

Tabla 4.1. *Tasa de incremento de la temperatura (ºC por década) y la salinidad en puntos próximos a las costas españolas, con indicación de la longitud de la serie analizada, la situación y profundidad y la referencia.*

Lugar	Situación	Longitud de la serie (años)	Profundidad (m)	Tasa de (ºC década)	incremento (psu década)	Autor
Golfo Vizcaya	Canal de la Mancha	1860-1990	Superficie	0.06		(Southward y Boalch 1994)
Golfo Vizcaya	Océano	1870-1990 1970-1999	Superficie Superficie	0.13 0.6		(Planque *et al.* 2003)
Golfo de Vizcaya	Océano	1972-1993	Superficie	0.66		(Koutsikopoulos *et al.* 1998)
Donostia	Costa	1947-1997	Superficie	-0.062		(Borja *et al.* 2000)
Santander	Océano	1992-2002	10	0.60	0.04	(González-Pola *et al.* 2003)
		1992-2002	200	0.54	0.084	(Cabanas *et al.* 2003a)
		1994-2003	900-1000	0.1	0.06	(González-Pola *et al.* 2003)
Asturias	Costa	1993-2003	10	0.43	sin tendencia	(Llope *et al.* 2004)
	Océano	1993-2003	10	0.16		(Llope y Anadón 2002)
La Coruña	Costa	1990-2003	10	0.53		
Vigo	Costa	1994-2000	200	0.28		(Cabanas *et al.* 2003a)
Murcia		1996-2001	200	**	0.54	(Vargas-Yáñez *et al.* 2002a)
Malaga	Costa Costa	1992-2001 1914-2001	10 200	0.2 0.2		(Vargas-Yáñez *et al.* 2002b)
Baleares	Costa	1994-2001	200	0.2	**	(Vargas-Yáñez *et al.* 2002a)
Gerona	Plataforma	1974-2001	3 80	0.4 0.25		(Salat y Pascual 2002)
Mediterráneo	Océano	1959-1989	2000	0.04	0.01	(Bethoux *et al.* 1990)
Atlántico subtropical (24,5 N)	Océano Océano	1957-1993 2001-1993	800 100 400	0.09 0.57 0.4	 0.07	(Parrilla *et al.* 1994) (Vargas-Yánez *et al.* 2004)

Las previsiones futuras permiten hablar de un calentamiento del agua superficial en un rango ligeramente inferior a los cambios modelados de las temperaturas atmosféricas (ver capítulo de clima), en consonancia con un balance radiativo equilibrado entre atmósfera y océano. El incremento sería más elevado en verano y en la costa Mediterránea, en la que podría producir, dependiendo del escenario de emisiones, un incremento de 4 grados en el último terecio de siglo. Por la misma razón, es previsible un calentamiento del agua central noratlántica que baña las costas españolas (ENACW). Una visualización del incremento previsible de la temperatura superficial en el atlántico nordeste se puede ver en la figura 4.5 (Alcock 2003), generada a partir de las previsiones de incremento térmico del NOAA-CIRES hacia el año 2025.

Hay que considerar que el incremento térmico debido a la reducción de la mezcla invernal, provocado por el calentamiento superficial, podría modificar las tendencias al alza. La expansión del giro subtropical detectado (McClain *et al.* 2004) puede ser indicio de este proceso.

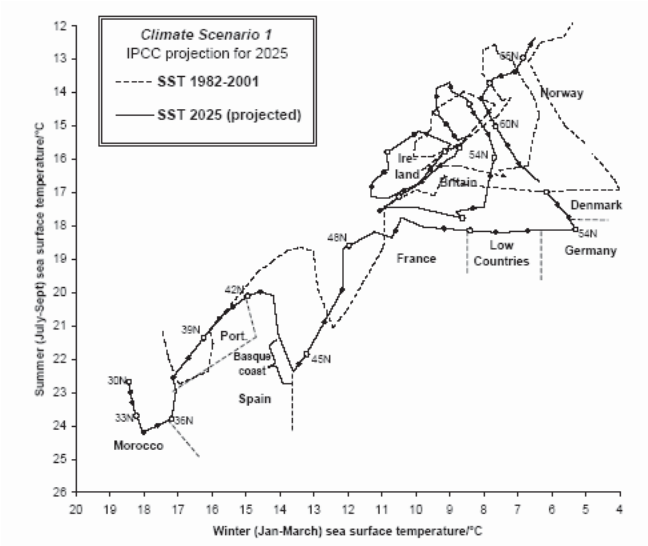


Fig. 4.5. *Proyección de la temperatura superficial del mar en la costa nordeste del Atlántico en verano e invierno (tomado de (Alcock 2003).*

Las variaciones a largo término de la salinidad son menos evidentes, debido a la elevada variabilidad interanual. Además, se dispone de un menor número de bases de datos con esta variable. La salinidad es una magnitud muy relacionada con el equilibrio evaporación-precipitación, con aportes fluviales y con la advección de agua. Como ejemplo, en el Golfo de Vizcaya y zona Atlántica adyacente, la salinidad oscila según con la presencia de agua de origen suptropical (poleward current) o subpolar en el área. Dependiendo de los equilibrios, se producen anomalías en salinidad que se van desplazando por la capa superficial de las distintas áreas atlánticas. Esta variabilidad decadal se ve reflejada en los datos superficiales de salinidad en el Atlántico en nuestras latitudes (Dickson *et al.* 1988, Hudges y Lavín 2003) y se han relacionado con forzamientos de viento (Cabanas *et al.* 2003b), constricción del giro subpolar debido a NAO negativa y NAO negativa (García-Soto *et al.* 2002).

A pesar de estas limitaciones, los datos existentes apuntan a un ligero incremento de la salinidad tanto en superficie como en profundidad (tabla 4.1). Es la tendencia detectada en el conjunto del Atlántico norte en nuestras latitudes (Curry *et al.* 2003).

La predicción sobre los cambios de salinidad es más difícil que con los de temperatura, al serlo también uno los factores que influyen, la precipitación. La distribución de los cambios de precipitación son irregulares en el espacio y a lo largo del ciclo anual, por lo que los cambios en los aportes no deben ser muy significativos. En este panorama se debería estimar la evaporación para tener una idea más clara.

4.8.2. Series temporales de nivel del mar

La determinación de los cambios en el nivel relativo del mar es una tarea compleja. A pesar de ello se tienen evidencias de un incremento del nivel del mar a escala global y sus causas (Miller y Douglas 2004), y también existen datos sobre las variaciones en puntos concretos de la costa española (Cabanas *et al.* 2003b, Miller y Douglas 2004, Marcos *et al.* enviado). El nivel del mar se ha elevado del orden de 1.5 mm por año en el último siglo. La fusión de hielo ha contribuido con unos 0,4 mm al año, la expansión termal con unos 0,8 mm por año y los movimientos terrestres el resto (Douglas *et al.* 2001). El incremento de la subida del nivel relativo del mar se

ha incrementado en las últimas décadas, estimándose que en la actualidad es de 3 mm anuales.

4.8.3. Cambio en el forzamiento climático

No se dispone de mucha información sobre los cambios de circulación y estacionalidad en las condiciones oceanográficas de las costas españolas. Las comprobaciones empíricas se derivan del análisis de las series meteorológicas, fundamentalmente de la distribución de los centros de altas y bajas presiones en el Atlántico (índice NAO), y de vientos que inciden en las corrientes costeras.

Se han producido variaciones a lo largo de los últimos 100 años en la NAO; estas han sido notorias estacionalmente con predominio de NAO invernal positivo en los últimos 25 años (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.html). Estas modificaciones se han asociado a cambios en la intensidad de la circulación costera del norte y noroeste ibérico (García-Soto *et al.* 2002), o con modificaciones en los vientos, la temperatura superficial del mar y con los aportes de agua por los ríos (Planque *et al.* 2003). Todas las modificaciones generadas por alteración de la NAO pueden alterar la circulación marina a gran escala y por ello la actividad biológica en el entorno Ibérico.

Se han detectado cambios de la intensidad y duración de los vientos en la última década del siglo XX relativos a las décadas precedentes, en particular un incremento de vientos del suroeste en la costa gallega (Cabanas *et al.* 2003b) y una disminución estival de los vientos del este y nordeste en el Cantábrico (Llope y Anadón 2002). Estos valores coinciden con el incremento de los valores de hundimiento (downwelling) tras 1997 respecto a los valores de 1958-1976 duplicarse coincidiendo con altas turbulencias (Valencia 2004). También se han detectado cambios en la estacionalidad de los vientos (Cabanas *et al.* 2003b, Llope *et al.* 2004). Todos estos cambios han traido como consecuencia una redución del afloramiento de primavera-verano en el noroeste (Lavín *et al.* 2000) y norte (Llope *et al.* 2004) de la Península Ibérica. (Lavín *et al.* 2000) calculan una reducción del afloramiento aproximadamente a la mitad entre la década de los 70 y la de los 90 del siglo pasado.

A partir de la información de los cambios barométricos previstos en el Modelo PROMES (ver Capítulo 1) se pueden prever cambios relacionados con la estacionalidad. En el último tercio de siglo se podría reforzar el gradiente de presión entre los núcleos de alta presión de Groenlandia-Islandia y de Azores en invierno. Como consecuencia se podrían incrementar los vientos del oeste y-o del norte. La respuesta del océano sería un reforzamiento de las corrientes hacia los polos que recorren la Península Ibérica, y un previsible adelantamiento en su finalización. La situación estival, en la que predominan eventos de afloramiento, los cambios serían inversos, con incrementos de presión en el norte y una reducción de presión al sur del Atlántico norte, lo que significaría la del gradiente de presión, y por tanto vientos por lo general menos fuertes. En el océano se traduciría en una reducción de la intensidad de afloramientos en la costa oeste de la Península, y también en el norte. Además, implicaría su finalización adelantada respecto a la situación actual. Si las deducciones esbozadas son correctas signifcaría la prolongación en el futuro de tendencias ya detectadas.

4.8.4. Huellas del cambio climático en señales de respuestas biológicas

Gregg *et al.* (2003), basándose en datos obtenidos desde satélite, describen un incremento medio de la clorofila en altas latitudes del Atlántico, y un ligero incremento en latitudes medias. Utilizando otra metodología y usando datos de abundancia de fitoplancton (a partir de datos de SAHFOS) (Richardson y Schoeman 2004) concluyen que la abundancia del fitoplancton está disminuyendo en las áreas del Atlántico con temperaturas medias cálidas, mientras se

incrementaría en la áreas frías; entre las áreas cálidas se encontraría el Golfo de Vizcaya y la costa gallega; posiblemente también otros mares cálidos. La información basada en series temporales, tanto del Cantábrico como del Mediterráneo, apunta en este sentido, aunque la longitud de las series disponibles es reducida y la variabilidad del fitoplancton elevada para poder sacar conclusiones definitivas.

Se han constatado cambios en la abundancia de especies de zooplancton en el norte del Golfo de Vizcaya entre 1930 y 1990 (Southward *et al.* 1995) y en las comunidades de copépodos pelágicos en el Atlántico Norte (a partir de datos de SAHFOS), incluyendo las aguas costeras del norte de la Península Ibérica (Beaugrand *et al.* 2000). Esta modificación en la composición y en el tamaño de los organismos del zooplancton ha influido en el reclutamiento de bacalao en el Mar del Norte (Beaugrand *et al.* 2003). Dada la relación positiva entre la abundancia del fitoplancton y del zooplancton herbívoro en el Atlántico norte detectada por (Richardson y Schoeman 2004), es esperable una reducción del zooplancton en las áreas de la Península ibérica citadas. Cambios en la estacionalidad de los procesos hidrográficos han influido sobre la abundancia del zooplancton en el Atlántico (Beare y McKenzie 1999), y sobre la fenología de las especies o grupos generando desajustes (*decopling*) tróficos entre los mismos (Edwards y Richardson 2004).

Los procesos de reorganización generados por el cambio climático pueden dar lugar a cambios permanentes, como se refleja en la relación entre la abundancia de *C. finmarchicus* y la NAO. Desde 1989 esta especie ha reducido su abundancia en el Atlántico norte (Fromentin y Planque 1996, GLOBEC 2003) probablemente afectadas por la reducción de las áreas de hibernación de copepoditos.

Las publicaciones dedicadas a cambios en la composición de las comunidades pelágicas en las costas españolas que tengan relación con el clima, son escasas. En el Cantábrico, Villate *et al.* (1997) detectan cambios en las abundancias de copépodos, aunque el lapso temporal estudiado es muy pequeño y Llope *et al.* (2004) observan también cambios en la abundancia de especies de copépodos. Dependiendo de las especies se puede producir un incremento o decremento continuado, o un incremento súbito de la abundancia. Respuestas semejantes se están encontrando en el Mediterráneo (Molinero 2003).

Durante el último siglo se han detectado cambios en la abundancia y en los límites de distribución de especies (ampliación y regresión) que viven en la costa asociados a cambios en el medio (Anadón 1983, Southward *et al.* 1995). Aunque hay datos recientes acerca de la aparición de macroalgas de aguas más cálidas en la cornisa cantábrica (Fernández y Rico, com per), es difícil justificar la presencia de tales especies por el cambio climático. Los cambios más apreciables se han producido por la presencia de *Sargassum muticum* en algunas comunidades dominadas por macroalgas. Esta especie invasora ha colonizado con éxito algunas comunidades del N y NW de la Península Ibérica, generando cambios en la estructura de la comunidad receptora (Sánchez *et al.* enviado).

Alcock (2003) realiza una predicción de la distribución de algunas especies de la costa considerando los límites térmicos de las especies en la actualidad, y su proyección en los futuros escenarios térmicos (Fig. 4.5). Constata que los cambios climáticos pueden afectar a la distribución de muchas especies que tienen su límite de distribución en la costa española. Como ya se comentó, el cambio podría acelerarse si se producen efectos sinérgicos entre la temperatura y la circulación costera, ya que podrían tener influencia sobre factores básicos como la concentración de sales nutrientes.

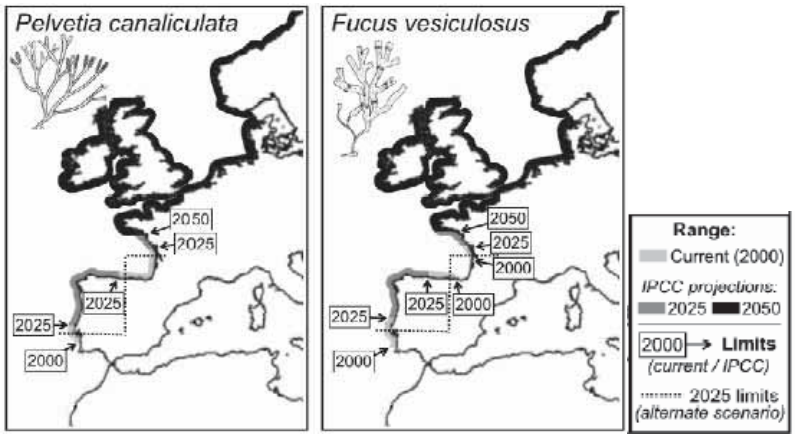


Fig. 4.5. *Variación de los límites de los límites de distribución de dos especies de macroalgas en función de los cambios de temperatura predichos por los modelos IPCC. (en Alcock, op.cit.).*

Existen evidencias de mortandades masivas de gorgonias y de corales rojos en el Mediterráneo que se relacionan con años de temperatura elevada del agua (Cerrano *et al.* 2000, Garrabou *et al.* 2001). El aumento de temperatura del mar debido al cambio climático podría repercutir negativamente en tales organismos.

Los organismos bentónicos longevos pueden aportar información clave de la respuesta de los organismos al cambio climático, filtrando las oscilaciones de corto plazo e integrando las variaciones ambientales. De la reconstrucción de la producción y crecimiento de *Posidonia oceanica*, desde hace 25 años (Marbá y Duarte 1997), se deduce un incremento mantenido durante este periodo, que probablemente tenga que ver con el cambio de clima. En la misma especie se ha podido reconstruir un incremento en la frecuencia de floración, señal fenológica muy conspicua, en un periodo de tiempo semejante. Este incremento se puede relacionar con una mayor temperatura superficial del mar; los incrementos predichos de temperatura podrían favorecer la floración de esta especie. Los cambios en la extensión de estos ecosistemas presentan también una huella clara de cambio climático. El límite superior de las praderas de P. oceanica en las Islas Baleares, determinadas a partir de fotografías aéreas, parece haber retrocedido en unos 25 m en las últimas tres décadas. Esto se atribuye a la erosión submarina que ha generado el incremento del nivel del mar.

Se ha detectado la presencia de ciertas especies de peces de origen tropical y subtropical en el Atlántico Noreste, tanto en las islas Canarias como en la Península Ibérica (Brito *et al.* 1996, Quero *et al.* 1998, Brito *et al.* 2001, Stebbing *et al.* 2002). Esta presencia se interpreta como una respuesta a cambios hidroclimáticos a gran escala, que favorecería la inmigración de especies hacia el norte. Así, por ejemplo, *Dicologgossa cuneata* y *Boos boops* mostraron, en el límite norte de distribución en el Golfo de Vizcaya, aumentos de abundancia y de su área de distribución (Poulard *et al.* 2003). La aparición y proliferación de especies de afinidad subtropical en las Islas Baleares sería otra huella clara de la influencia del cambio climático.

También están apareciendo citas que amplían los límites hacia el norte de otros grupos de organismos, como moluscos y cetáceos (Guerra *et al.* 2002, Williams *et al.* 2002). Lamentablemente, las series sistemáticas de observación en nuestro país son insuficientes, particularmente en el Mediterráneo. Así pues, muchas de las huellas biológicas del cambio climático se pueden estar manifestando sin que queden registradas, cuando pudieran ofrecer una alerta temprana sobre modificaciones ambientales asociadas al cambio climático. Este hecho impide hacer pronósticos precisos sobre los cambios futuros, aunque se puede esperar que las tendencias observadas hasta la actualidad se amplifiquen.

4.8.5. Cambio climático, pesquerías y cultivos marinos

La variabilidad climática del Atlántico Norte se atribuye a fluctuaciones decadales y a largo plazo gobernadas por los forzamientos atmosféricos relativos a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). La NAO se ha relacionado con la frecuencia e intensidad de las tormentas en el Atlántico, altura significativa de las olas, patrones de evaporación y precipitación, fluctuaciones regionales en la temperatura y salinidad, etc. Estos cambios hidrográficos tienen un gran impacto sobre los ecosistemas marinos y la producción pesquera (Parsons y Lear 2001, Drinkwater *et al.* 2003). Existe abundante información sobre las relaciones entre el índice NAO y la captura o el reclutamiento de especies explotadas por flotas españolas; en nuestras costas: la anchoa del Golfo de Vizcaya, el atún Atlántico, o el reclutamiento de la sardina en Galicia y el pez espada en el Atlántico (Santiago 1997, Borja *et al.* 1998, Riveiro *et al.* 2000, Borja y Santiago 2001, Guisande *et al.* 2001, Borges *et al.* 2003, Mejuto 2003). En los últimos años se ha percibido, en Canarias, algo similar con la mayor abundancia de *Sardina pilchardus* (Carrillo *et al.* 1996).

Los peces demersales (bacalao, eglefino, merlán, carbonero) también están influidos por la NAO. Los años 60 (de buenos reclutamientos) coinciden con el período en que la NAO se mantuvo de forma persistente en valores negativos. En los 90 los rendimientos de estas especies de gádidos declinaron hasta el borde del colapso coincidiendo con el cambio de la NAO a una fase positiva al final de los 80 y comienzo de los 90. Aunque los procesos concretos que vinculan el reclutamiento y los factores ambientales durante estas fases son todavía desconocidos, se conocen correlaciones globales entre las tendencias de los stocks, la NAO y la temperatura marina (ICES 1999), y sehan demostrado también relaciones gobernadas por cambios en el zooplancton (Beaugrand *et al.* 2003). Dado el pronóstico de que el índice NAO presente una tendencia al incremento, son previsibles cambios futuros en el mismo sentido.

Además de esta influencia general de la NAO, se han encontrado influencias de otros procesos de menor escala que parecen actuar de una forma multivariante sobre la captura y el reclutamiento de especies marinas explotadas. Entre estos se han descrito: afloramientos en Galicia y el Cantábrico, corrientes de talud en el norte y noroeste Ibérico y corrientes de talud asociadas a aportes de agua dulce – Ródano, Ebro - en el Mediterráneo, filamentos del afloramiento canario, transporte en Gibraltar, giros en el Cantábrico, cambios de temperatura o la turbulencia. Entre las especies estudiadas que presentan relación con alguna de estas condiciones se encuentran especies pelágicas -caballa, anchoa, jurel- (Lloret *et al.* 2001, Sabatés *et al.* 2001, Borja *et al.* 2002, Lavin *et al.* 2003, Lloret *et al.* 2004), o demersales – merluza- o bentónicas -gallos, cigala- (Sánchez *et al.* 2003a, Sánchez *et al.* 2003b, Fariña *et al.* in press) El transporte de larvas de muchas especies explotadas por efecto de las corrientes, su dispersión o concentración poseen efectos potenciales importantes (Sánchez y Gil 2000, Sabatés *et al.* 2001, González-Quirós *et al.* 2004, Lloret *et al.* 2004), aunque sólo recientemente empiezan a ser estudiados en detalle.

Los efectos de los cambios de factores hidrodinámicos de mesoescala referenciados en la década de los 90, no parecen haber repercutido de forma sensible a corto plazo en la estructura de la comunidad (Poulard *et al.* 2003, Sánchez y Serrano 2003).

Una de las variaciones más destacada que ha tenido lugar en las costas españolas y que afectó a algunas pesquerías es el cambio de distribución de las áreas de puesta o de migración de algunas especies. En los últimos años la anchoa del Golfo de Vizcaya aparece y realiza la puesta más al norte, y en épocas diferentes a las que lo hacía anteriormente (Borja, com. per.), fenómeno que se produce en paralelo con un incremento de las capturas de anchoa y sardina en el norte del Mar del Norte (Beare *et al.* 2004). Existen indicios sobre cambios en las rutas migradoras y la estacionalidad de algunas clases de edad de túnidos (p.e. el bonito del norte *Thunnus alalunga*) situándose mas al norte que en periodos precedentes. En Canarias esto

afectó a la estacionalidad de las pesquerías y a las capturas obtenidas y, por tanto, al nivel de esfuerzo de pesca dirigido a otras especies (Carrillo *et al.* 1996).

Los cambios en la abundancia de túnidos pueden tener efecto en algunas actividades turísticas de reciente desarrollo, como puede ser la pesca deportiva. La aparición de otras especies de origen tropical (marlín), objeto de pesca deportiva en las costas canarias y del norte de la península, podría actuar de forma compensatoria. Pero no se dispone de información sobre la importancia de ambas: número de barcos dedicados profesionalmente, valor añadido de la pesca, personas dedicadas temporalmente a esta actividad, entre otras componentes socioeconómicas.

La reducción de capturas de salmón atlántico que se detecta en los ríos del norte de la península ibérica podría ser reflejo de los cambios en la temperatura y la circulación marina. Sin embargo, no se tiene capacidad para discriminar la intervención de otros componentes como la presión pesquera en el mar y en los ríos, o el efecto de la contaminación de los ríos sobre sus poblaciones.

La información disponible sobre los efectos directos del cambio del clima sobre los cultivos son escasos. Existen evidencias de que cambios en la intensidad del afloramiento estival tienen que ver con la calidad (% peso de carne respecto del peso total) del mejillón de cultivo en Galicia (Blanton *et al.* 1987). Dadas las previsiones hacia una reducción de la producción primaria, ver apartados anteriores, son previsibles cambios en el rendimiento de los cultivos. También son esperables modificaciones del crecimiento y del estado fisiológico de los organismos cultivados.

Pero hay evidencias de efectos indirectos, por acción de floraciones de algas nocivas (HAB), que pueden afectar a los cultivos, o a su comercialización y a la salud humana. Aunque su expansión puede deberse al transporte por los humanos, su prevalencia puede asociarse al calentamiento del agua, lo que favorecería su aparición cada vez más frecuente.

Desde 1976, año en el que mejillones cultivados en las rías gallegas, que se habían alimentado de fitoplancton tóxico, fueron la causa de numerosas intoxicaciones de tipo paralizante en varios paises de Europa se han registrado y estudiado estas floraciones. A partir de 1982, se registraron nuevas intoxicaciones causadas por moluscos, esta vez de tipo diarréico. En este caso las especies causantes eran conocidas. La respuesta humana podía haberse confundido con infecciones bacterianas, por lo que no estaríamos ante un caso nuevo.

Dado que la dinámica de las poblaciones fitoplanctónicas depende de la dinámica de las aguas, es de esperar que ésta se vea afectada por cambios en la misma. Se ha sugerido que un incremento en la intensidad del afloramiento estival, consecuencia del incremento de los vientos, asociados a cambios en el índice NAO causado por el cambio climático, podría provocar un incremento en las floraciones de este dinoflagelado, como *Gymnodinium catenatum* (Fraga y Bakun 1993, Garcia *et al.* 1997, Hallegraeff y Fraga 1998, Gómez-Figueiras y Reguera 2004).

Recientemente se ha detectado en las costas del Mediterráneo y de Canarias la presencia de especies de dinoflagelados bentónicos tóxicos del género *Ostreopsis* (*Ostreopsis* cf. ovata) que podrían considerarse como tropicales (Vila *et al.* 2001). En aguas de Canarias se ha observado otro dinoflagelado típicamente tropical, *Gambierdiscus* (Fraga com. pers., Ojeda datos inéditos), productor de una de las toxinas más potentes que se conocen. Su caracter tropical, hace que se pueda prever un aumento de su abundancia ante el calentamiento global, así como una extensión de su area de distribución hacia el norte y su probable entrada en el Mediterráneo.

El cambio de condiciones puede ir asociado a la reducción de la abundancia de alguna especie tóxica. Sería el caso en las costas gallegas de *Lingulodinium polyedrum*, especie causante de las tres mareas rojas más antiguas descritas en la literatura científica. Hoy en día se considera una especie rara (Fraga 1989).

Además del efecto sobre los cultivos, las especies de algas nocivas pueden causar otros daños económicos. Muchas playas de gran atractivo turístico del Mediterráneo y del Atlántico, se ven afectadas por frecuentes floraciones algales, que los turistas confunden con suciedad. Desde la primera observación del dinoflagelado *Alexandrium catenella* en aguas catalanas en 1987 (Garcés *et al.* 1999), su presencia en masa es un fenómeno frecuente en el Mediterráneo occidental (Vila *et al.* 2001). La diatomea céntrica *Atteya armatus* produce una coloración verde-parduzca en algunas playas turísticas de Canarias. Se ha descrito un incremento de su recurrencia e intensidad desde hace 4 años (Ojeda 2004).

La proyección de cambios en el futuro deben seguir pautas similares a las descritas en este apartado. Incrementos de especies de aguas más cálidas, y descenso de especies de aguas frías, con las correspondientes modificaciones de la abundancia y de los límites de distribución. Más problemático es predecir los lapsos temporales en los que se produciran, asi como su intensidad.

4.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

4.9.1. Políticas de pesca

Dado que el cambio climático puede causar modificaciones en la producción de los stocks, los impactos locales o regionales pueden ser extremos. Las predicciones climáticas tendrán que ser consideradas en las proyecciones de rendimiento a largo plazo sobre los stocks de especies comerciales, y sobre los sistemas de gestión y estrucutras sociales y económicas (mercados, estructuras, inversiones), para ajustarse a las nuevas condiciones, que posiblemente sean de menor disponibilidad de recursos.

Actualmente el objetivo de la gestión de los recursos pesqueros es la sostenibilidad de los mismos, y se considera que la mayor incidencia sobre el tamaño de los stocks se debe al esfuerzo pesquero. En algunos stocks de especies pelágicas, se asume la influencia de la variabilidad climática en la abundancia a corto y medio plazo, y debería tenerse en cuenta en los planes de gestión para evitar colapsos de la abundancia y las pérdidas no sólo estrictamente pesqueras sino en las inversiones asociadas al sector. Existen propuestas de la UE para llevar a cabo planes de recuperación para ciertas especies (merluza, cigala) en el atlántico ibérico y se considera que la sobreexplotación continuada impide la recuperación de los stocks.

Las nuevas ideas sobre gestión de stocks de especies marinas explotadas proponen una gestion basada en pesquerias multiespecíficas, como paso intermedio para alcanzar una gestión basada en el ecosistema. El concepto de “aproximación ecológica” es objeto de dos interpretaciones complementarias: la consideración de los efectos de la pesca sobre el ecosistema, o la consideración de las respuestas de los ecosistemas a la explotación pesquera. Dos son las vías sobre la que se desarrolla la gestión, la producción de modelos adaptativos a partir de información sobre los stocks fácil de obtener, o a través de indicadores del estado de calidad de los ecosistemas obtenidos a partir de la definición de niveles de preservación deseados. Todos estos enfoques se realizan en el marco de Grandes Ecosistemas Marinos (http://www.edc.uri.edu/lme). Además de los objetivos de mantenimiento y recuperación de recursos del sector pesquero, este enfoque contempla otros relativos a la protección y recuperación de hábitats complementarios a la explotación, mantenimiento de la biodiversidad, o relacionados con los sectores económicos y sociales (Castilla 2003). Todos

estos aspectos tendrán incidencia en gran número de Instituciones, locales, regionales, nacionales y europeas. Como una gran parte de la producción pesquera española se realiza en caladeros lejanos, fuera de aguas comunitarias, también deberán considerarse afectadas las políticas de cooperación internacional.

Incrementar el énfasis sobre la calidad de los productos y el etiquetado ecológico que garantice una explotación sostenible pueden ser medidas paliativas y ayudar a los pescadores en una situación de escasez de recursos. Estas medidas incidirán en la reducción de efectos colaterales sobre los ecosistemas y las poblaciones de peces como los causados por los descartes, desechos u otros.

4.9.2. Políticas de cultivos marinos

La política sobre cultivos marinos afecta a las políticas estatales y a las de las comunidades autónomas, dado que se producen en aguas interiores. La política de fuerte desarrollo emprendida en los últimos decenios deberá ser sometida a evaluación, prestando atención a las modificaciones sobre los cambios en la productividad, y por tanto a su rendimiento y sostenibilidad.

Deberán revisarse las políticas de introducción de especies foráneas con vistas al cultivo aplicando un principio de precaución. Su interacción con ecosistemas y especies autóctonas pueden provocar cambios negativos e imprevistos si escapan al control humano. También, si el control sanitario no es suficiente, pueden incrementar el número de organismos patógenos con grave daño para los cultivos preexistentes.

4.9.3. Políticas de desarrollo costero

Las políticas de desarrollo costero afectan a la UE a la administración central y a las CCAA. También se verán afectadas las administraciones locales. El incremento de las actividades humanas en zonas costeras puede implicar que muchas de ellas puedan verse influidas por el cambio, y particularmente por la subida del nivel del mar. El efecto combinado de cambios hidrográficos e incremento de actividad pueden contribuir al desarrollo de floraciones de algas nocivas, y por ende afectar a los recursos y a la salud humana.

La prevención de la erosión, y sus consecuencias negativas para los ecosistemas, se debe plantear tanto para mantener las playas y otros elementos de interés para el sector turístico, como para la conservación de los ecosistemas vulnerables al cambio en el nivel del mar. Los impactos de la construcción de infraestructuras y viviendas en la franja costera se han de considerar, pues, en el contexto no ya de los impactos actuales, sino de los generados en el contexto de un nivel del mar creciente. El mantenimiento de un equilibrio sedimentario debe guiar las políticas de desarrollo costero. También tendrán que considerarse los impactos del cambio climático sobre la demanda de infraestructuras.

Existe una fuerte presión social por el desarrollo de nuevas y mayores instalaciones portuarias, tanto comerciales como deportivas, que se ha de moderar, para evitar impactos en la dinámica sedimentaria costera (ej.: Canarias y la construcción del futuro Puerto de Granadilla). Todas las instalaciones deberán contar con infraestructuras necesarias (tanques de recogida de aguas negras, aceites, etc) para evitar el impacto de los residuos que estas instalaciones generan.

La existencia de redes de control sobre el desarrollo de floraciones de organismos tóxicos o urticantes, ya establecidas en algunas Autonomías, parece una necesidad, que debería implementarse de forma inmediata, para establecer una situación de base que permita la toma de decisiones futuras. Esta es una necesidad que ya se aprecia en otros países con casos

problemáticos con algunas especies potencialmente peligrosas para nuestros cultivos o para los humanos (por ejemplo *Pfeisteria* en EEUU).

4.9.4. Políticas de conservación y gestión de ecosistemas

Afectará a todos los niveles administrativos, desde la UE a las administraciones de las CCAA. Dados los antecedentes sobre los efectos directos de la actividad humana, y los cambios que previsiblemente serán inducidos por el cambio climático, parece necesaria una política de protección de las poblaciones explotadas y de los ecosistemas litorales, los previsiblemente más afectados por el cambio. Deberán tenerse en cuenta criterios de complementariedad y de singularidad en el diseño de redes de Áreas Marinas Protegidas (AMP). Deberá implicarse a las poblaciones generando beneficios mediante estrategias complementarias de conservación y explotación, y facilitando la divulgación deseada por las mismas.

4.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

4.10.1. Detección de cambios en las condiciones oceánicas

Una de las principales deficiencias de las ciencias marinas en España, destacada en numerosos foros científicos, es la escasez de series temporales sobre el medio marino, en un sistema permanente de observación similar al meteorológico, bién con muestreo directo en barco, o mediante boyas y satélites. Este hecho se hace mucho más perentorio si se quiere documentar, y predecir la respuesta del océano al cambio climático.

Esta deficiencia ha sido corregida, en parte, mediante iniciativas de algunas Instituciónes, Instituto Español de Oceanografía, Puertos del Estado, AZTI, o iniciativas de otras Instituciones (CSIC en Blanes, CSIC en Vigo, Universidad de Oviedo en colaboración con el IEO), o centros privados (Acuario de San Sebastián), e incluso como iniciativa personal (Josep Pascual en L'Estartit, Girona). El establecimiento de una red de observación del medio marino bien planificada y coordinada, adecuadamente financiada, con garantías de calidad apropiadas y que cubra las necesidades de control del medio marino a largo plazo, se presenta como una necesidad ineludible. Para ello sería necesaria la dotación de un Centro de Datos Oceanográficos.

También lo es potenciar y mejorar las bases de datos oceanográficos existentes, permitiendo la recopilación de la información disponible en bases de datos ya existentes o de los generados por proyectos de investigación, pasados o futuros, financiados por la Administración Pública. Permitiría un uso más racional y eficaz de los datos oceanográficos, responder con más efectividad a nuestros compromisos con los programas internacionales dedicados al cambio climático en el océano, y hacer aportaciones significativas a la gestión de nuestros recursos. La coordinación con algunas iniciativas internacionales sería deseable. Se pueden poner como ejemplo la Open-source Project for a Network Data Access Protocol (DODS) (http://helium.gsfc.nasa.gov/Data/portals/dods/index.html) que posee un vínculo a bases de datos oceanográficos, (http://helium.gsfc.nasa.gov/Data/portals/dods/param_search/OCEANS.html), o la francesa coordinada por IFREMER que pretende monitorizar el clima oceánico (http://www.ifremer.fr/merseaip//).

Sería deseable potenciar las bases de datos de imágenes de satélite (CREPAC-INTA, IEO, AZTI), la coordinación en la obtención y salvaguarda de las mismas y facilitar su uso. Variables como temperatura superficial, clorofila, altimetría, vientos, son muy útiles para analizar a gran escala los cambios. Sistemas similares al Comprehensive Ocean Atmospheric Data Set (COADS) de amplio uso entre la comunidad científica, y que proporcionan datos meteorológicos y de temperatura superficial del agua de mar (SST) específicos para nuestra

zona podría ser interesante, si se hace con rigor y calidad. Lo mismo que establecer nuevas iniciativas de control a largo plazo, como el proyecto europeo FerryBox en la ruta Porstmouth – Bilbao (http://www.soc.soton.ac.uk/ops/ferrybox_index.phppp), ya que permiten la obtención de datos a bajo coste con continuidad.

La promoción de programas nacionales dedicados al estudio del Cambio Climático y de la respuesta de los ecosistemas y las poblaciones marinas, ya definidos en Programas Internacionales IGBP (GLOBEC, SOLAS, JGOFS, GOOS,…) puede aportar el impulso necesario para subsanar muchas de las lagunas detectadas durante la redacción del presente informe.

4.10.2. Interacciones atmósfera-océano y sistema climático

Dada la estrecha interrelación entre los procesos atmosféricos y oceánicos su relevancia en las causas e intensidad del Cambio Climático, parece necesario que se incremente la participación española en el estudio de las interacciones entre ambos sistemas, en el marco de las directrices y proyectos internacionales al respecto. Será necesario que se considere en las directrices de Planes de Investigación el papel del océano como modulador del cambio de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, o como transportador de calor en la Tierra.

Parece necesario dedicar atención a los cambios en los regímenes de vientos, dado su papel como forzamiento de muchos procesos de mesoescala que influyen sobre la productividad primaria y sobre el reclutamiento de múltiples especies. Estos cambios están asociados al cambio climático.

4.10.3. Relaciones entre dinámica de ecosistemas marinos y condiciones hidrográficas

Una de las lagunas detectadas al igual que en el caso de las condiciones oceánicas es la ausencia de bases de datos creibles, contrastadas y normalizadas de la producción pesquera extractiva, y muy escasa en el control de poblaciones o ecosistemas no explotadas. Desde luego el control es casi inexistente si se considera en relación al cambio climático. Analizar las interacciones entre especies en el marco del ecosistema en el que las especies viven y se reclutan, siempre encuadradas en situaciones de cambio ambiental, incluida la actividad extractiva humana, facilitaría la información para prever los cambios futuros y diseñar mecanismos de gestión que permitan adaptar el sistema productivo y la conservación de las especies recurso y los ecosistemas.

El comportamiento de los ecosistemas, los efectos sobre las interacciones entre especies, o las modificaciones generadas dependiendo de si se ven afectadas especies clave o no, son campos sobre los que se dispone de muy poca información; pero sabemos que el cambio climático puede generar cambios importantes sobre los ecosistemas. La coordinación de las redes de monitorización de respuestas biológicas existentes en distintas autonomías o en coordinación con los sistemas indicados respecto al medio marino, permitiría aportar un conocimiento prácticamente en tiempo real sobre el estado y tendencias de estos ecosistemas y conocer los efectos provocados por el cambio climático.

4.10.4. Metabolismos de especies significativas e interacciones entre especies

Dado lo complejo del funcionamiento de los ecosistemas, monitorizar a largo término las respuestas fisiológicas de especies seleccionadas, o ciclos fenológicos (periodo e intensidad reproductiva) permitirían comprender los mecanismos de actuación de cambios ambientales. El estudio de algunas especies longevas nos permitiría reconstruir la respuesta de especies al

cambio ya ocurrido (Marbá y Duarte 1997, Kennedy *et al.* 2001), ampliando nuestro conocimiento de los tiempos y velocidades del cambio. Predecir los ritmos de cambio facilitará la respuesta adaptativa y la adopción de politicas ambientales consistentes.

Definir el significado de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas, y su utilidad desde el punto de vista de la gestion adaptativa de los recursos, de tal manera que se pueda satisfacer las necesidades de la explotación con la sostenibilidad ambiental es otra de las urgentes necesidades.

4.10.5. En resumen

La tabla 4.2 resume los principales impactos previsibles y la probabilidad de que estos ocurran. El conocer estos efectos debe ser una prioridad de investigación.

Tabla 4.2. *Impactos previsibles y probabilidad de ocurrencia.*

Procesos afectados por el cambio global en el futuro en España	Probabilidad de ocurrencia
Calentamiento superficial del agua de mar en el futuro	***
Cambios en la salinidad del agua de mar	*
Cambios en los intercambios de dióxido de carbono entre la atmósfera y el océano	**
Cambios en la circulación de mesoescala	**
Elevación del nivel del agua de mar	***
Cambios en los límites de distribución y en la abundancia de especies del plancton	***
Cambios en los límites de distribución y en la abundancia de especies del bentos	***
Efectos sobre las supervivencia larvarias y el reclutamiento de especies explotadas	**
Efectos sobre la productividad marina	**
Cambios en la composición y dinámica de las comunidades	**
Efectos sobre la presencia de especies tóxicas o urticantes	*

**** Probabilidad muy alta; ** Probabilidad media; *Poco probable*

4.11. BIBLIOGRAFÍA

Alcock R. 2003. The effects of climate change on rocky shore communities in the bay of Biscay, 1895-2050. Southampton.

Anadón R. 1983. Zonación en la costa asturiana: variación longitudinal de las comunidades de macrófitos en diferentes niveles de marea. Investigación Pesquera 45: 143-156.

Bakun A. 1996. Patterns in the ocean: ocean processes and marine population dynamics, La Paz, Baja California Sur, Mexico.

Beardall J. y Raven J.A. 2004. The potential effects of global climate change on microbial photosynthesis, growth and ecology. Phycologia 43: 26-40.

Beare D.J., Burns F., Jones E., Peach K., Portilla E., Greig T., McKenzie E. y Reid D. 2004. An increase in the abundance of anchovies and sardines in the north-western North Sea since 1995. Global Change Biology 10: 1209-1213.

Beare D.J. y McKenzie E. 1999. Temporal patterns in the surface abundance of *Calanus finmarchicus* and *C. helgolandicus* in the North Sea (1958-1956) inferred from Continuous Plankton Recorder data. Marine Ecology-Progress Series 190: 241-251.

Beaugrand G., Brander K.M., Lindley J.A., Souissi S. y Reid P.C. 2003. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. Nature 426: 661-664.

Beaugrand G., Reid P.C., Ibañez F. y Planque B. 2000. Biodiversity of North Atlantic and North Sea calanoid copepods. Marine Ecology-Progress Series 204:299-303.

Bethoux J.P., Gentili B., Raunet J. y Taillez D. 1990. Warming trend in the western Mediterranean deep water. Nature 347: 660-662.

Blanton J.O., Tenore K.R., Castillejo F., Atkinson L.P., Schwing F.B. y Lavin A. 1987. The relationship of upwelling to mussel production in the rias on the western coast of Spain. Journal Marine Research 45: 497-571.

Borges M.F., Santos A.M., Crato N., Mendes H. y Mota B. 2003. Sardine regime shifts off Portugal: a time series analysis of catches and wind conditions. Science Marine Suppl 1: 235-244.

Borja A., Bald J. y Muxika I. 2004. El recurso marisquero de percebe (*Pollicipes pollicipes*) en el biotopo marino protegido de Gaztelugatxe y en áreas explotadas de Bizkaia. Report No. 101, Gobierno Vasco.

Borja A., Egaña J., Valencia V., Franco J. y Castro R. 2000. 1947-1997, estudio y validación de una serie de datos diarios de temperatura del agua de mar en San Sebastián, procedentes de su acuario. Oceanografika 3: 139-153.

Borja A. y Santiago J. 2001. Does the North Atlantic oscillation control some processes influencing recruitment of temperate tunas? ICCAT SCRS 01/33:19 Pgs.

Borja A., Uriarte A. y Egaña J. 2002. Environmental factors and recruitment of mackerel, Scomber scombrus L. 1758, along the north-east Atlantic coast of Europe. Fisheries Oceanography 11: 116-127.

Borja A., Uriarte A., Egaña J., Motos L. y Valencia V. 1998. Relationships between anchovy (*Engraulis encrassicolus*) recruitment and environment in the Bay of Biscay (1967-1996). Fisheries Oceanography 7: 375-380.

Bostford L.W., Castilla J.C. y Peterson C.H. 1997. The management of fisheries and Marine Ecosystem. Science 277: 509-515.

Brito A., Falcón J.M., Aguilar N. y Pascual P. 2001. Fauna Vertebrada Marina. En: Esquivel J.M.F. (ed.). Naturaleza de las Islas Canarias. Ecología y Conservación. Publicaciones Turquesa, Santa Cruz de Tenerife. Pgs. 219-229.

Brito A., Lozano I.J., Falcón J.M., Rodríguez F.M. y Mena J. 1996. Análisis biogeográfico de la ictiofauna de las Islas Canarias. En: Llinás O., González J.A. y Rueda M.J. (eds.). Oceanografía y Recursos Marinos en el Atlántico Centro-Oriental, Las Palmas. Pgs. 241-270.

Broecker W.S. 1997. Thermohaline circulation, the Achilles Heel of our climate system: Will man-made CO_2 upset the current Balance? Science 278: 1582-1588.

Broecker W.S., Sutherland S. y Peng T.-H. 1999. A possible 20th-Century slowdown of Southern Ocean Deep water formation. Science 286: 1132-1135.

Cabanas J.M., Lavín A., García M.J., Gonzalez-Pola C. y Tel Pérez E. 2003a. Oceanographic variability in the northern shelf of the Iberian Península, 1990-1999. ICES Marine Science Symposia 219: 71-79.

Cabanas J.M., Lavín A., García M.J., González-Pola C. y Tel Pérez E. 2003b. Oceanographic variability in the northern shelf of the Iberian Península, 1990-1999 ICES Marine Science Symposia, pgs. 71-79.

Caldeira K. y Wickett M.E. 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. Nature 425: 365.

Carrillo J., González J.A., Santana J.I. y Lozano I.J. 1996. La pesca en el puerto de Mogán (Islas Canarias): flota, artes y análisis de las capturas entre 1980 y 1989. En: Llinás O., González J.A. y Rueda M.J. (eds.). Oceanografía y Recursos Marinos en el Atlántico Centro-Oriental, Las Palmas. Pgs. 457-476.

Castilla J.C. 2003. Marine Protected areas. Frontiers in Ecology and the Environment 1: 495-502.

Cerrano C., Bavestrello G., Bianchi C.N., Cattaneo-Vietti R., Bava S., Morganti C., Morri C., Picco P., Sara G., Schiaparelli S., Siccardi A. y Sponga F. 2000. A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999. Ecology Letters 3: 284-293.

Chavez F.P., Ryan J., Lluch-Cota S.E. y Ñiquen C.M. 2003. From anchovies to Sardines and back: Multidecadal changes in the Pacific Ocean. Science 299: 217-221.

Curry R., Dickson B. y Yashayaev I. 2003. A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades. Nature 426: 826-829.

Dickson B., Yashayaev I., Meincke J., Turrell B., Dye S. y Holfort J. 2002. Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades. Nature 416: 832-837.

Dickson R.R., Memeke J., Malmberg A.A. y Lee A.J. 1988. The great salinity anomaly in the northern north Atlantic 1968-1982. Progress in Oceanography 20: 103-151.

Douglas B.C., Kearny M.S. y Leatherman S.P. 2001. Sea level rise: History and consequences, Vol 75.

Drinkwater K.F., Belgrano A., Borja A., Conversi A., Edwards M., Greene C.H., Ottersen G., Pershing A.J. y Walker H. 2003. The response of marine ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. En: Hurrell J., Kushnir Y., Visbeck M. y Ottersen G. (eds.). The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact, Vol 134. American Geophysical Union. Pgs. 211-234.

Edwards M. y Richardson A.J. 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. Nature 430: 881-884.

FAO. 2000. The state of World Fisheries and aquaculture. 142 Pgs.

Fariña A.C., González-Herráiz I., Freire J. y Cancelo J.R. (en prensa) Exploring long-term variability of Nephrops norvegicus population and fishery off North Galicia (NW Spain). Hydrobiologia.

Feely R.A., Sabine C.L., Lee K., Berelson W., Kleypas J., Fabry V.J. y Millero F.J. 2004. Impact of anthropogenic CO_2 on the CO_3Ca system in the oceans. Science 305: 362-366.

Fraga S. 1989. Las purgas de mar en las Rías Bajas gallegas. Las purgas de mar como fenómeno natural: Las mareas rojas. En: Cuadernos da Area de Ciencias Mariñas, Vol, 4. Seminario de Estudos Galegos. Pgs. 95-109.

Fraga S. y Bakun A. 1993. Global climate change and harmful algalblooms: The example of *Gymnodinium catenatum* on the Galician coast. En: Smayda T.J. y Shimizu Y. (eds.). Toxic phytoplankton blooms in the sea. Elsevier Science Publisher, Amsterdam. Pgs. 59-65.

Francis R.C. y Sibley T.H. 1991. Climate change and fisheries What are the real issues. The Northwest Environmental Journal 7: 295-307.

Fromentin J.M. y Planque B. 1996. *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic.2. Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finarchicus* and *C. helgolandicus*. Marine Ecology-Progress Series 134: 111-118.

Garcés E., Masó M. y Camp J. 1999. A recurrent and localized dinoflagellate bloom in a Mediterranean beach. Journal of Plankton Research 21: 2373-2391.

Garcia M.A., López O., Sospedra J., Rojas P., Arcilla A.S. y Gomis D. 1997. Estructura de la Corriente Antártica Circumpolar en el mar de Scotia: una contribución española al experimento internacional WOCE. Boletin de la Real Sociedad Española de Historia Natural 93: 149-160.

García-Soto C., Pingree R.D. y Valdés L. 2002. Navidad development in the southern Bay of Biscay: Climate Change and swoddy structure from remote sensing and in situ measurements. Journal of Geophysical Research 107: 1-29.

Garrabou J., Pérez T., Sartoretto S. y Harmelin J.G. 2001. Mass mortality event in red coral *Corallium rubrum* populations in the Provence region (France, NW Mediterranean). Marine Ecology-Progress Series 217: 263-272.

GLOBEC. 2003. Marine Ecosystems and Global Change. IGBP Science 5: 1-32.

Gómez-Figueiras F. y Reguera B. 2004. An overview of HABs in designated upwelling systems.

González-Pola C., Lavín A. y Vargas-Yañez M. 2003. Thermohaline variability on the intermediata waters of the Southern Bay of Biscay from 1992. Report No. 2003/T, ICES.

González-Quirós R., Pascual A., Gomis D. y Anadón R. 2004. Influence of mesoscale physical forcing on trophic pathways and fish larvae retention in the central Cantabrian Sea. Fisheries Oceanography 13: 1-14.

Gregg W.W., Conkright M.E., Ginoux P., O'Reilly J.E. y Casey N.W. 2003. Ocean primary production and climate: global decadal changes. Geophysical Research Letters 30: 1809.

Guerra A., González A.F. y Rocha F. 2002. Appearance of the common paper nautilus, *Argonauta argo* related to the increase of the sea surface temperature in the north-eastern Atlantic. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 82: 855-858.

Guisande C., Cabanas J.M., Vergara A.R. y Riveiro I. 2001. Effect of climate on recruitment succes of Atlanctic Iberian sardine *Sardina pilchardus*. Marine Ecology-Progress Series 223: 243-250.

Hallegraeff G.M. y Fraga S. 1998. Bloom dynamics of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum*, with emphasis on Tasmanian and Spanish coastal waters. En: Anderson D.M., Cembella A.D. y Hallegraeff G.M. (eds.). Phisiological Ecology of Harmfull Algal Blooms, Vol 41. NATO ASI Series, Berlin.

Hare S.R. y Mantua N.J. 2002. Empirical evidence for North pacific regime shifts in 1977 and 1989. Progress in Oceanography.

Hudges S. y Lavín A. 2003. The 2002/2003 ICES Annual Ocean Climate Status summary. Report No. 259, ICES.

ICES. 1999. Report of the Workshop on ocean climate of the NW Atlantic during the 1960s and 1970s and consequences for gadoid populations. ICES Cooperative Research report 234: 1-81.

ICES. 2003. Report of the ICES advisory committee on Ecosystems, ICES Cooperative Research Report.

Kennedy H., Richardson C.A., Duarte C.M. y Kennedy D.P. 2001. Oxygen and carbon stable isotopic profiles of the fan mussel, *Pinna nobilis*, and reconstruction of sea surface temperatures in the Mediterranean. Marine Biology 139: 1115-1124.

Koutsikopoulos C., Beillois P., Leroy C. y Taillefer F. 1998. Temporal trends and spatial structures of the sea surfae temperature in the Bay of Biscay. Oceanologica Acta 21: 335-344.

Labarta U 2000. Desarrollo e innovación empresarial en la acuicultura: una perspectiva gallega en un contexto internacionalizado, Fundación Caixa Galicia.

Lavín A., Díaz del Rio G., Cabanas J. y Casas G. 2000. Afloramiento en el Noroeste de la Península Ibérica. Indices de afloramiento para el punto 43ª N 11ª W. Periodo 1990-1999. Datos y Resúmenes del Instituto Español de Oceanografía 15: 1-25.

Lavin A., Moreno-Ventas X., Abaunza P. y Cabanas J.M. 2003. Environmental variability in the Atlantic and Iberian waters and its influence on horse mackerel recruitment ICES Marine Science Symposia. Pgs. 403-407.

Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P. y Stephens C. 2000. Warming of the World Ocean. Science 287: 2225-2229.

Levitus S., Antonov J.L., Wang J., Delworth T.L., Dixon K.W. y Broccoli. A.J. 2001. Anthropogenic warming of Earth's climate system. Science 292: 267-270.

Llope M. y Anadón R. 2002. Seasonality, spatial pattern and trend of some hydrographic events in south Bay of Biscay 8th International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay, Gijón.

Llope M., Viesca L., Rodriguez N. y Anadón R. 2004. Is the pelagic ecosystem in coastal waters being affected by the Global Change? En: IGBP (ed.). Seminar IGBP 2004 Global Change and Sustainability. Evora, Portugal.

Lloret J., Lleonart J., Solé I. y Fromentin J.M. 2001. Fluctuations of landings and environmental conditions in the north-western Mediterranean Sea. Fisheries Oceanography 10: 33-50.

Lloret J. y Lleonart J. 2002. Recruitment dynamics of eight fishery species in the northwestern Mediterranean Sea. Scientia Marina 66: 77-82.

Lloret J., Palomera I., Salat J. y Solé I. 2004. Impact of freshwater input and wind on landings of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) and sardine (*Sardina pilchardus*) in shelf waters

surrounding the Ebre (Ebro) River delta (north-western Mediterranean). Fisheries Oceanography 13: 102-110.

Marbá N. y Duarte C.M. 1997. Interannual changes in seagrass (*Posidonia oceanica*) growth and environmental change in the Spanish Mediterranean littoral zone. Limnology and Oceanography 42: 800-810.

Marcos M., Gomis D., Monserrat S., Álvarez E., Pérez B. y García-Lafuente J. (envíado) Consistency of long sea-level time series in the Northern coast of Spain.

McClain C.R., Signorini S.R. y Christian J.R. 2004. Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites. Deep-Sea Research II 51: 281-301.

Mejuto J. 2003. Recruit indices of the North Atlantic swordfish (*Xiphias gladius*) and their possible link to atmospheric and oceanographic indicator during the 1982-2000 period Collective Volume of Scientific papers ICCAT. ICCAT. Pgs. 1505-1506.

Miller L. y Douglas B.C. 2004. Mass and volume contributions to twentieth-century global sea level rise. Nature 428: 406-409.

Molinero J.C. 2003. Etude de la variabilité des abondances des copépodes planctoniques en Mediterranée, mécanismes et échelles caractéristiques: le cas de Centropages typicus. Pierre et Marie Curie Paris VI.

Myers R.A. y Worm B. 2003. Rapid world wide depletion of predatory fish communities. Nature 423: 280-283.

Ojeda A. 2004. Diatomeas y Dinoflagelados de Canarias. Inst. Estudios Canarios.

Olsen E.M., Heino M., Lilly G.R., Morgan M.J., Brattey J., Ernande B. y Dieckman U. 2004. Maturation trends indicative of rapid evolution preceded the collapse of northern cod. Nature 428: 933-935.

Palumbi S.R. 2001. The ecology of Marine Protected Areas. En: Bertness M.D., Gaines S.D. y Hay M.E. (eds.). Marine Community Ecology. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts. Pgs. 509-530.

Parrilla G., Lavín A., Bryden H.L., García M. y Millard R. 1994. Rising temperatures in the Subtropical N. Atlantic over the past 35 years. Nature 369: 48-51.

Parsons L.S. y Lear W.H. 2001. Climate variability and marine ecosystem impacts: a North Atlantic perspective. Progress in Oceanography 49: 167-188.

Pauly D. 2002. Towards sustainability in world fisheries. Science 418: 689-695.

Pauly D., Alder J., Bennett E., Christense V., Tyedmers P. y Watson R. 2003. The future for fisheries. Science 302: 1359-1361.

Planque B., Beillois P., Jégou A.M., Lazure P., Petitgas P. y Puillat I. 2003. Large scale hydroclimatic variability in the Bay of Biscay. The 1990s in the context of interdecadal changes ICES Marine Science Symposia.

Poulard J.C., Blanchard F., Boucher J. y Souissi S. 2003. Variability of the demersal fish assemblages of the bay of Biscay during the 1990s. ICES Marine Science Symposia. Pgs. 411-414.

Quero J.C., Du Buit M.H. y Vayne J.J. 1998. Les observations de poissons tropicaux et le réchauffement des eaus dans l'Atlantique européen. Oceanologica Acta 21: 345-351.

Richardson A.J. y Schoeman D.S. 2004. Climate change on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. Science 305: 1609-1612.

Riveiro I., Guisande C., Lloves M., Maneiro I. y Cabanas M. 2000. Importance of parental effects on larval survival in *Sardina pilchardus*. Marine Ecology-Progress Series 204: 249-258.

Sabatés A., Salat J. y Olivar M.P. 2001. Advection of continental water as an export mechanism for anchovy, *Engraulis enchrasicholus*, larvae. Scientia Marina 65: 77-87.

Salat J. y Pascual J. 2002. The oceanographic and meteorological station at l'Estartit (NW Mediterranean). En: Briand F. (ed.). Tracking long-term hydrological change in the Mediterranean Sea. CIESM Workshop Series, Monaco- Pgs. 29-32.

Sánchez F. y Gil J. 2000. Hydrographic mesoscale structures and Poleward Current as a determinant of hake (*Merlucius merlucius*) recruitment in southern Bay of Biscay. ICES Journal of Marine Science 57: 152-170.

Sánchez F. y Serrano A. 2003. Variability of ground fish communities of the Cantabrian Sea during the 1990s ICES Marine Scence Symposia. Pgs. 249-260.

Sánchez I., Fernández C. y Arrontes J. (enviado) Long-term changes in the structure of intertidal assemblages following invasion by *Sargassum muticum* (Phaeophyta). Journal of Phycology.

Sánchez R., Sánchez F. y Gil J. 2003a. The optimal environmental window that controls hake (*Merlucius merlucius*) recruitment in the Cantabrian Sea. En: Symposia IMS (ed.). Pgs. 415-419.

Sánchez R., Sánchez F., Landa J. y Fernández A. 2003b. Influence of oceanographic parameters on recruitment of megrim (*Lepidorhombus whiffiagonis*) and four spot megrim (L. bosci) on the Northern Spanish continental shelf (ICES Division VIII) ICES Marine Science Symposia. Pgs. 400-402.

Santiago J. 1997. The North Atlantic Oscillation and recruitment of temperate tuna. ICCAT SCRS 97/40: 20 pgs.

Sherman K., Alexander L.M. y Gold B.D. 1992. Large Marine Ecosystems: Patterns, Processes, and Yields.

Southward A.J. y Boalch G.T. 1994. The effect of changing climate on marine life: Past events and future predictions. Exeter Maritime Studies 9: 101-143.

Southward A.J., Hawkins S.J. y Burrows M.T. 1995. Seventy years observations in distribution and abundance of zooplankton and intertidal organisms in the western English Channel in relation to rising sea temperature. Journal thermal Biology 20: 127-155.

Stebbing A.R.D., Turk S.M.T., Wheeler A. y Clarke K.R. 2002. Inmigration of southern fish species to south-west England linked to warming of the North Atlantic (1960-201). Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 82: 177-180.

Valencia V. 2004. Hydrography of the southeastern Bay of Biscay. En: Borja A. y Collins M. (eds.). Oceanography and Marine Environment of the Basque Country. Elsevier, Amsterdam. Pgs. 159-194.

Vargas-Yánez M., Parrilla G., Lavín A., Vélez-Belchi P. y González-Pola C. 2004. Temperature and salinity Increase in the Eastern North Atlantic along the 24.5ºN during the last ten years. Geophysical Research Letters 31(6): Art. No. L06210.

Vargas-Yáñez M., Ramírez T., Cortés D., Fernández del Puelles M.L., Lavín A., López-Jurado J.L., González-Pola C., Vidal I. y Sebastián M. 2002a. Variability of the Mediterranean water around the Spanish coast: Project RADIALES. En: Briand F. (ed.). Tracking long-term hydrological change in the Mediterranean Sea. CIESM Workshop Series, Monaco. pgs. 25-28.

Vargas-Yáñez M., Ramírez T., Cortés D, Sebastián M. y Plaza F. 2002b. Warming trends in the continental shelf of Málaga Bay (Alborán Sea). Geophysical Research Letters 29 (22): 2082.

Verlaque M., Alfonso-Carrillo J., Gil-Rodríguez M.C., Durand C., Boudouresque C.F. y Le Parco Y. 2003. Blitzkrieg in a marine invasion: *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Bryopsidales, Chlorophyceae) reaches the Canary Islands (Spain, NE Atlantic). Biological Invasions 6 (3): 269-281.

Vila M., Garcés E. y Masó M. 2001. Potentially epiphytic dinoflagellate assemblages on macroalgae in the NW Mediterranean. Aquatic Microbial Ecology 26: 51-60.

Villate F., Moral M. y Valencia V. 1997. Mesozooplankton community indicates climate changes in a shelf area of the inner Bay of Biscay throughout 1988 and 1990. Journal of Plankton Research 19: 1617-1636.

Williams A.D., Williams R. y Brereton T. 2002. The sighting of pygmi killer whales (*Fereza attenuata*) in the Southern Bay of Biscay. Journal Marine Biological Association UK 82: 509-512.

5. IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD VEGETAL

Federico Fernández-González, Javier Loidi y Juan Carlos Moreno Saiz

Contribuyentes

M. del Arco, A. Fernández Cancio, X. Font, C. Galán, H. García Mozo, R. Gavilán, A. Penas, R. Pérez Badia, S. del Río, S. Rivas-Martínez, S. Sardinero, L. Villar

Revisores

F. Alcaraz, E. Bermejo, J. Izco, J. Jiménez García-Herrera, J. Martín Herrero, J. Molero, C. Morillo, J. Muñoz, M. T. Tellería

C. Blasi

RESUMEN

Los impactos directos del cambio climático sobre la diversidad vegetal se producirán a través de dos efectos: el calentamiento, que alarga el período de actividad de las plantas e incrementa su productividad, y la reducción de las disponibilidades hídricas, que actúa en sentido contrario. Las proyecciones del modelo Promes indican que el primero prevalecerá en el norte peninsular y en las montañas, en tanto que el segundo afectará principalmente a la mitad meridional. La "mediterraneización" del norte peninsular y la "aridización" del sur son las tendencias más significativas durante el próximo siglo. En el escenario más duro se detecta un desplazamiento de casi un piso bioclimático completo en la mayor parte del territorio, que se reduce casi a la mitad en el escenario más suave. Los desplazamientos de los límites climáticos actuales excederán para muchas especies sus capacidades de migración. Los impactos indirectos más importantes son los que se derivan de cambios edáficos, cambios en el régimen de incendios o del ascenso del nivel del mar. Las interacciones con otros componentes del cambio global (cambios de uso del territorio y de la composición atmosférica) acarrearán impactos significativos pero más inciertos. La modificación de las interacciones entre especies (competencia, asincronías, herbivoria, plagas, invasiones) constituyen otra fuente potencial de impactos sobre los que empiezan a acumularse evidencias, aunque las incertidumbres son grandes. La mayor vulnerabilidad se prevé en la vegetación de alta montaña, los bosques y arbustedas caducifolios sensibles a la agudización de la sequía estival, los bosques esclerofilos y lauroides del sur y sobre todo del suroeste peninsular, y la vegetación litoral. Las tendencias previsibles en la mayor parte del territorio confluyen en torno a la simplificación estructural de la vegetación y el predominio de las extinciones locales sobre las recolonizaciones, que correrán a cargo de especies tolerantes y de distribución relativamente amplia.

El papel ecológico de las plantas como productores primarios hace que los cambios en la flora y en la vegetación ejerzan influencias directas o indirectas en casi todos los sectores. Las pérdidas de diversidad florística tienen una relevancia especial en el caso español, puesto que nuestro país alberga una proporción muy elevada de la diversidad vegetal europea.

Evitar las pérdidas de biodiversidad causadas por los impactos del cambio climático, requiere respuestas globales. Las estrategias sectoriales que se elaboren requieren un marco geográfico más amplio que el de las administraciones regionales o locales de las que dependen en la actualidad. La red de espacios protegidos y la política de conservación son herramientas potenciales que deben revisarse. La restauración ecológica, la planificación y gestión forestal y la regulación de los usos ganadero y cinegético en sistemas forestales deben jugar un papel en la mitigación de los impactos previsibles. La ordenación del territorio debe incorporar la consideración de los impactos del cambio climático cuando menos para tratar de minimizar sus interacciones negativas con los cambios de uso del territorio y las modalidades de uso que pueden convertirse en insostenibles. La evaluación ambiental tiene que asumir también el nuevo marco de interacciones; las evaluaciones ambientales estratégicas deben extenderse para contribuir al cambio de perspectiva, en el que la educación ambiental tendrá que potenciarse para hacer asumibles las políticas sectoriales capaces de atenuar los impactos y para involucrar a las administraciones y a los ciudadanos en su desarrollo y aplicación.

La investigación sobre los impactos del cambio climático en la vegetación puede estructurarse en tres líneas principales e interconectadas: el seguimiento de los cambios en curso, las respuestas de las especies y comunidades a los cambios, y la elaboración de modelos predictivos, basados en la información suministrada por las anteriores y en las proyecciones climáticas, que permitan anticipar los cambios para adoptar en su caso medidas correctoras o paliativas de los impactos.

En lo que respecta a las actividades de seguimiento es conveniente impulsar la participación en las redes fenológicas, incluyendo la aerobiológica, y las posibilidades de aplicación de los datos dendrocronológicos y del empleo de la teledetección. Además, es necesaria la articulación de programas de seguimiento a largo plazo, sobre el terreno, de los cambios florísticos y de vegetación, apoyados en la red de espacios protegidos y representativos de la variedad biogeográfica y de hábitats española. La flora amenazada y la dinámica de la vegetación tras las perturbaciones deberíanintegrarse en estos seguimientos.

La investigación sobre las respuestas de las especies y comunidades al cambio climático es necesaria, en particular por lo que respecta a las modificaciones de las interacciones entre especies, la caracterización de grupos funcionales de plantas con similares respuestas al cambio climático y la articulación y evaluación de indicadores de los efectos del cambio climático sobre la diversidad vegetal.

El desarrollo de modelos predictivos de la dinámica de la diversidad florística bajo las presiones del cambio climático, representará la herramienta más elaborada para generar proyecciones, diseñar medidas paliativas y evaluar su eficacia. Se requiere todavía un esfuerzo en la optimización de las bases de datos sobre la distribución de la diversidad florística y vegetacional española. Los modelos deberán incorporar progresivamente resoluciones en las escalas de paisaje y regional, efectos de la fragmentación, capacidades de dispersión y migración, efectos indirectos del cambio climático e interacciones con otros componentes del cambio global.

5.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es evaluar los impactos del cambio climático sobre los componentes vegetales de la biodiversidad en España. La dimensión de las modificaciones del clima se ha basado en las proyecciones aportadas en el Capítulo 1. El concepto de biodiversidad que se ha considerado es el más divulgado, que fue propuesto en 1992 en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro: "la diversidad biológica es la variedad y variabilidad de todo tipo de los organismos vivos y de los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas" (CBD Secretariat 2001), y redefinido por Gitay *et al.* (2002) en términos de "los números y abundancias relativas de genes, especies y comunidades o ecosistemas". El conocimiento de esta variedad y variabilidad, incluso en territorios tan concretos como un país de las dimensiones del nuestro, dista de ser satisfactorio, como tampoco lo es el de los distintos componentes y niveles de complejidad que la conforman (Noss 1990, Heywood y Baste 1995, Purvis y Hector 2000), en las diferentes escalas espaciales susceptibles de ser analizadas. Por ello, una evaluación de las características requeridas por este Informe tiene que centrarse en aquellos componentes y niveles cuyo grado de conocimiento permite predecir razonablemente respuestas frente a cambios como los que se analizan. En lo que respecta a los componentes vegetales de la biodiversidad, se comentarán aspectos concernientes por una parte a la flora vascular, prestando particular atención a la flora endémica y amenazada, y por otra a la vegetación, como nivel más complejo e integrador de la diversidad vegetal.

La diversidad vegetal en España: flora vascular

El patrimonio vegetal español reúne una diversidad de especies muy relevante en el contexto europeo y mediterráneo. Cerca del 80% de las especies de plantas con flores que viven en la Unión Europea se hallan en nuestro país. Esta riqueza se debe no sólo a las dimensiones geográficas del territorio, sino a una combinación de factores entre los que se cuentan la intrincada orografía, la variedad de climas y microclimas, el mosaico de litologías y suelos y la posición geográfica. La estratégica ubicación de la Península Ibérica ha favorecido históricamente su riqueza florística, ya que en diferentes épocas pasadas ha ejercido el papel de nudo migratorio en el ascenso de la flora norteafricana hacia Europa, de confín occidental en la expansión de flora proveniente del suroeste de Asia y del Mediterráneo oriental, o de refugio meridional, a modo de fondo de saco, cuando los cambios climáticos asociados a las glaciaciones empujaban a la flora hacia los climas menos fríos del sur. La acumulación de contingentes florísticos de variada procedencia ha encontrado un marco adecuado para subsistir en la marcada heterogeneidad espacial y temporal propia de los ambientes mediterráneos (Blondel y Aronson 1999), caracterizados además por la incidencia recurrente de perturbaciones, tanto naturales como antrópicas, que han favorecido la coexistencia de especies con respuestas diferenciadas (Cowling *et al.* 1996, Lavorel 1999).

A pesar de la relevancia de la flora española por comparación con su entorno, carecemos todavía de una cifra precisa de las especies que la componen. Las estimaciones más recientes sitúan la flora vascular (helechos, gimnospermas y angiospermas) entre 8000 y 9000 especies o subespecies. De ellas habría unas 2200 en las islas Canarias (Santos 2001, Izquierdo *et al.* 2001), cerca de 1500 en Baleares y más de 7000 en la España peninsular (Médail y Quézel 1997).

El mapa de la Fig. 5.1 ilustra las pautas de la riqueza florística en el territorio ibero-balear. Está basado en las distribuciones de 1400 taxones expresadas en cuadrículas UTM de 10 km de lado, que suponen entre el 15-20% de la flora del territorio, cifrada entre 7500 y 8500 taxones (Castroviejo 1995, 2002).

Las montañas ibéricas emergen como las áreas de mayor diversidad, resultado que no debe sorprender atendiendo a la diversidad de hábitats que se concitan en ellas y a su menor grado de transformación antrópica (Castro *et al.* 1996). Sierra Nevada se destaca en primer lugar, con un 14% de las especies cartografiadas, seguida de varios enclaves de las cordilleras pirenaica, cantábrica, ibérica y central, así como de las montañas litorales catalano-valencianas y de los restantes macizos béticos. Las mesetas y las grandes cuencas endorreicas y fluviales interiores ofrecen la otra cara de la moneda, al ser extensiones muy transformadas desde antaño y sustentar menor variedad de hábitats para la flora. Los análisis efectuados sobre los patrones regionales de riqueza florística (Lobo *et al.* 2001, Rey Benayas y Scheiner 2002, Pausas *et al.* 2003) muestran que los principales factores determinantes están ligados a los componentes que definen la heterogeneidad ambiental (relieve, sustratos y climas). La riqueza se relaciona también positivamente con la temperatura y con las disponibilidades hídricas, aunque la importancia de esta relación varía de unos estudios a otros (Lobo *et al.* 2001, Pausas *et al.* 2003).

Esta imagen de la diversidad florística total se modifica cuando se examinan por separado sus diversas taxocenosis. La Fig. 5.2 muestra los patrones de riqueza de los pteridófitos (helechos y afines), un grupo de plantas vasculares con problemas particulares de conservación en el territorio ibero-balear. En este caso, a la importancia de las áreas de montaña, entre las que destaca la cadena pirenaica, se añade el factor de la oceanidad como condicionante de los patrones geográficos de riqueza.

La diversidad vegetal en España: flora vascular endémica, rara y amenazada

Además de por su riqueza florística total, España ha sido destacada como el país del entorno Mediterráneo y europeo que alberga el mayor número de endemismos (Médail y Quézel 1997, Gómez Campo 2002, tabla 5.1). Existe una relación directa entre el porcentaje de endemicidad y el grado de amenaza que sufre una flora. De hecho, el nivel de endemicidad en combinación con la sensibilidad frente a la pérdida de diversidad fueron los criterios empleados a la hora de designar *hot-spots* o “puntos calientes” de biodiversidad (Médail y Quézel 1999, Myers *et al.* 2000), entre los que se sitúan la cuenca mediterránea y las islas Canarias. Aunque hay endemismos vegetales españoles que ocupan una superficie amplia y no se hallan amenazados en absoluto, las altas densidades de endémicas muestran una correspondencia clara con las áreas más ricas en flora amenazada.

Las cifras que se barajan para las plantas vasculares endémicas ibero-baleares, incluyendo especies y subespecies, rondan el millar y medio (Pita y Gómez-Campo 1990, Moreno Saiz y Sainz Ollero 1992, Sainz Ollero y Moreno Saiz 2002). Aunque este número se incrementará a medida que progrese la elaboración de *Flora iberica*, puede estimarse que el porcentaje de endemicidad de la flora se mantendrá en torno al valor conocido del 15-20%, una de las cifras de exclusividad más elevadas en el entorno mediterráneo (Tabla 5.1). Las islas Canarias, con unos 550 endemismos (20% de la flora total y cerca del 30% de la flora autóctona), ostentan una situación privilegiada que deriva de su antiguo aislamiento biogeográfico, de la escasa incidencia de las glaciaciones pleistocenas y de un abrupto relieve que da lugar a variados hábitats y climas.

Los análisis efectuados sobre las áreas con más especies estenócoras vuelven a señalar a Sierra Nevada, y en particular la cuadrícula del Veleta, como el territorio de mayor diversidad de flora vascular, seguida de algunos puntos de Ibiza, sierra de Algeciras, macizo de Segura-Cazorla y un rosario de enclaves salpicados a lo largo de las sierras béticas (Castro *et al.* 1996).

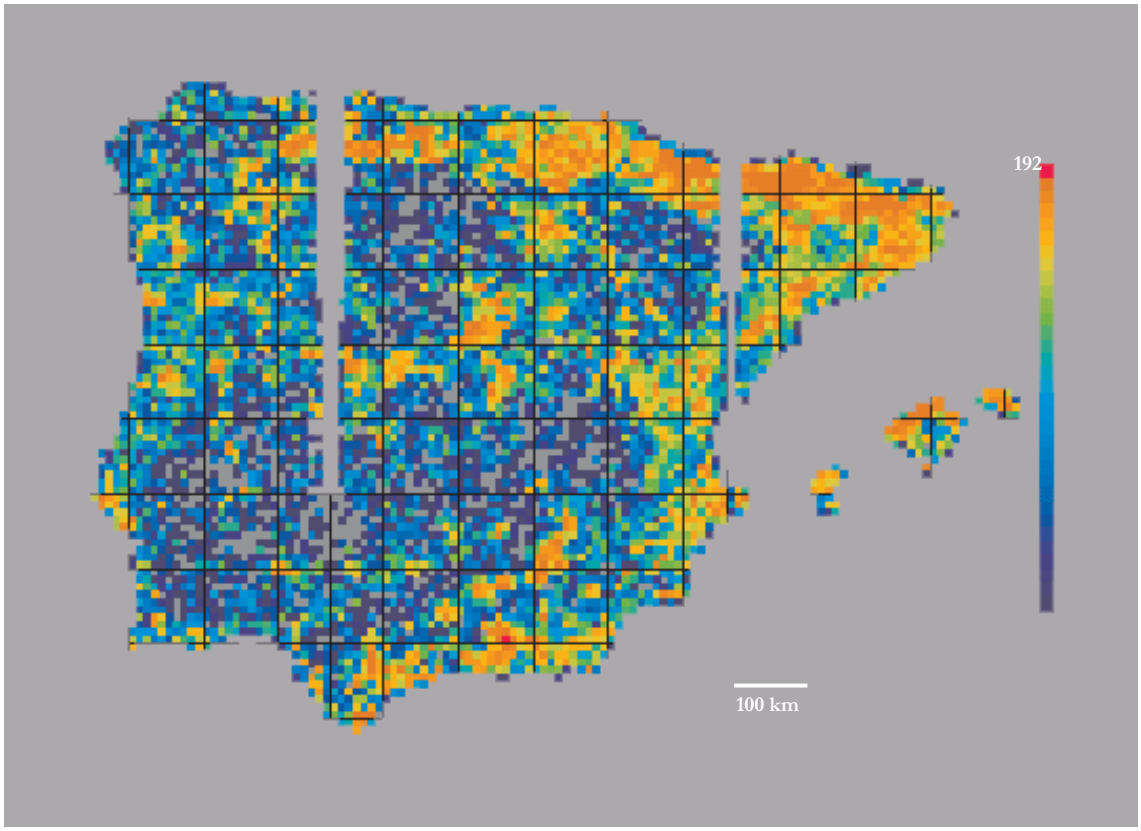


Fig. 5.1. *Patrones de riqueza de la flora vascular en la Península Ibérica (basado en la compilación de los mapas de distribución de 1400 taxones)*.

Tabla 5.1. *Número de especies de plantas vasculares y de endemismos en España y países vecinos (ampliado a partir de Médail y Quézel 1999).*

País	*Nº de especies*	*Nº de endemismos*
Antigua Yugoslavia	5000	320
Argelia	3150	320
España	8000-9000	1300-1500
Francia	5000-6000	900
Grecia	5500	1100
Islas Británicas	1443	17
Italia	5600	730
Marruecos	4200	900
Portugal	2600	114
Túnez	1800	40

En total, dos tercios de las especies incluidas en el Libro Rojo de la flora vascular amenazada española (Bañares *et al.* 2003) son endemismos (321 sobre 478; Moreno Saiz *et al.* 2003a). Su distribución remarca el elevado número de especies estenócoras presentes en las islas o en las montañas peninsulares. En el mapa de la Fig. 5.3 se han representado las cuadrículas UTM de 10 km de lado en las que se han detectado poblaciones de alguno de los taxones incluidos en

el Libro Rojo. De las aproximadamente 5600 cuadrículas de dicho tamaño que cubren España, un total de 727 albergan algún taxón de los tratados. Su distribución muestra claras similitudes con el mapa provincial de las especies más amenazadas presentado en la Lista Roja (Aizpuru *et al.* 2000).

Las islas Canarias, por lo que a su originalidad florística se refiere, han sido consideradas como un "*mini-hotspot*" de biodiversidad (Mittermeier *et al.* 1999), con porcentajes de endemicidad en torno al 30% si se tiene en cuenta sólo la flora autóctona (Santos 2001, Machado 2002) y con la gran mayoría (58%) de sus endemismos restringidos a una sola isla (Humphries 1979, Izquierdo *et al.* 2001). El mapa de las 171 especies canarias incluidas recientemente en el Libro Rojo (Fig. 5.3) muestra que prácticamente no hay cuadrícula canaria sin al menos una especie vegetal en riesgo de extinción (Moreno Saiz *et al.* 2003a).

El archipiélago balear cuenta asimismo con especies en peligro y en peligro crítico en todas las islas, aunque con una densidad de ocupación menor que en Canarias. Las islas Pitiusas (Ibiza y Formentera) tienen una representación relativamente copiosa, así como la Serra de Tramuntana y algunos puntos de la costa mallorquina. Este patrón coincide con los últimos estudios sobre la flora balear rara y amenazada o la protegida por la Directiva Habitat (Domínguez Lozano *et al.* 1996, Sáez y Roselló 2001, Bañares *et al.* 2003). Sobre la importancia de las islas en general, y de los riesgos que gravitan sobre su flora, da buena prueba el hecho de que puedan reconocerse en el mapa 5.1.3, pese a su reducida superficie, las islas Columbretes, la de Alborán y las del Parque Nacional de las Islas Atlánticas de Galicia, todas ellas con especies en peligro de extinción.

Respecto a la España peninsular, la Fig. 5.3 remarca la importancia de las montañas béticas y de la costa levantina para la flora amenazada. Las sierras béticas concentran no sólo los mayores porcentajes de endemicidad peninsular sino también los máximos niveles de estenocoria, con numerosas especies diferenciales de sus diversos núcleos orográficos (Sainz Ollero y Hernández Bermejo 1985, Castro *et al.* 1996, Blanca *et al.* 1998, 1999). Es llamativo el elevado número de cuadrículas con flora amenazada en la costa y las montañas gallegas, densidad que no había sido anticipada por análisis previos (Moreno Saiz y Sainz Ollero 1992), y que tampoco ha tenido un reflejo proporcionado en la legislación conservacionista española o europea (Domínguez Lozano *et al.* 1996). Los otros territorios eurosiberianos peninsulares quedan más desdibujados o están representados sólo por taxones vulnerables, como sucede en algunos tramos de las cordilleras Cantábrica y Pirenaica.

Las mesetas centrales ibéricas son las áreas con menor número de plantas amenazadas. Esto se explica en buena parte porque han sido alteradas desde muy antiguo y han perdido por tanto su naturalidad, pero en parte también porque son espacios con baja endemicidad (Moreno Saiz y Sainz Ollero 1993). En cualquier caso, hay que destacar la considerable dispersión geográfica que muestran las cuadrículas en las que se han detectado especies amenazadas. Hasta 80 taxones del Libro Rojo están presentes en una sola cuadrícula UTM de 1 km^2 en toda España; para muchas de ellas ésta es toda su distribución mundial, puesto que son endémicas. Sólo 138 taxones tienen un área de distribución repartida entre diez o más cuadrículas.

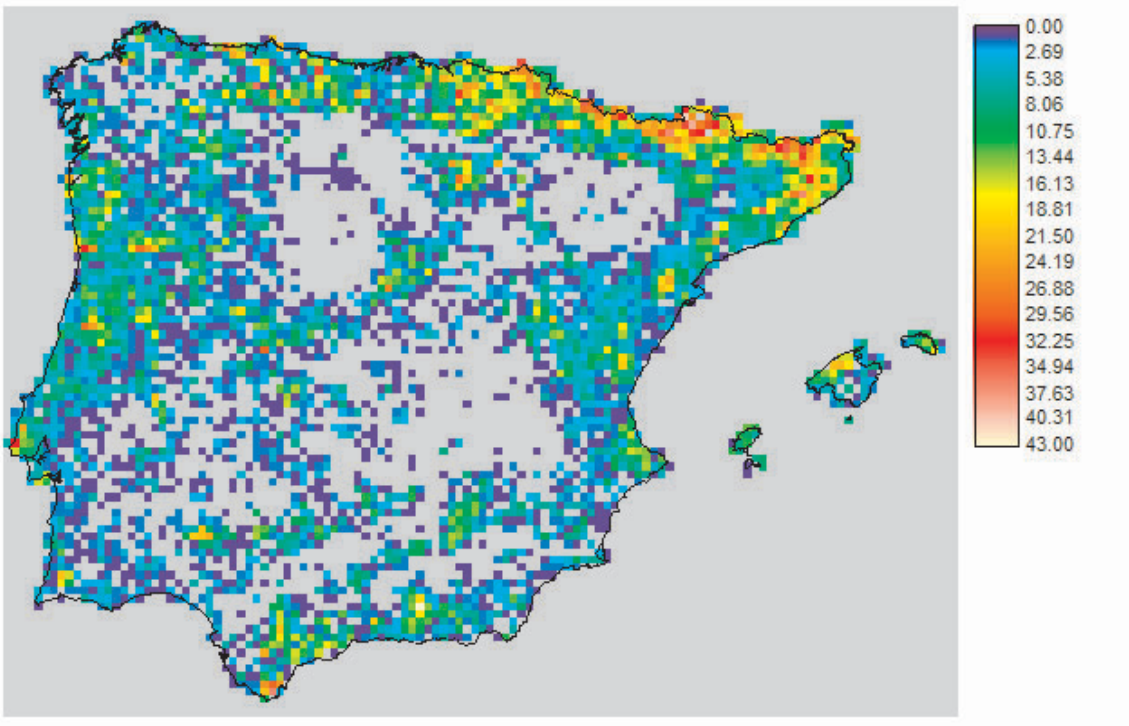


Fig. 5.2. *Patrones de riqueza florística de los helechos en cuadrículas de 10 km de lado para la Península Ibérica (Moreno Saiz y Lobo en preparación).*

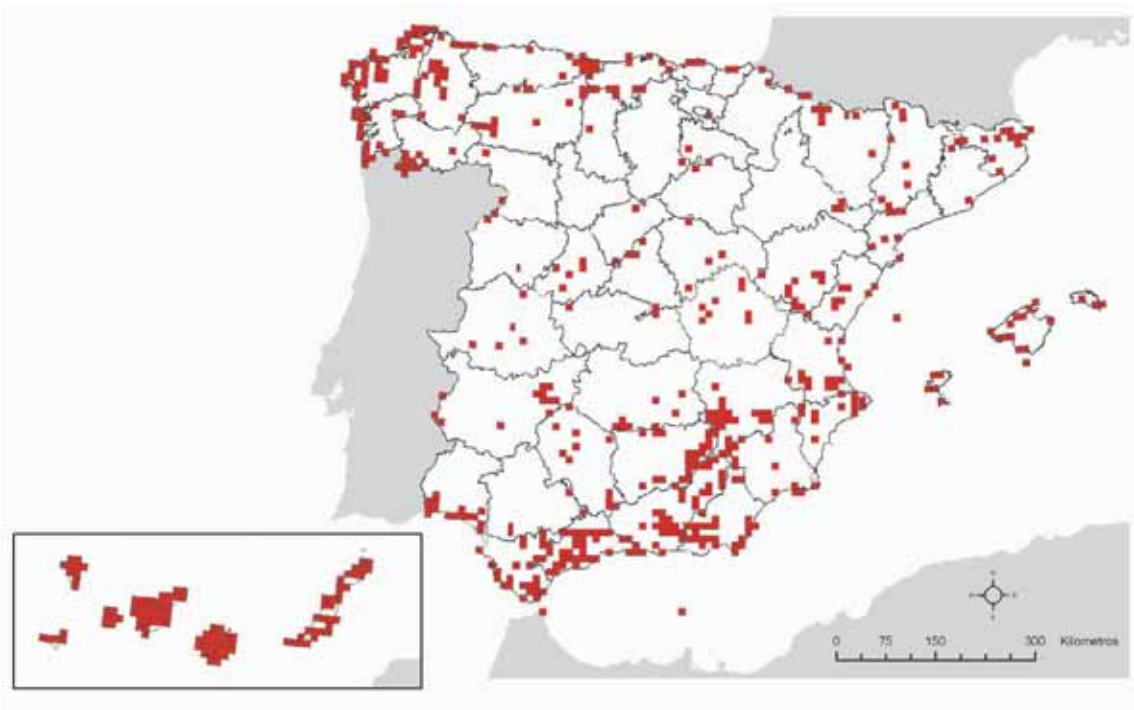


Fig. 5.3. *Cuadrículas de 10 km de lado en las que se han detectado poblaciones de especies amenazadas (Bañares et al. 2003).*

Los endemismos ibero-baleares están en conjunto más relacionados con etapas intermedias de la sucesión, aparte de sustratos particulares y biotopos propios de los relieves de montaña, que con las comunidades tardo-sucesionales (Montserrat y Villar 1973, Gómez Campo *et al.* 1984, 1987, Laguna 1999, Melendo *et al.* 2003).

La diversidad vegetal en España: tipos de vegetación

La vegetación española se cuenta también entre las más variadas del continente europeo. Cerca del 90% de las clases de vegetación admitidas en las clasificaciones europeas al uso se hallan representadas en España (Mucina 1997, Rivas-Martínez *et al.* 2001, 2002). Las recopilaciones recientes reconocen más de 2000 asociaciones vegetales en la Península Ibérica y sus archipiélagos, cuya diversificación permite evaluar la diversidad interna de los territorios y la diferenciación geográfica de los cortejos florísticos respectivos.

Entre los patrones principales que se reconocen en la distribución de la mayoría de los tipos de vegetación terrestre peninsular se halla en primer término el gradiente norte-sur de sequía de verano, que marca la separación entre la vegetación eurosiberiana, exigente en disponibilidad hídrica estival, y la mediterránea. El norte y el noroeste peninsular, incluyendo las cordilleras Pirenaica, Cantábrica y sus estribaciones galaicas, están dominados en la actualidad por la primera, que extiende sus representaciones de forma fragmentaria a lo largo de los sistemas montañosos de la mitad norte. A la región Mediterránea se adscriben biogeográficamente las cinco sextas partes de la superficie española. Un segundo factor determinante para la vegetación es la naturaleza geológica, que separa los sustratos silíceos predominantes en la mitad occidental de los ricos en bases que conforman la mayor parte del levante y sur peninsular (Loidi 1999). La existencia de sustratos minoritarios particulares (yesos, dolomías, rocas ultrabásicas, etc.) se ha destacado entre los factores que han promovido la endemicidad de la flora (Gómez-Campo *et al.* 1984, Gómez Campo 1985, Heywood 1995). La complejidad del relieve introduce gradientes climáticos altitudinales y efectos de barrera asociados que acentúan la diferenciación biogeográfica, en la que es destacable la orientación transversa de los principales sistemas montañosos, que, si ha dificultado las migraciones meridianas, también es cierto que ha favorecido los empaquetamientos de especies en final de área o a lo largo de ecotonos. Entre los efectos climáticos inducidos por el relieve se cuentan las dos principales áreas semiáridas peninsulares, la depresión del Ebro y el sureste ibérico; en este último territorio destaca la riqueza en plantas de distribución ibero-norteafricana (Alcaraz *et al.* 1991). Por último, la insularidad alcanza su máxima expresión en la originalidad de la flora y la vegetación canarias; esta última cuenta con varias clases de vegetación endémicas o compartidas con los archipiélagos vecinos (Rivas-Martínez *et al.* 1993). La sectorización biogeográfica del territorio español se ajusta a estos factores (Rivas-Martínez y Loidi 1999a, 1999b, Rivas-Martínez *et al.* 2002).

Los principales tipos estructurales de la vegetación peninsular que consideraremos en este Informe se resumirán en el apartado 5.3.3, junto con la evaluación de los correspondientes impactos del cambio climático. La vegetación de riberas y humedales se ha tratado en el Capítulo 4 del Informe.

Impactos recientes sobre la diversidad vegetal

La vegetación española actual, salvo en muy contados y reducidos enclaves, es, como la de la mayor parte de Europa, el resultado de una larga historia de intervenciones humanas que en parte se han superpuesto a los últimos cambios climáticos pasados, de los que el episodio más reciente habría sido la Pequeña Edad del Hielo (PEH). Entre estas intervenciones se cuentan extensas deforestaciones, masivas o selectivas, que, junto con la extracción de leña o madera,

alcanzarían su apogeo a principios del siglo pasado; y la implantación de usos agrícolas y ganaderos con las transformaciones asociadas. Los paisajes modelados por estos usos del territorio, interfiriendo con una vegetación compleja y sólo parcialmente ajustada a los últimos avatares climáticos, ha debido sin duda suprimir aquellos componentes de la diversidad menos tolerantes, pero a la vez ha contribuido al mantenimiento en coexistencia de otros componentes que hoy caracterizan buena parte de la biodiversidad de los paisajes europeos en general y de los mediterráneos en particular.

Durante los últimos decenios se han registrado otros impactos sobre la vegetación que forman parte del denominado cambio global y que están contribuyendo activamente al deterioro de la biodiversidad. En España son destacables en primer término los cambios de uso del territorio, motivados tanto por el abandono rural como por la intensificación de las explotaciones. El abandono de las tierras agrícolamente menos productivas (casi un 2% en el último decenio, una sexta parte de las cuales ha cambiado su uso por la construcción urbana y de infraestructuras), junto con la reducción o abandono de las prácticas ganaderas extensivas y de la extracción de leña y carbón, han favorecido la extensión de matorrales y de ciertos pastos seminaturales, y el crecimiento de las masas forestales, al que han contribuido también las políticas de reforestación (más de 4 Mha en los últimos 40 años). La acumulación subsiguiente de necromasa vegetal combustible en los montes ha fomentado la incidencia y la propagación de incendios, como se explica en el Capítulo 12. La intensificación de usos actúa por su parte disminuyendo la diversidad biológica, al fomentar procesos de eutrofización y contaminación, erosión y desertificación, reducción y fragmentación de ciertos hábitats en unos casos y homogeneización de los paisajes en otros, etc. Además, la transformación antrópica y el desarrollo del comercio y los transportes se considera que están favoreciendo la introducción de especies exóticas y con ello las oportunidades para el desencadenamiento de invasiones biológicas. Este cúmulo de factores no ha producido todavía extinciones de la flora vascular tan considerables como en otros grupos biológicos (Greuter 1991, 1994), aunque debe estar contribuyendo a incrementar las proporciones de flora amenazada.

Paralelamente, los últimos decenios han visto incrementarse el número y la extensión de espacios naturales protegidos, que actualmente representan cerca de un 6% de la superficie nacional (Gómez-Limón 2000, Reyero 2002), pero que se elevarán al 23% con las Zonas Especiales de Conservación que se establezcan en el marco de la Directiva Hábitat (Orella 1999, Morillo y Gómez-Campo 2000). La distribución de esta futura red de espacios protegidos (Orella 1999) se concentra en las áreas de montaña y deja huecos importantes en las llanuras y depresiones interiores, así como en muchos tramos del litoral; las desigualdades entre territorios administrativos son igualmente notorias.

La coincidencia en el tiempo de estos cambios en los usos del territorio con los primeros síntomas esperables de los efectos del cambio climático hace particularmente complicado deslindar los correspondientes impactos. Los cambios de uso, y singularmente el abandono, favorecen en unos casos la extensión de tipos de vegetación mas competitiva, y en otros pueden evidenciar ahora ajustes de la vegetación a cambios climáticos recientes, que no se habían podido expresar mientras la presión de uso se mantenía. En el caso de la flora y la vegetación hay que considerar, además, la superposición de otros efectos derivados de cambios en la composición atmosférica con influencias directas sobre las plantas, como los incrementos de CO_2, ozono troposférico, aerosoles, deposición atmosférica de óxidos de nitrógeno, etc.

En la elaboración del Atlas y Libro Rojo de la Flora Amenazada (Bañares *et al.* 2003) se llevó a cabo una evaluación individualizada de los factores de riesgo para cada una de las 2223 poblaciones detectadas, que permite analizar las amenazas reconocidas para el componente más vulnerable de la flora. Las respuestas extraídas del trabajo de campo se sintetizan en la Tabla 5.2. Aunque el nivel de detalle haya sido ahora mayor (poblaciones en lugar de taxones),

los factores de riesgo más citados coinciden en general con los que ya se habían indicado anteriormente (Gómez Campo *et al*. 1996, Domínguez Lozano *et al.* 1996). Sea como amenaza verificada o como riesgo potencial, el sobrepastoreo es el factor más citado (casi el 40% de las poblaciones), seguido de cerca por la artificialización de los terrenos, la recolección tradicional y el coleccionismo, o el desplazamiento competitivo por otras especies vegetales. Asimismo, los autores apuntan a que la reducción, fragmentación y degradación de los hábitats naturales y seminaturales conforman los principales riesgos para la persistencia de las especies. Llama la atención, sin embargo, que la competencia de plantas exóticas introducidas o el cambio climático no se hayan considerado entre las amenazas recurrentes para un número elevado de especies (Moreno Saiz *et al.* 2003b). Este último, no obstante, se ha apuntado como factor de amenaza en Sierra Nevada y en Canarias (Blanca *et al.* 2002, Marrero *et al.* 2003).

Entre los riesgos potenciales sobre los que se interrogaba en el Libro Rojo, las respuestas de la tabla muestran gran coincidencia en señalar muchas de las perturbaciones asociadas al cambio climático o susceptibles de agudizarse con él (Houghton *et al.* 2001): sequías, incendios, temporales, avenidas y otros riesgos geológicos. Aunque estas perturbaciones son consustanciales a la mayoría de los ecosistemas de los que forman parte los endemismos y la flora amenazada, su presumible mayor incidencia futura bajo los escenarios de cambio climático disponibles constituye un factor cierto de riesgo para la diversidad florística.

Tabla 5.2. *Amenazas y riesgos potenciales más citados para la flora vascular amenazada incluida en el Libro Rojo español, expresados como proporción del número total de poblaciones muestreadas (2223) de las 478 especies consideradas (Moreno Saiz et al. 2003a).*

Amenazas	Nº de poblaciones afectadas	% respecto al total (2223)
Amenazas debidas a acciones humanas		
Pastoreo	851	38
Pisoteo y artificialización	656	30
Coleccionismo o recolección tradicional	426	19
Amenazas de origen biótico		
Competencia vegetal natural	493	22
Predación	475	21
Escasa plasticidad ecológica	441	20
Pobre estrategia reproductiva	224	10
Amenazas debidas al tipo de desarrollo		
Obras de acondicionamiento	527	24
Construcción de nuevas vías de comunicación	324	15
Urbanización	210	9
Amenazas indirectas		
Mejora de la accesibilidad en vehículo	398	18
Mejora de la accesibilidad a pie	328	15
Mejora de la accesibilidad a terrenos próximos	239	11
Accidentes potenciales debidos a:		
Sequías	1192	54
Desprendimientos	995	45
Incendios	806	36
Temporales	696	31
Inundaciones y avenidas	499	22
Corrimientos	475	21
Actividad volcánica	448	20
Aludes	426	19

5.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

5.2.1. Relaciones actuales entre el clima y la vegetación

Las relaciones entre los elementos del clima y la estructura de la vegetación, la productividad primaria o las áreas de distribución de las plantas, han constituido uno de los temas clásicos de la literatura geobotánica (Woodward 1987, Woodward y Williams 1987, Blasi 1996, Fernández-González 1997). Numerosos autores han propuesto clasificaciones del clima que tratan de ajustar las últimas a los valores de los primeros, derivados en general de registros meteorológicos estandarizados. Casi todas estas clasificaciones coinciden en la importancia de las variables térmicas (temperaturas medias o mínimas, temperatura positiva o sumatorios de temperatura, duración del periodo de actividad vegetativa, etc.), por una parte, y de las variables relacionadas con las disponibilidades hídricas anuales o estacionales (precipitación, balance hídrico, índices ombrotérmicos), por otra, a la hora de ajustar climáticamente las áreas de distribución de las plantas o los tipos de vegetación. Los análisis multivariables de estas relaciones reflejan resultados similares (Moreno *et al.* 1990, Gavilán y Fernández-González 1997, Gavilán *et al.* 1998). Aunque los ajustes obtenidos son principalmente correlacionales, se han elaborado modelos generales capaces de predecir a nivel global la distribución de los principales tipos fisonómicos de vegetación (Box 1981, 1996, Woodward 1987, 1992, Prentice *et al.* 1992, Haxeltine *et al.* 1996), que prueban la existencia de relaciones causales, entre las que las más evidentes se derivan de la tolerancia de las plantas a las temperaturas extremas, la duración mínima del período vegetativo, o el ajuste del ciclo vital y la dependencia de la productividad con respecto a las disponibilidades energéticas e hídricas.

En España, una de las clasificaciones climáticas más detalladas disponible, sobre todo en lo que se refiere a su relación con los tipos de vegetación, es la desarrollada por Rivas-Martínez y colaboradores (1997, 1999, 2002, www.globalbioclimatics.org). En esta clasificación se utilizan distintos índices ombrotérmicos estivales para separar los climas mediterráneos de los templados (sin déficit hídrico de verano), y se definen los pisos bioclimáticos correspondientes a cada tipo de macroclima mediante temperaturas positivas acumuladas (termotipos) y cocientes ombrotérmicos anuales (ombrotipos). Las unidades de esta clasificación se aplicarán en el apartado siguiente (5.3.2 y 5.3.3) a la evaluación de las proyecciones de cambio climático.

Mientras que las clasificaciones mencionadas se basan en las regularidades del clima, sus irregularidades, las fluctuaciones climáticas interanuales (Rodó y Comín 2001), merecen especial atención por sus efectos en las tasas de reproducción (Herrera 1998), reclutamiento y mortalidad de las plantas (Moreno *et al.* 1999, Quintana *et al.* 2004), en el régimen de perturbaciones (Capítulo 12) y en la dinámica de la diversidad de las comunidades (Figueroa y Davy 1991, Peco *et al.* 1998). Este tipo de efectos, documentados en diferentes tipos de hábitats y especies, aunque con mucho menor detalle, se superponen a los inducidos por las tendencias del cambio climático, pudiendo interferir con ellos e incluso oscurecerlos (Hulme *et al.* 1999).

5.2.2. Cambios climáticos pasados y cambios en la vegetación

Desde la aparición de los climas de tipo mediterráneo, hace entre 3.2 y 2.3 MaBP (Suc 1984), los cambios climáticos se han convertido en norma durante el Pleistoceno, que a lo largo de sus dos millones de años ha registrado entre cuatro y seis ciclos principales de glaciaciones interrumpidas por otros tantos períodos interglaciares, éstos más cálidos, en general más húmedos y casi diez veces más breves en conjunto que aquéllas. Se ha estimado que durante los períodos glaciares la temperatura global del planeta descendió entre 6-8 ºC, y más acusadamente en las latitudes boreales y polares que en las tropicales; no obstante, estos períodos parecen haber estado caracterizados por grandes irregularidades climáticas.

En la cuenca mediterránea el frío parece que afectó a las temperaturas invernales más que a las estivales (Prentice *et al.* 1992). Aparte del desarrollo de grandes casquetes de hielo en latitudes altas y medias, el nivel del mar descendió (180 m en el Mediterráneo durante el apogeo de la última glaciación, hace 18000 años), y también la precipitación global, por disminución del montante de vapor de agua atmosférico, aunque las evidencias a este respecto son más confusas y posiblemente las variaciones regionales y estacionales (Prentice *et al.* 1992) hayan sido considerables.

Los efectos de las glaciaciones sobre la flora y la vegetación se tradujeron en migraciones hacia latitudes más bajas y extinciones locales o regionales. Durante los períodos interglaciales la flora, acantonada en refugios meridionales, avanzó en latitud, con velocidades diferentes según especies y períodos, comprendidas, en el caso de los árboles holárticos, entre 5-50 km/siglo para la mayoría de las especies zoócoras y hasta (10)50-200 km/siglo para las anemócoras (Huntley y Birks 1983, Huntley 1991). *Pinus, Corylus* (150 km/siglo) y *Alnus* (hasta 200 km/siglo) se hallan entre los géneros más rápidos. La recomposición de la vegetación tuvo dimensiones diferentes según la latitud, puesto que en los territorios boreales y templados septentrionales se produjeron recolonizaciones tras la retirada de los hielos, mientras que en latitudes templadas medias predominaron los desplazamientos (latitudinales y en muchos casos también longitudinales), y en latitudes templadas meridionales procesos de acumulación de especies, además de sus movimientos altitudinales, favorecidos por el rejuvenecimiento del relieve en estos territorios durante la orogenia alpina. Las extinciones afectaron principalmente a la flora de carácter tropical que hasta finales del Terciario había predominado en las latitudes medias. Tras los dos primeros ciclos de glaciaciones la casi totalidad de este contingente se había extinguido en Europa, donde la orientación transversa de los principales sistemas montañosos dificultó las migraciones meridianas más que en otros continentes. Se conocen mal los cambios ocurridos durante los períodos interglaciales anteriores, pero en algunos los pulsos mediterráneos parece que fueron importantes (Pons y Quézel 1985); hay evidencias de que en el interglacial anterior se alcanzaron temperaturas superiores hasta en 4 ºC a las actuales. Aunque la duración del Cuaternario ha sido breve en términos evolutivos, los procesos de especiación han debido ser relevantes y han estado fomentados, aparte de por las variaciones climáticas, por la fragmentación de las áreas de las especies en los territorios de refugio, la diversidad orográfica y litológica de éstos y los procesos de poliploidía, que han operado de forma efectiva en distintos grupos de angiospermas durante las recolonizaciones interglaciales. Por lo que a la cuenca mediterránea respecta, la especiación ha sido mucho más activa entre los elementos mediterráneos “modernos” que entre los “pre-mediterráneos”. De este modo, los periodos glaciales han sido los más efectivos a la hora de determinar extinciones, y los que han aportado el tiempo evolutivo necesario. Durante los interglaciales han tenido lugar principalmente procesos de redistribución de la flora, en los que el litoral, los valles y las montañas han desempeñado un importante papel como áreas de refugio y vías de migración.

Desde el apogeo de la última glaciación, hace unos 18000 años, el clima se ha atemperado progresivamente pero de un modo no uniforme, ni temporal ni espacialmente. En las fases iniciales (14000-10000 aBP) se registraron episodios de calentamiento agudos, en algunos de los cuales se aprecian expansiones importantes de la vegetación esclerofila (Pons y Reille 1988, Burjachs y Juliá 1994), interrumpidos por enfriamientos súbitos como los del Dryas antiguo y reciente, que pudieron tener lugar en plazos tan cortos como un par de siglos. La deglaciación final se inicia seguidamente, a lo largo del Holoceno, con modificaciones térmicas moderadas pero importantes cambios en la pluviosidad (Pérez-Obiol y Julià 1994, Burjachs *et al.* 1997, Jalut *et al.* 1997, 2000, Davis *et al.* 2003). Durante el primer cuarto del Holoceno se asiste a un calentamiento progresivo pero en un marco de precipitaciones moderadas, al menos en el Mediterráneo occidental. En el segundo cuarto (aprox. 7500-5000 aBP) se registra un incremento considerable de las precipitaciones; las temperaturas pudieron superar a las actuales en hasta 2 ºC durante las fases más cálidas. En el tercer cuarto, hasta los 2500-2000

aBP, la pluviosidad disminuye, sobre todo en la mitad meridional y oriental de la Península, así como en el norte de África (Cheddadi *et al.* 1998); en cambio, en Europa y en el norte peninsular sólo se detecta un enfriamiento moderado. Desde mediados del Holoceno, sobre todo en las comarcas litorales, se manifiestan los primeros impactos sobre la vegetación del hombre neolítico, que se generalizarán también en el interior durante los últimos dos millares de años, a la par que prosiguen las tendencias anteriores con oscilaciones menores, como los episodios fríos y cálidos medievales o la Pequeña Edad del Hielo.

Los cambios en la vegetación, documentados principalmente a través de los registros paleopalinológicos, han respondido con desfases diversos entre territorios a estas oscilaciones del clima, que no debieron ser uniformes. En Europa, los primeros calentamientos postglaciales promovieron el desplazamiento de las tundras, hasta entonces dominantes, hacia el norte y las altas montañas, y la expansión, primero, de pinos y abedules, seguidos a continuación de avellanos y otras fagáceas caducifolias. Tendencias similares se registran en el norte de la península (Peñalba 1994, Allen *et al.* 1996); en cambio, en el mediterráneo occidental, las estepas y bosques abiertos de coníferas (*Pinus* y *Juniperus*) que dominaban los paisajes tardiglaciales (Pons y Reille 1988, Pérez-Obiol y Julià 1994) se mantuvieron relativamente firmes durante el primer cuarto del Holoceno. Sólo a partir de entonces se producen migraciones progresivas de elementos tanto caducifolios como esclerofilos, más lentas y tardías en el sur, hasta que con el incremento de las precipitaciones se asiste a una expansión importante de las distintas formaciones forestales caducifolias. Los bosques y elementos mesofíticos empiezan a retraerse a favor de la vegetación esclerofila y en general xerofítica a partir de mediados del Holoceno, cuando, sobre todo en la mitad meridional, se acentúa la aridización, y el clima mediterráneo adquiere su extensión actual en la cuenca. En el norte peninsular, en cambio, la “mediterraneización” ha sido nula o muy moderada, puesto que la expansión del haya se prolongaría hasta el último cuarto del Holoceno (Peñalba 1994).

Los análisis paleopalinológicos recogen sólo una pequeña fracción de las especies involucradas en los cambios, pero ponen de manifiesto que las respuestas de la vegetación a las oscilaciones climáticas alternan fases relativamente lentas, que llegan a prolongarse durante varios siglos, en las que se producen las migraciones y operan mecanismos de resistencia al cambio de la vegetación ya instalada; y fases de cambio de la dominancia que pueden ser muy rápidas, sobre todo cuando se producen sinergias con ciertas perturbaciones u otras causas que quiebran la resistencia de las especies hasta entonces dominantes. Por ejemplo, cambios en el régimen pírico asociados a intensificaciones de la aridez, y a intervenciones antrópicas en ciertos casos, han acelerado la sustitución de bosques caducifolios por vegetación esclerofila o bosques de coníferas, o las alternancias entre estos dos últimos, en diversas áreas del sur y este peninsular (Riera y Esteban 1997, Carrión *et al.* 2001a, 2001b, 2003). Estos cambios rápidos de dominancia pueden tener lugar en menos de un siglo, una vez producida la inmigración. También son rápidas las expansiones de vegetación herbácea y leñosa asociadas a las transformaciones antrópicas del territorio por usos ganaderos o agrícolas, que se han superpuesto a los cambios ambientales de los últimos milenios complicando su interpretación (Pons y Quézel 1985, Reille y Pons 1992, Carrión *et al.* 2001a, 2001b, Carrión 2002). Los procesos de migración han sido probablemente más limitados en los territorios mediterráneos que en latitudes más septentrionales (Huntley 1991), debido a la abundancia de refugios y a los obstáculos fisiográficos. Por ello, y dentro del marco de las respuestas individualistas de las especies a los cambios climáticos (Moore 1990, Graham y Grimm 1990, Huntley 1991), se han producido una serie de redistribuciones de la flora que han determinado la fuerte compartimentación geográfica actual que muestran muchos tipos de comunidades vegetales.

5.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

5.3.1. Tipos de impactos previsibles sobre la flora y la vegetación

Como se ha documentado en el Capítulo 1, los registros meteorológicos de los últimos decenios empiezan a mostrar señales claras del cambio climático en España, aunque todavía difíciles de resolver con la necesaria nitidez espacial y temporal. La señal térmica es más clara, con un ascenso estimado para el último tercio de siglo de entre 0.3 y 0.6ºC por década, con divergencias notables entre territorios, estaciones del año y temperaturas máximas o mínimas. Las señales de cambio pluviométrico son más confusas debido a sus complejos patrones de variabilidad espacial y temporal (inter e intra-anual). Parece haber evidencias de un descenso de las precipitaciones en la mayor parte de la península exceptuando el norte y noroeste, donde sin embargo la precipitación invernal podría haber disminuido también. No puede afirmarse, sin embargo, que esté incrementándose globalmente la variabilidad interanual, aunque se han detectado síntomas tanto de una mayor variabilidad pluviométrica en el sur y el sudeste como de una mayor concentración estacional de las lluvias. El análisis de series dendrocronológicas sugiere un incremento de la variabilidad térmica y pluviométrica durante el último siglo (Manrique y Cancio 2000). También se han señalado reducciones locales de la innivación y de la cobertura nival. En conjunto, esta señal meteorológica se traduce en un calentamiento medio de 1-1.5ºC, equivalente a un ascenso potencial de unos 200 m en los límites altitudinales de muchas especies.

5.3.1.1. Impactos directos

Las proyecciones de cambio climático para finales de siglo en el suroeste de Europa, documentadas en el Capítulo 1, apuntan en la dirección de un ascenso general de las temperaturas, con ciertas diferencias estacionales significativas; una reducción de las disponibilidades hídricas, motivada por el calentamiento y por la disminución y la redistribución estacional de las precipitaciones; y un aumento de la variabilidad climática, sobre todo en el régimen térmico y en lo que se refiere a los eventos extremos de calor, aunque no claramente en el régimen pluviométrico.

Las consecuencias directas de la elevación de temperatura para las plantas suponen, en principio, la ampliación del periodo de actividad vegetativa, al disminuir las restricciones provocadas por las bajas temperaturas, y, en ausencia de limitaciones hídricas, el incremento de la actividad biológica y por tanto de la productividad potencial. El ajuste de las fases del ciclo de desarrollo de las plantas al nuevo régimen de temperaturas conllevará cambios fenológicos, tanto en las especies silvestres como en las cultivadas, entre los que los más fácilmente esperables se refieren al adelanto de las fechas de foliación, floración y fructificación, o el retraso de la abscisión foliar en las especies caducifolias de invierno. No obstante, son esperables respuestas diferentes entre especies y entre procesos, puesto que los mecanismos de control termoperiódico y su importancia relativa frente a otros tipos de controles (fotoperíodo, hidroperíodo) son variables, así como la plasticidad fenotípica (Kramer 1995). Por ello, no todas las especies podrán aprovechar por igual la ampliación del periodo térmico de actividad (Körner 1994, 1995b), lo que supondrá modificaciones en las relaciones competitivas. En contrapartida, el adelanto fenológico conlleva un mayor riesgo de exposición a posibles heladas tardías, que pueden revestir importancia sólo en zonas de montaña, puesto que su incidencia general se reducirá. Por otra parte, el calentamiento abre, para las especies que puedan rentabilizarlo, la posibilidad de adentrarse en territorios de los que se hallaban excluidas por sus condiciones térmicas. Estas expansiones en sentido latitudinal o altitudinal serán más efectivas en la medida en que los hábitats de nueva ocupación no estén ya ocupados por otras especies, o lo estén por especies competitivamente inferiores. No obstante, para ciertas plantas, sobre todo de climas fríos (altas latitudes o altitudes), el calentamiento puede implicar la inhibición de fases del ciclo vital inducidas por bajas temperaturas (Körner

1995b, Larcher 1995), con afecciones para la viabilidad de las poblaciones afectadas, que podrían experimentar retracciones importantes. Las evidencias sobre modificaciones fenológicas inducidas por el cambio climático se comentarán en el apartado 5.8.

Las consecuencias directas de la reducción de las disponibilidades hídricas son parcialmente opuestas a las anteriores, puesto que implican disminuciones de la productividad potencial corroboradas en las mismas proyecciones de cambio climático (Capítulo 1). El ascenso paralelo de las temperaturas reducirá todavía más la productividad primaria neta, al incrementar las tasas de respiración. Esta tendencia favorecerá a plantas tolerantes o evitadoras de la sequía frente a otras potencialmente más productivas, y en los casos extremos favorecerá además la simplificación estructural de la vegetación a través de su reducción en altura y recubrimiento (Rambal y Debussche 1995). A diferencia del calentamiento, la minoración de las disponibilidades hídricas es mucho más efectiva a la hora de excluir a las especies menos tolerantes, a través de sus impactos sobre las tasas de reproducción y reclutamiento, las lesiones en individuos adultos o su debilitamiento y susceptibilidad frente a predadores y plagas. De hecho, en la distribución de la flora y la vegetación mediterráneas las relaciones hídricas revelan a menudo mayor poder discriminante que las puramente térmicas (Gavilán 1994, Gavilán *et al.* 1998, Gavilán 2003).

El aumento de la variabilidad climática y de la incidencia de eventos extremos es uno de los aspectos del cambio climático más sujeto a incertidumbres. Si, como apuntan las proyecciones, la principal tendencia consiste en una mayor frecuencia de olas de calor tardoprimaverales, sus efectos pueden acelerar la exclusión de las especies menos tolerantes a la sequía.

En relación con cambios climáticos precedentes y documentados, incluidas las fuertes oscilaciones del Alleröd y del último Dryas, el que está ocurriendo actualmente tiene un carácter extraordinariamente abrupto. La capacidad de respuesta de las especies mediante procesos microevolutivos será muy limitada (Bradshaw y McNeilly 1991), aunque en ciertos géneros de plantas poco longevas y que han mostrado una gran capacidad de radiación evolutiva reciente podrán detectarse respuestas de este tipo. La magnitud de los cambios proyectados indica que una parte importante de la flora verá superados los límites de su plasticidad fenotípica en muchos territorios (Holt 1990); esta plasticidad podría hallarse constreñida, además, en ambientes desfavorables, como los mediterráneos y los de alta montaña (Valladares 2001). Para las plantas más longevas, a la imposibilidad de cualquier respuesta microevolutiva se añadirá la dificultad de las respuestas basadas en la aclimatación, al menos por parte de los individuos adultos. Por ello, los desplazamientos latitudinales y altitudinales constituirán una respuesta fundamental en los reajustes de la flora a las nuevas condiciones climáticas y podrían paliar las proporciones de la extinción previsible (Bakennes *et al.* 2002, Thomas *et al.* 2004).

La capacidad de migrar bajo la presión de un cambio climático está documentada en el Pleistoceno para muchas especies (véase 2.2), pero sólo las más rápidas podrían afrontar por esta vía la envergadura de los cambios futuros, y siempre tras períodos de retardo más o menos dilatados. Los desplazamientos en latitud serán más fáciles para especies poco longevas, con buenas capacidades dispersivas y con pocas exigencias de hábitat adecuado para instalarse. Esta última condición será particularmente limitante para muchas especies en los paisajes actuales, profundamente transformados y fragmentados (Pitelka *et al.* 1997). Las migraciones altitudinales requieren movimientos de menor alcance, pero suponen reducciones del área disponible para las especies cuyo espacio climático apto se remonte en altitud. Existen abundantes evidencias de movimientos altitudinales y latitudinales de la flora atribuibles al cambio climático (Hughes 2000, McCarthy 2001, Walther *et al.* 2002, Parmesan y Yohe 2003), incluyendo los líquenes (van Hark *et al.* 2002). Estos movimientos supondrán, en cualquier caso, recomposiciones importantes de las comunidades. Además de su capacidad de dispersión y de su plasticidad, otros factores que favorecerán la supervivencia de las especies

frente al cambio climático tienen que ver con su amplitud altitudinal, geográfica y de hábitat, y con la diversidad genética de sus poblaciones. Por último, la persistencia in situ prolongada puede ser viable en ciertas especies longevas y capaces de aprovechar ventanas temporales favorables para la reproducción y el reclutamiento, o con dinámicas metapoblacionales o de fuente-sumidero que posibiliten recolonizaciones periódicas (Eriksson 1996).

5.3.1.2. Impactos indirectos

Aparte de estos efectos directos, el cambio climático actuará también a través de su influencia sobre otros factores que a su vez repercuten en la vegetación. Entre estos efectos indirectos se hallan los que implican al suelo como soporte físico y nutricional de las plantas, los relacionados con el régimen de perturbaciones (Pickett y White 1985) y los derivados del ascenso del nivel del mar.

El contenido en materia orgánica del suelo es un factor clave para las disponibilidades edáficas de agua y nutrientes. Las proyecciones de cambio climático disponibles apuntan hacia una reducción generalizada del contenido de carbono orgánico de los suelos, como consecuencia de la reducción de las precipitaciones combinada con el calentamiento térmico. Esta tendencia podría acelerarse sinérgicamente a través de la interacción con la agudización del régimen de incendios, fomentada por las nuevas condiciones climáticas, y de la erosión, promovida tanto por las perturbaciones como por la reducción de materia orgánica en los suelos. La mineralización de la materia orgánica puede afectar rápidamente y a corto plazo a ciertos sistemas dependientes, como las turberas, que serían fácilmente desplazados por otros tipos de vegetación más productivos. La aridización del clima y la pérdida de materia orgánica edáfica promoverían asimismo los procesos de desertificación, que en la actualidad afectan gravemente a un tercio de la superficie española, sobre todo en el sur y levante peninsular. Por último, la salinización de los suelos puede también sobrevenir con bastante rapidez, sobre todo en terrenos agrícolas en régimen de regadío. La elevación del contenido de sales de los horizontes superficiales constituye un factor muy selectivo para la flora, que responde rápidamente en términos de empobrecimiento a causa del reducido número de especies capaces de tolerarla. En las áreas más afectadas por la aridización cabe esperar una disminución de las tasas de lavado de bases y un elevamiento del pH, que favorecerían la expansión de flora indiferente o basófila a expensas de la estrictamente acidófila.

En lo que respecta al régimen de perturbaciones, ya se ha mencionado la posible mayor incidencia de olas de calor, a la que cabe añadir, por lo que respecta a nuestras latitudes, las modificaciones del régimen de incendios, comentadas en el Capítulo 12. Una mayor incidencia de incendios puede acelerar los reemplazamientos entre especies o tipos de vegetación con diferente grado de adaptación a las nuevas condiciones climáticas, puesto que éstas gobernarán la dinámica de la regeneración post-incendio (Quintana *et al.* 2004, Rodrigo *et al.* 2004). Los incendios extensos o recurrentes pueden contribuir a homogeneizar los paisajes resultantes (Pérez *et al.* 2003), así como desencadenar dinámicas degradativas que aceleren la simplificación estructural de la vegetación, al incrementar la erosión, que a su vez empobrece los bancos de semillas (García-Fayos *et al.* 1995) y las disponibilidades edáficas de nutrientes.

Otra de las consecuencias del calentamiento será el ascenso del nivel del mar, motivado por la expansión térmica de la masa oceánica y la fusión de casquetes y glaciares. Los cambios en la línea de costa, en sus procesos geomorfológicos, en el nivel freático y en los sistemas litorales asociados (albuferas, dunas), afectarán a la flora y las comunidades vegetales dependientes de los mismos.

5.3.1.3. Interacciones con otros componentes del cambio global

Una de las mayores fuentes de incertidumbre sobre los efectos del cambio climático proviene de sus posibles sinergias y antagonismos con otros componentes del cambio global, y en particular, por lo que a las plantas se refiere, con los cambios en la composición atmosférica y los cambios de uso del territorio (Moreno y Oechel 1992, Moreno 1994, Moreno y Fellous 1997, Lavorel *et al.* 1998), que están llamados a ejercer un papel modulador de los efectos directos e indirectos del cambio estrictamente climático (Peñuelas 1996, 2001).

Los cambios atmosféricos constituyen la principal causa del cambio climático, pero además ejercen influencias independientes sobre el funcionamiento de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera en CO_2 y la deposición de compuestos nitrogenados tienen un efecto fertilizador que incrementa la fotosíntesis y la actividad biológica en general (Woodward *et al.* 1991, Ceulemans y Mousseau 1994, Strain y Thomas 1995, Körner 2000). El primero, además, mejora la eficiencia en el consumo de agua y de nitrógeno por parte de las plantas (Peñuelas y Matamala 1990, Peñuelas y Azcón-Bieto 1992), lo que podría paliar los impactos de la aridización, especialmente desde la perspectiva agrícola (Hulme *et al.* 1999). También se ha demostrado que favorece adelantos de la floración e incrementa la producción de flores y frutos (Peñuelas 2001). Aunque comprobados en cámaras experimentales, estos efectos parecen tener una eficacia temporal limitada debido a la aclimatación, a las respuestas atenuadas de las plantas adultas y al papel limitante de otros factores, como la disponibilidad hídrica (Reichstein *et al.* 2002); su magnitud se diluye al ampliar las escalas temporales y espaciales de medida, y es posible que hayan empezado a entrar ya en una fase de estabilización (Peñuelas 2001). La deposición de nitrógeno es menor en el Mediterráneo que en otras latitudes templadas, pero podría ejercer efectos sobre el crecimiento vegetal más importantes que el CO_2. Los efectos son, como en el caso anterior, diferentes entre especies. Ejemplo de los antagonismos involucrados en el cambio global es que mientras una atmósfera enriquecida en CO_2 favorecería a las plantas C_3, el calentamiento o la aridez beneficiarían a las C_4, que funcionan mejor en condiciones de alta irradiación, temperaturas elevadas y bajas disponibilidades hídricas (suelos salinos incluidos).

Calentamiento y concentraciones crecientes de CO_2 se sabe que favorecen también las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) por parte de la vegetación. Los COVs desempeñan funciones variadas en las plantas (defensa frente a predadores y frente a algunos efectos del cambio climático, interacciones con otras plantas, etc.; Peñuelas *et al.* 1995), tienen un peso significativo en los balances atmosféricos de C (Peñuelas 2001), sobre todo en áreas con vegetación de tipo mediterráneo, ejercen varias interacciones con los gases de efecto invernadero y se cuentan, junto con los óxidos de N y los hidrocarburos de emisión antrópica, entre los precursores de la formación de ozono troposférico, a la que favorecen las altas temperaturas e irradiación propias del clima mediterráneo. El ozono tiene efectos oxidantes perjudiciales para los organismos, que se acentúan en ambientes con humedad atmosférica elevada, como los costeros, por lo que estimula a su vez la emisión defensiva de COVs por parte de las plantas. El balance final de esta sinergia es incierto, porque la emisión de COVs puede verse limitada en condiciones de estrés hídrico. Sus efectos también; cuando menos amplificaría algunos de los impactos directos mencionados, aparte de que influiría en el balance de las interacciones entre especies.

El incremento de la radiación UV asociado a los cambios atmosféricos se considera un factor menos importante en las áreas mediterráneas porque su flora goza de protecciones fisiológicas importantes frente a la sobrerradiación. No obstante, se han señalado posibles efectos sobre la composición química de la fitomasa (Gehrke *et al.* 1995) y sobre los microorganismos edáficos (Caldwell *et al.* 1999).

Los cambios de uso del territorio, tanto de tipo como de intensidad, están considerados como el factor con mayor impacto actual sobre la biodiversidad en general y la de los ecosistemas mediterráneos en particular (Sala *et al.* 2000). Este hecho, que dificulta en gran medida la detección e interpretación de

los efectos atribuibles estrictamente al cambio climático, se complicará en el futuro porque el cambio climático comportará nuevas modificaciones en las distribuciones y tipos de usos (Parry 1992), con tendencias hacia el abandono de la agricultura y de la ganadería en los territorios cuyas condiciones climáticas devengan adversas, desplazamiento de estos usos hacia nuevos territorios de clima favorable, expansión de las modalidades de uso intensivo como forma de paliar las fluctuaciones climáticas, cambios en las explotaciones forestales, crisis de ciertos sistemas tradicionales de usos del territorio, nuevas localizaciones urbanas y de infraestructuras, etc. La distribución de usos determina otros factores como la fragmentación de los paisajes (Tellería y Santos 2001), que condicionarán y limitarán las posibilidades de migración de las especies. Además, las características del régimen de incendios están estrechamente relacionadas con la configuración del paisaje y de los combustibles, y por lo tanto con los usos del territorio. Los efectos sinérgicos del cambio climático y de los cambios de uso constituirán una de las principales alteraciones con efectos sobre la biodiversidad en los próximos decenios.

5.3.1.4. Impactos sobre las interacciones entre especies

Además de los efectos directos e indirectos mencionados, el comportamiento de las especies frente al cambio climático se verá mediatizado por las modificaciones en las interacciones entre especies inducidas por éste. El cambio climático modificará localmente las relaciones de competencia entre especies vegetales. Allí donde la reducción de las disponibilidades hídricas sea moderada, el calentamiento actuará intensificando la competencia aérea entre plantas, que es principalmente asimétrica. Los desplazamientos de especies y las extinciones locales modificarán también el juego de relaciones competitivas. Allí donde la aridización y otros procesos que reducen la productividad predominen, la competencia aérea perderá importancia frente a la subterránea (Tilman 1988); las especies con mayor capacidad de tolerancia o evitación del estrés se verán favorecidas.

Tanto la intensificación de la competencia como la del estrés entrañan normalmente mermas de la diversidad florística (Grime 2001). Los procesos que favorecen la coexistencia de especies y por tanto la riqueza florística se verán también sometidos a modificaciones de difícil evaluación. En términos generales el régimen de perturbaciones (incendios, sequías, etc.) parece que se intensificará, aunque con diferencias entre territorios, de tal forma que previsiblemente su incidencia aumentará en algunos y se reducirá en otros. Estos cambios en el régimen de perturbaciones pueden favorecer la exclusión de especies menos tolerantes a las nuevas condiciones y la expansión subsiguiente de otras mejor adaptadas. Los desplazamientos de especies alterarán las separaciones de nichos establecidas, por lo que se abrirán períodos de inestabilidad mientras se instauran nuevas interacciones. Las nuevas condiciones climáticas afectarán también, entre otros, a los procesos de facilitación, aunque el sentido de los cambios parece depender de las situaciones (Pugnaire *et al.* 2001, Callaway *et al.* 2002); Goldberg *et al.* (1999) no encontraron patrones consistentes de intensificación de estas interacciones a lo largo de gradientes de productividad.

A pesar de su aparente autosuficiencia como productores primarios, las plantas dependen de muchos otros organismos para su nutrición (hongos y bacterias simbiontes), su reproducción y su dispersión (animales polinizadores y dispersores). Además, sirven como alimento (Harrington *et al.* 1999) y dan soporte y refugio a multitud de organismos que dependen de ellas. Los desplazamientos y las extinciones locales afectarán a las especies involucradas en estas interacciones. Particular relevancia tendrán los impactos sobre aquellas especies que desempeñan funciones importantes en los ecosistemas (especies clave, especies ingenieras), por los efectos en cascada sobre otras especies dependientes.

La ocurrencia de respuestas fenológicas diferentes entre especies con relaciones de tipo mutualista, parasitario o competitivo (por ejemplo: plantas y animales polinizadores, dispersores

o fitófagos) puede conducir a desajustes en dichas relaciones que alteren la dinámica de las poblaciones correspondientes. Asincronías tróficas entre aves, insectos y plantas se han detectado en Europa (Visser *et al.* 1998, 2001; ver capítulo 6). Los desajustes en las relaciones mutualistas entrañarán efectos perjudiciales para las especies involucradas; en parte podrán verse paliados por la redundancia funcional entre especies, que parece ser importante en las comunidades mediterráneas. Las plantas zoófilas y zoócoras serán más susceptibles frente a estos desajustes, y en mayor medida cuanto más específica sea su dependencia de polinizadores o dispersores. Los estudios disponibles sobre la vegetación mediterránea indican que con frecuencia estas relaciones involucran a conjuntos de especies, tanto de plantas como de animales (Herrera 1995, 2001, Zamora 2000, Zamora *et al.* 2001), de forma que las dependencias mutuas son relativamente laxas, lo que encaja con un ambiente marcado por las fluctuaciones. Los desajustes fenológicos pueden representar desventajas añadidas para las especies menos tolerantes al cambio climático, pero también pueden actuar interfiriendo las posibilidades de expansión de las favorecidas por el cambio. Por todo ello, cabe esperar estructuras ecológicamente menos complejas, es decir, con menos interacciones entre especies, en las nuevas comunidades de plantas que se conformen a medida que progrese el cambio climático.

El herbivorismo tiene efectos tanto positivos como negativos sobre la diversidad florística (Zamora *et al.* 2001). Los segundos se acentuarán en general con la aridización, sobre todo para especies sensibles al ramoneo o a la predación de plántulas, como es el caso de muchas leñosas del monte mediterráneo. Además, la palatabilidad de algunas especies ha empeorado debido al enriquecimiento atmosférico en CO_2 (Peñuelas y Matamala 1990, Peñuelas 2001).

El cambio climático favorecerá también la expansión de especies parásitas a nuevos territorios, así como la severidad del parasitismo sobre individuos debilitados por el acentuamiento del estrés o incluso de la competencia. Tal parece ser el caso del papel de ciertos hongos patógenos en la “seca” de encinas y alcornoques (Brasier 1992, 1996; Brasier *et al.* 1993, Montoya y Mesón 1994). Hódar *et al.* (2003) documentan una mayor incidencia de plagas de procesionaria en los pinares albares reliquiales andaluces; la sensibilidad de este tipo de pinares a la sequía había sido puesta de manifiesto en el nordeste peninsular (Martínez-Vilalta y Piñol 2002). Un incremento de la mortalidad, sobre todo la de individuos adultos, puede favorecer la creación de huecos susceptibles de ser ocupados por otras especies, locales o inmigradas, mejor adaptadas a las nuevas condiciones climáticas.

En estas interacciones jugarán un papel relevante las numerosas especies animales y vegetales que el hombre, deliberada o accidentalmente, ha introducido fuera de sus áreas nativas. Los procesos de invasión causados por estos organismos exóticos se han considerado un componente del cambio global tan importante como la destrucción o fragmentación de hábitats (Vitousek 1994, Vitousek *et al.* 1997). Las especies exóticas modifican las condiciones y los procesos ecológicos (reciclado de nutrientes, estructura y propiedades del suelo, régimen de perturbaciones) de las comunidades en las que se introducen, y se ha demostrado que pueden afectar a la diversidad genética de las especies nativas emparentadas, influir en las interacciones entre las especies autóctonas, provocar extinciones (Vitousek 1990, D’Antonio y Vitousek 1992, McNeely *et al.* 1995, Mack y D’Antonio 1999, Parker *et al.* 1999) o contribuir a la homogeneización de los paisajes invadidos (Dukes y Mooney 1999). Aunque los procesos de invasión en Europa son severos, las plantas no se cuentan todavía entre los peores organismos invasores. Se ha calculado que la flora europea contiene alrededor de un 5% de especies introducidas, en su mayor parte provenientes del continente Eurasiático (Lövei 1997, Stanners y Bourdeau 1998). En España peninsular el porcentaje asciende a casi un 10% (Vilá *et al.* 2002). Excluyendo la flora alóctona que solo afecta a medios claramente antropizados, se han identificado 75 plantas invasoras de los hábitats naturales y seminaturales españoles, 45 de las cuales muestran en la actualidad una tendencia expansiva (Dana *et al.* 2003).

La invasibilidad, es decir, la susceptibilidad que presenta una comunidad para ser invadida, constituye un tema controvertido, en el que un factor clave parece residir en la existencia de fluctuaciones en la disponibilidad de recursos (Davis *et al.* 2000, Grime 2001). Las perturbaciones, naturales o artificiales, pero también otros eventos que incrementen temporalmente los recursos disponibles, como la irrigación, la fertilización o la eutrofización, inician períodos proclives a la entrada de especies invasoras, hasta que la recuperación posterior de la comunidad reduce el exceso de recursos. Los eventos invasivos tienen por ello un marcado carácter intermitente. En la medida en que el cambio climático provoque declives poblacionales y extinciones locales, o acentúe los regímenes de ciertas perturbaciones, se abrirán períodos caracterizados por las fluctuaciones ambientales en los que las especies exóticas contarán con oportunidades para expandirse. Signos de tales expansiones han sido indicados por Sobrino *et al.* (2001), aunque todavía resulta difícil deslindar la influencia de otros componentes del cambio global. La insularidad se contempla como un riesgo añadido frente a las plantas alóctonas. Particularmente grave es el caso de la flora canaria, con 45 casos de especies en peligro o en peligro crítico para las que la competencia con especies alóctonas se ha indicado como un riesgo para la supervivencia de alguna o todas sus poblaciones (Dana *et al.* 2003).

5.3.1.5. Cambios de vegetación y cambio climático: retroalimentaciones

Aparte de la visión de la vegetación como sujeto paciente de las modificaciones del clima, los cambios estructurales y composicionales de la cobertura vegetal ejercen a su vez influencias sobre el clima, a través de su papel en los balances radiativos derivados del albedo, en la evapotranspiración y los balances hídricos, en la producción de materia orgánica y la conformación de las propiedades derivadas del suelo, en la configuración espacial y las características de los combustibles, que determinan propiedades importantes de los regímenes de incendios, en las emisiones de COVs, etc. Los cambios fenológicos, y en particular el alargamiento del período de actividad vegetativa asociado, afectarán también a factores determinantes del cambio climático, como el ciclo y los balances de carbono, y modificarán igualmente los flujos de agua y nutrientes en los ecosistemas (White *et al.* 1999), interfiriendo a su vez con algunos de los efectos indirectos del cambio climático.

De lo expuesto en este apartado se concluye que los impactos previsibles del cambio climático sobre las plantas afectarán, directa o indirectamente, a la práctica totalidad de sus procesos demográficos y ecológicos: productividad, crecimiento, composición química y genética, nutrición, fenología, polinización y reproducción, dispersión, germinación y reclutamiento, mortalidad, e interacciones con otras especies. Estos impactos se manifestarán a través de cambios en la dinámica de las poblaciones afectadas, incluyendo migraciones y extinciones locales, que generarán cambios en la composición, estructura, distribución y funcionamiento de las comunidades resultantes. La mayoría de los impactos apuntan hacia la simplificación estructural y la reducción de la cobertura en las nuevas comunidades, que contendrán especies menos interrelacionadas; seguramente abundarán las de amplia valencia ecológica, amplia distribución geográfica y altitudinal, buena tolerancia al estrés hídrico, dispersión ágil, gran plasticidad fenotípica y variabilidad genética, etc. Como la distribución de la vegetación actual sigue patrones biogeográficos relacionados con los climáticos, y como el cambio climático proyectado tampoco es espacialmente uniforme, los impactos previsibles se resolverán de formas diferentes dependiendo de los territorios y los tipos de vegetación. Aunque los cambios florísticos que puedan producirse obedecerán a respuestas individuales de las especies, las predicciones individualizadas para el conjunto de la flora están fuera del alcance de los conocimientos científicos actuales. Por ello, a continuación se desarrolla un análisis de las proyecciones de Promes y seguidamente las consecuencias que se derivan del mismo para cada uno de los principales tipos de vegetación representados en España. Este tipo de aproximación es, aunque imperfecta, útil para identificar efectos potencialmente significativos

en los distintos territorios y hábitat, en la medida en que la reducción del área climáticamente adecuada para un determinado tipo de hábitat determina la magnitud del riesgo de extinción de especies propias del mismo (Thomas *et al.* 2004).

5.3.2. Análisis de las proyecciones del modelo PROMES

Para desarrollar la valoración de los cambios climáticos que pueden resultar más significativos para los diferentes tipos de vegetación, las proyecciones del modelo Promes (véase Capítulo 1) se han transformado a las unidades de la clasificación bioclimática más utilizada en los estudios de vegetación españoles (véase 2.1). Esta clasificación (Rivas-Martínez 1997, Rivas-Martínez y Loidi 1999, Rivas-Martínez *et al.* 2002) utiliza cocientes ombrotérmicos de verano para separar los climas mediterráneos de los templados (Fig. 5.4), una temperatura anual acumulada (temperatura positiva) como variable delimitadora de los pisos térmicos o termotipos (Fig. 5.5), y un cociente ombrotérmico anual (índice ombrotérmico) como delimitador de los pisos ómbricos u ombrotipos (Fig. 5.6). Los resultados se presentan cartografiados en las figuras 5.4-5.6 con la resolución de las celdillas de 50 x 50 km generadas por el modelo. También se indican las matrices de probabilidades de transición entre las unidades de la clasificación climática utilizada en el período 1961-1990 y los dos escenarios SRES (B2 y A2) proyectados para el período 2070-2100, basados en tendencias demográficas, socioeconómicas y tecnológicas similares a las actualmente predominantes. En estas matrices (Tablas 5.3-5.5), cada unidad de la clasificación bioclimática se ha subdividido en dos subunidades (superior e inferior) para mejorar la resolución de las transiciones.

La proyección del mismo modelo para el período 1961-1990 se ha tomado como marco de referencia para el clima actual, al no disponer de otro con la misma escala de resolución geográfica. Esta proyección, trasladada a las unidades de la clasificación climática empleada, refleja bastante adecuadamente las relaciones establecidas entre la vegetación y el clima actual, aunque exagera algunos contrastes que deben tenerse en cuenta en las comparaciones. Por ejemplo, los climas templados aparecen sobrerrepresentados a lo largo del Sistema Ibérico, así como los ombrotipos semiáridos en la mitad sur. Respecto a estos últimos, parece que parte del ombrotipo seco inferior es reflejado como semiárido superior por el modelo. En cambio, la extensión actual del piso termomediterráneo aparece infrarrepresentada, como quizá también la del termotemplado en el litoral noroccidental.

La Fig. 5.4 muestra el cambio de la frontera climática mediterránea-eurosiberiana en los dos escenarios. La “mediterraneización” de la Península, que es la tendencia más sobresaliente, se acusa más en el noroeste que en el noreste y su avance se produce a lo largo de tres cuñas: el litoral cantábrico, el valle del Ebro y quizá la vertiente septentrional del Pirineo. Los climas templados se acantonan en los sistemas cantábrico y pirenaico, y, aunque todavía mantienen cierta continuidad en el escenario B2, muestran evidencias de fragmentación en el A2.

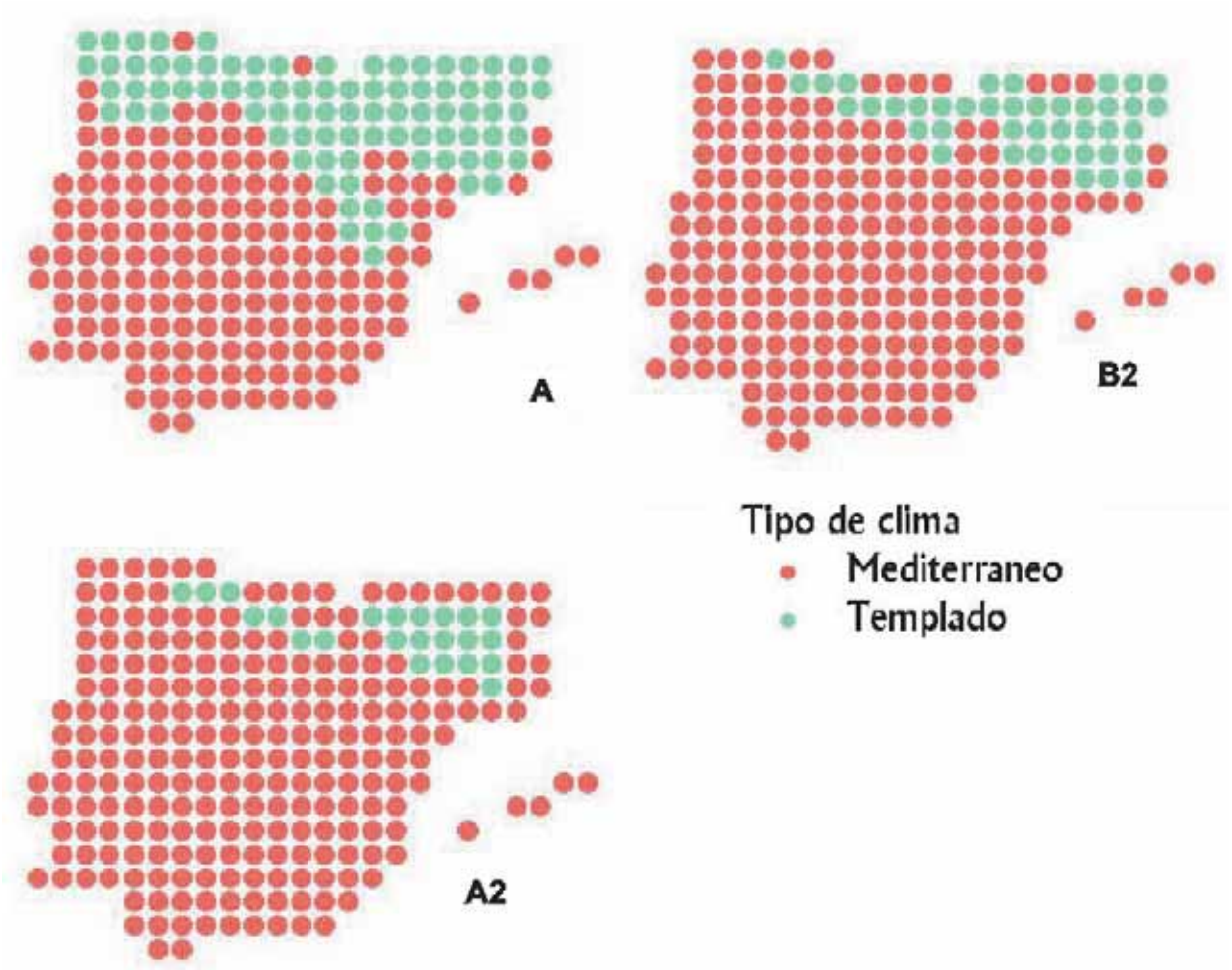


Fig. 5.4. *Cambios en la distribución de los climas mediterráneos y templados de acuerdo con las proyecciones de Promes (escenarios B2 y A2; A: clima actual).*

Las modificaciones en la distribución de los pisos bioclimáticos (Fig. 5.5) ponen de manifiesto la importante expansión del piso termomediterráneo en el suroeste peninsular e incluso la aparición del piso inframediterráneo, cuyas representaciones actuales más cercanas se hallan en latitudes relativamente alejadas del norte de África y en las Islas Canarias. En conjunto, estos climas mediterráneos cálidos multiplican su superficie por seis en el escenario B2 y por ocho en el A2. Además, la ampliación de su territorio en un siglo supera las distancias máximas de migración documentadas, por lo que cabe esperar que la flora mediterránea cálida no pueda alcanzar en ese lapso temporal los nuevos límites septentrionales de distribución. La expansión del termomediterráneo a lo largo de la mitad levantina es más moderada y ceñida a la costa, de forma que en el escenario B2 sólo supera ligeramente hacia el norte y en el valle del Ebro sus límites actuales reales. La distribución del piso mesomediterráneo, actualmente el más extenso, sufre un considerable desplazamiento hacia el norte en la mitad ibérica occidental, pero mantiene una extensión total similar. El mesotemplado o colino pierde territorio debido a la mediterraneización, que sólo en parte se ve compensado con ganancias de territorios actualmente supratemplados.

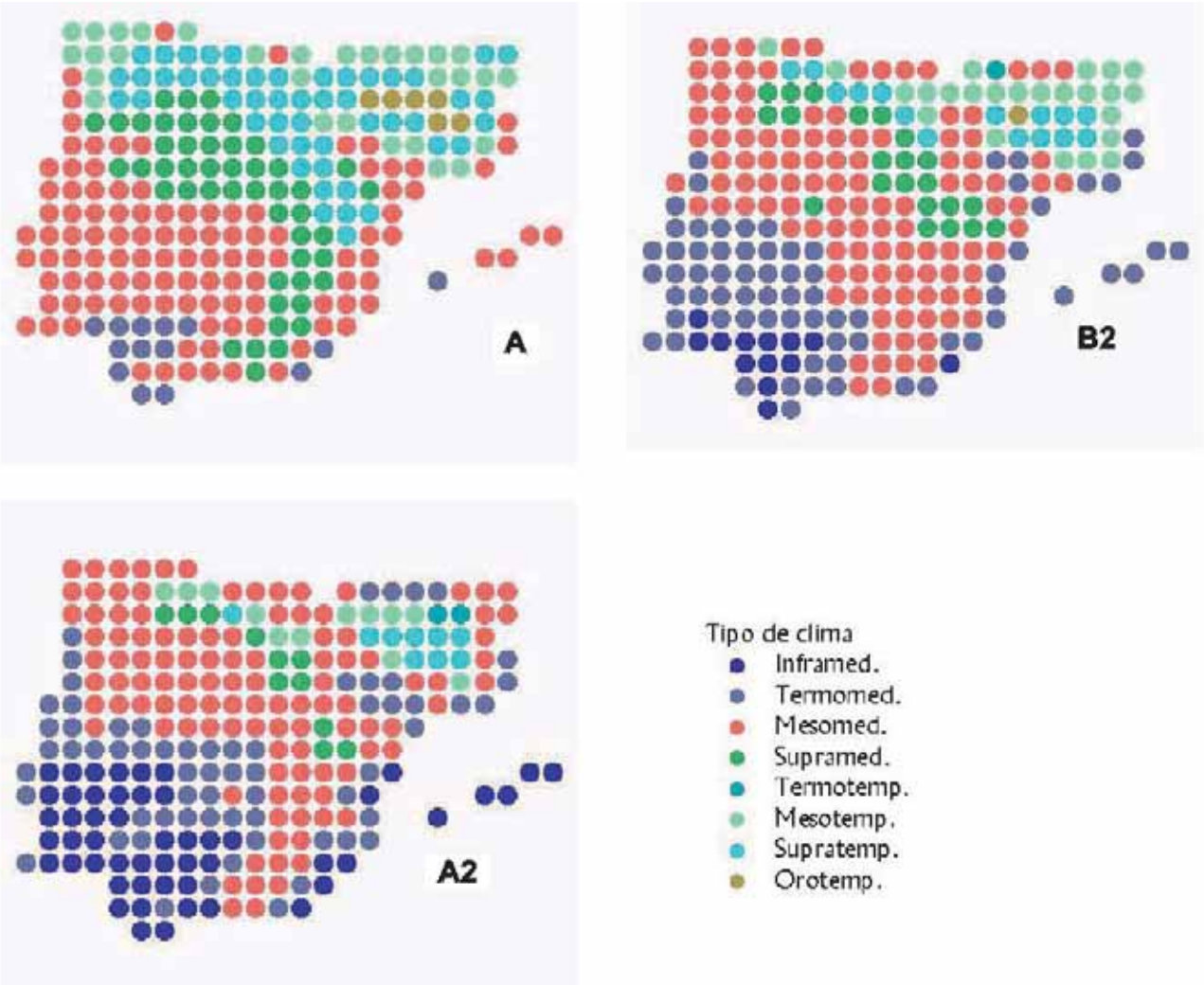


Fig. 5.5. *Cambios en la distribución de los pisos bioclimáticos (termotipos) de Rivas-Martínez de acuerdo con las proyecciones de Promes (escenarios B2 y A2; A: clima actual).*

Los pisos de montaña experimentan una reducción considerable. El supramediterráneo reduce su extensión actual a la mitad en B2 y a la cuarta parte en A2, y además sufre un desplazamiento casi completo hacia áreas que actualmente son supratempladas. El supratemplado, es decir, la montaña media eurosiberiana, reduce su extensión a la tercera parte en B2 y a la quinta parte en A2. La mediterraneización es responsable de la mayor parte (50% en B2, 65% en A2) de esta reducción territorial, correspondiendo el resto al calentamiento (transformación en mesotemplado). Debido a estos cambios, los climas de montaña eurosiberiana se fragmentan en un núcleo cantábrico y otro pirenaico; el primero se reduce a una sola celdilla en el escenario A2. La fuerte reducción de los termotipos de montaña debe interpretarse como una elevación de los límites altitudinales entre pisos, resultado del calentamiento; la menor proporción de área dentro de la celdilla determina que el piso predominante en ésta cambie. En promedio, y de acuerdo con las matrices de transición, el escenario B2 supone un ascenso de cerca de la mitad del intervalo altitudinal de la mayoría de los pisos, en tanto que en el escenario A2 el cambio equivale a casi un piso completo, sobre todo en la mitad meridional. Es interesante destacar el comportamiento térmico más estable del litoral, así como el acentuamiento de la continentalidad (amplitud térmica anual) en todo el interior peninsular.

Tabla 5.3. *Matrices de transición entre climas mediterráneos y templados en las dos proyecciones de Promes (B2 y A2). En las filas se indica el numero de celdillas correspondientes a los climas actuales y en las columnas el número correspondiente a cada una de las proyecciones.*

Escenario B2	**M**	**T**
Mediterráneo	175	
Templado	45	41

Escenario A2	**M**	**T**
Mediterráneo	175	
Templado	63	23

Tabla 5.4. *Matrices de transición entre pisos bioclimáticos (termotipos) en las dos proyecciones de Promes (B2 y A2). En las filas se indica el número de celdillas correspondientes a los termotipos actuales y en las columnas el número correspondiente a cada una de las proyecciones.*

ESCENARIO B2	**IM**	**TMi**	**TMs**	**MMi**	**MMs**	**SMi**	**SMs**	**TT**	**MTi**	**MTs**	**STi**	**STs**	**OT**	*Total*
Inframediterráneo														*0*
Termomediterráneo inf.	3													*3*
Termomediterráneo sup.	7	4												*11*
Mesomediterráneo inf.	3	33	27	2										*65*
Mesomediterráneo sup.			5	42										*47*
Supramediterráneo inf.				9	27									*36*
Supramediterráneo sup.					6	7								*13*
Termotemplado														*0*
Mesotemplado inf.			2	5				1						*8*
Mesotemplado sup.				7	6				9					*22*
Supratemplado inf.					10	1				15	1			*27*
Supratemplado sup.						11	3				9			*23*
Orotemplado											1	4	1	*6*
Total	*13*	*37*	*34*	*65*	*49*	*19*	*3*	*1*	*9*	*15*	*11*	*4*	*1*	*261*

ESCENARIO A2	**IM**	**TMi**	**TMs**	**MMi**	**MMs**	**SMi**	**SMs**	**TT**	**MTi**	**MTs**	**STi**	**STs**	**OT**	*Total*
Inframediterráneo														*0*
Termomediterráneo inf.	3													*3*
Termomediterráneo sup.	11													*11*
Mesomediterráneo inf.	38	25	1	1										*65*
Mesomediterráneo sup.		10	22	15										*47*
Supramediterráneo inf.				32	4									*36*
Supramediterráneo sup.					13									*13*
Termotemplado														*0*
Mesotemplado inf.		2	2	4										*8*
Mesotemplado sup.			2	17	1			2						*22*
Supratemplado inf.				2	17				6	2				*27*
Supratemplado sup.					5	11				4	3			*23*
Orotemplado											2	4		*6*
Total	*52*	*37*	*27*	*71*	*40*	*11*	*0*	*2*	*6*	*6*	*5*	*4*	*0*	*261*

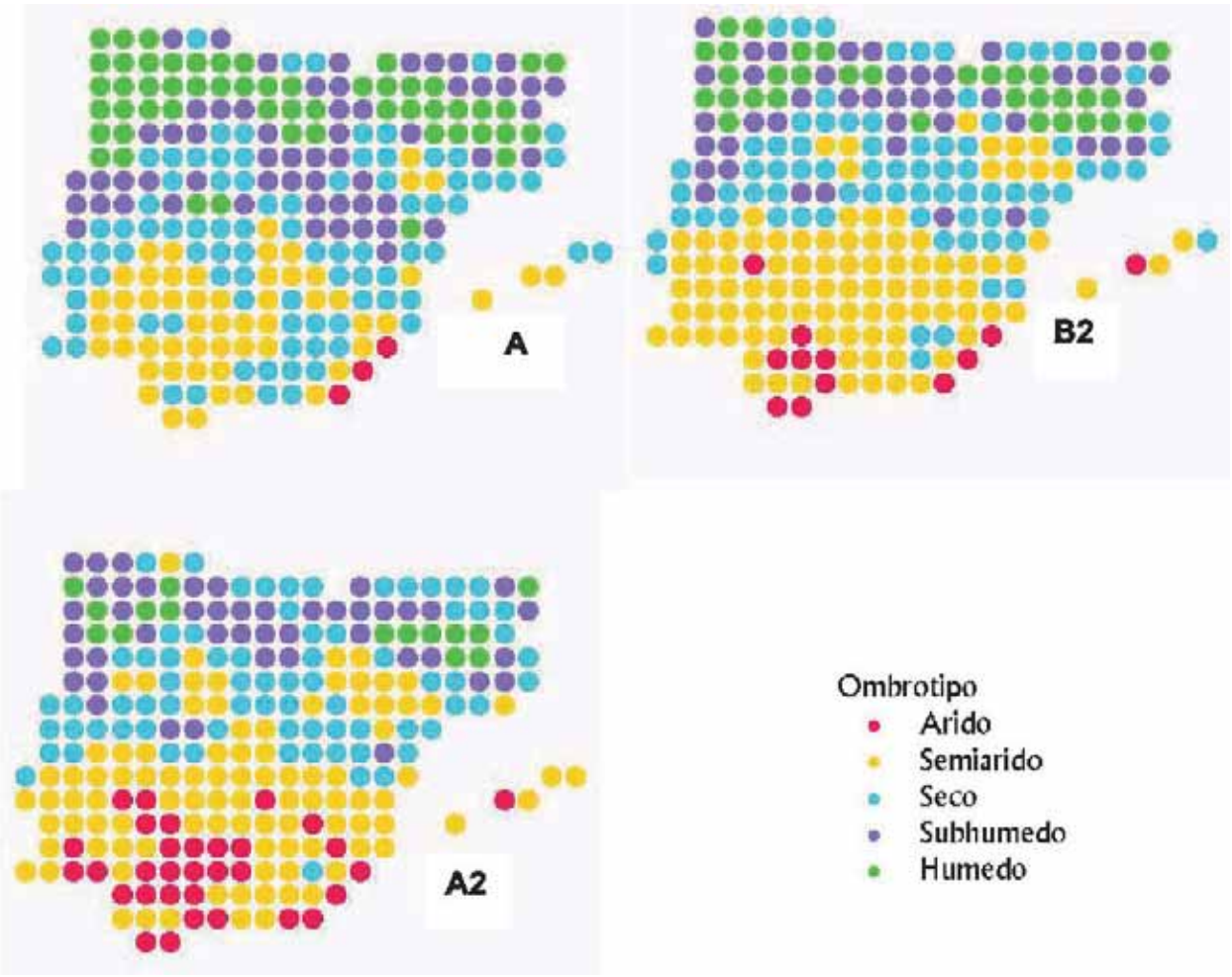


Fig. 5.6. *Cambios en la distribución de los pisos bioclimáticos (ombrotipos) de Rivas-Martínez de acuerdo con las proyecciones de Promes (escenarios B2 y A2; A: clima actual).*

La proyección de un descenso importante de las precipitaciones en buena parte de la Península Ibérica constituye una de las aportaciones novedosas de Promes y determina que, en combinación con el calentamiento, los escenarios muestren una expansión considerable de los ombrotipos semiáridos y áridos (Fig. 5.6), estos últimos restringidos hasta ahora a enclaves muy reducidos del litoral murciano-almeriense. Los ombrotipos semiáridos se adentran ampliamente en el valle del Ebro y alcanzan también la depresión del Duero en el escenario B2. El semiárido superior de la proyección actual de Promes (A) pasa a semiárido inferior en el escenario B2, y prácticamente toda la mitad meridional de la península queda englobada en climas semiáridos inferiores y áridos en el escenario A2. La aparición del ombrotipo árido en el sudoeste peninsular representa un cambio considerable, teniendo en cuenta la mayor estabilidad de las áreas semiárido-áridas del sudeste peninsular, que sólo en el escenario A2 muestran una expansión importante hacia el borde manchego sudoriental. El ombrotipo seco recupera en el norte peninsular buena parte de la extensión perdida en el sur. Los ombrotipos subhúmedos y húmedos experimentan fragmentaciones importantes a lo largo de los sistemas Central e Ibérico en el escenario B2, que se acentúan en el A2. En conjunto, los ombrotipos subhúmedos superiores o más húmedos reducen su extensión en un 40% en el escenario B2 y en un 60% en el A2. El tercio norte peninsular se mantiene dominado por climas subhúmedos, con núcleos húmedos enclavados en Galicia, la cordillera Cantábrica y los Pirineos que

subsisten incluso en el escenario A2. Por lo tanto son los climas mediterráneos lluviosos (subhúmedos y húmedos) los que se tornan predominantes en el norte a costa de los templados.

La aridización del clima en la mitad meridional es más acusada que en la septentrional, y nuevamente parece que los cambios en la mitad occidental peninsular vayan a ser más acentuados que en la oriental. Por lo tanto, además de la "mediterraneización" generalizada, los enclaves mediterráneos lluviosos se reducen drásticamente en sus ubicaciones actuales y se desplazan hacia el norte. En contra de lo que se anunciaba en informes anteriores (Parry 2000a, b), que preveían impactos moderados para la vegetación mediterránea, las proyecciones ahora disponibles indican cambios importantes en los principales límites climáticos para la vegetación, al menos en el Mediterráneo occidental.

Con independencia de su fiabilidad, las implicaciones de los escenarios de cambio climático comentados pueden ser muy distintas para la flora y la vegetación dependiendo de las trayectorias que realmente sigan los cambios. En el caso de las temperaturas las proyecciones constatan tendencias más o menos lineares de cambio. Sin embargo, en el caso de las precipitaciones parece que las fluctuaciones serán considerables, lo que complicará los posibles movimientos de la vegetación debido a los efectos antagónicos entre calentamiento y aridización. Por ejemplo, diversas proyecciones a medio plazo sugieren para ciertos territorios peninsulares que la aridización pueda verse compensada por redistribuciones anuales de la precipitación (del Río 2003, del Río *et al.* 2005), que actuarían favoreciendo cambios de la vegetación opuestos a los que a largo plazo anuncia el modelo Promes.

Tabla 5.5. *Matrices de transición entre pisos bioclimáticos (ombrotipos) en las dos proyecciones de Promes (B2 y A2).*

ESCENARIO B2	**A**	**SAi**	**SAs**	**Si**	**Ss**	**SHi**	**SHs**	**Hi**	**Hs**	**HH**	*Total*
Árido	3										*3*
Semiárido inferior	9	4									*13*
Semiárido superior		42	1								*43*
Seco inferior		5	40	7							*52*
Seco superior			3	33	2						*38*
Subhúmedo inferior				9	20	1					*30*
Subhúmedo superior					6	21	1				*28*
Húmedo inferior						7	15	9			*31*
Húmedo superior								17			*17*
Hiperhúmedo									3	3	*6*
Total	*12*	*51*	*44*	*49*	*28*	*29*	*16*	*26*	*3*	*3*	

ESCENARIO A2	**A**	**SAi**	**SAs**	**Si**	**Ss**	**SHi**	**SHs**	**Hi**	**Hs**	**HH**	*Total*
Árido	3										*3*
Semiárido inferior	13										*13*
Semiárido superior	16	27									*43*
Seco inferior		33	19								*52*
Seco superior		2	16	20							*38*
Subhúmedo inferior				22	8						*30*
Subhúmedo superior				5	17	6					*28*
Húmedo inferior						17	13	1			*31*
Húmedo superior							9	8			*17*
Hiperhúmedo								2	3	1	*6*
Total	*32*	*62*	*35*	*47*	*25*	*23*	*22*	*11*	*3*	*1*	

5.3.3. Análisis de impactos según los tipos de vegetación

5.3.3.1. Vegetación de alta montaña

Los hábitats supraforestales de alta montaña comprenden diversos tipos de vegetación herbácea y arbustiva adaptados a períodos de actividad vegetativa cortos, fríos intensos, coberturas variables de nieve y suelos marcados por la alta energía erosiva del relieve (Billings y Mooney 1968, Beniston 1994). El aislamiento geográfico y la especificidad de estos medios han promovido su riqueza en endemismos y, en el caso de las montañas ibéricas, en taxones en final de área meridional. No es de extrañar, por ello, que muchos de los hábitats de alta montaña se hallen recogidos en la Directiva Hábitat (Romao 1996, European Commission 2003).

Su estrecha vinculación con los climas de la alta montaña y los suelos geliturbados hace que un calentamiento generalizado del clima les sea particularmente desfavorable. La expansión de vegetación leñosa (arbustos en los pisos criorotemplado y crioromediterráneo, árboles en los límites inferiores o en los niveles medios del orotemplado y del oromediterráneo), acompañada de flora herbácea que hoy tiene su óptimo en niveles altitudinales inferiores, actuaría reduciendo el área disponible para la vegetación de alta montaña y alterando su composición, sobre todo en lo que se refiere a los pastos psicroxerófilos y quionófilos. Aunque el cambio climático proyectado sugiere que entre la mitad y la práctica totalidad del intervalo altitudinal asignado actualmente a los pisos criorotemplado y crioromediterráneo podría verse afectado, es poco verosímil que en el lapso de un siglo se pueda completar una expansión de varios centenares de metros de altitud en los límites superiores actuales de la vegetación leñosa. Estimaciones hechas para los Alpes indican que incrementos de la temperatura media anual superiores a 3ºC producirían impactos importantes, pero en un plazo de varios siglos (Körner 1995a, Theurillat 1995). No obstante, en muchas cumbres que no superan los 2300-2400 m de altitud cabe esperar reducciones y “desnaturalizaciones” muy considerables de los hábitats culminícolas. La flora de estos hábitats dispondrá de situaciones de refugio en topografías particulares: crestas, neveros, canchales o laderas abruptas y expuestas, según sus exigencias ecológicas, tal y como se observa hoy en cumbres más modestas (entre 1400 y 1800 m), en las que fenómenos similares debieron producirse tras los últimos pulsos fríos postglaciales. Pero la reducción de área y la competencia de leñosas y herbáceas de niveles inferiores mermará el cortejo florístico de la alta montaña e incrementará la fragmentación de sus poblaciones. El calentamiento atenuará los efectos diferenciadores del relieve y la microtopografía, reduciendo la diversidad de microhábitats en la alta montaña. Aunque localmente la diversidad florística pueda aumentar, la riqueza regional disminuirá debido a la pérdida de flora exclusiva de estos hábitats. En el Pirineo, por ejemplo, la vegetación más orófila de *Loiseleuria procumbens* o *Arctostaphylos alpina*, actualmente reliquial, se verá seguramente reducida.

El previsible descenso de la innivación, tanto en términos de precipitación en forma de nieve como de permanencia de la cobertura nival, determinará retracciones en todos los tipos de vegetación quionófilos, y particularmente en los cervunales de *Nardus stricta* y los pastizales quionófilos de sustratos calcáreos, que desaparecerán de las cotas más bajas de las que se conocen en los ámbitos cantábrico y pirenaico. En cotas más altas posiblemente perdurarán, pero en extensiones reducidas dentro del mosaico de la alta montaña. Además, la expansión de vegetación leñosa y herbácea de niveles inferiores será más fácil en los suelos bien innivados, profundos, frescos y más productivos. Por lo tanto, las proporciones relativas de pastos xerófilos y quionófilos se modificarán en la alta montaña; los primeros podrán beneficiarse de las tendencias a la aridización del clima. Los cambios en el albedo causados por la disminución de la cobertura nival acelerarán el calentamiento en la alta montaña; un efecto similar se ha atribuido a la proliferación de vegetación leñosa (Betts 2000). Los hábitats de los ventisqueros de las zonas más altas se verán más mermados, con previsibles extinciones locales en las montañas más meridionales (Cordillera Central, Sierra Nevada).

Riesgos similares amenazan a los cervunales higroturbosos y a las turberas de alta montaña, que además de depender de los regímenes de hidromorfía padecerán la aceleración de la mineralización de materia orgánica inducida por el calentamiento.

En la alta montaña no son esperables grandes cambios de uso del territorio. La rentabilidad de muchas instalaciones dedicadas a los deportes de invierno se verá comprometida, aunque su reconversión hacia otras actividades de ocio y turismo será una opción alternativa. La explotación de manantiales para fabricar nieve artificial supondría alteraciones severas en el regimen hídrico de los suelos. La carga ganadera podría aumentar en algunas montañas en la medida en que la disponibilidad de pastos de verano en altitudes intermedias disminuya. Una reversión de la tendencia predominante durante el siglo pasado serviría para controlar la proliferación de la vegetación leñosa, pero favorecería la expansión de herbáceas pratenses de cotas inferiores.

Las modificaciones florísticas de la vegetación de alta montaña y las de los límites altitudinales de distribución de ciertas especies se cuentan entre las más tempranamente documentadas y atribuidas a los efectos del cambio climático. Grabherr *et al.* (1994, 1995, Gottfried *et al.* 2000; Pauli *et al.* 2001) han detectado cambios de este tipo ocurridos en especies herbáceas de las cumbres de los Alpes a lo largo del siglo pasado, aunque con tasas medias de ascensión de 1-4 m/década en lugar de los 10 m/década que cabría esperar para un calentamiento estimado en 0.7ºC. Sanz-Elorza *et al.* (2003) indican procesos de densificación de arbustos (piornos y enebros rastreros) en altitudes crioromediterráneas del Sistema Central para el período 1957/1991. Las ganancias de cota son moderadas y no pueden descartarse por completo, como en otros casos (Archer *et al.* 1995), influencias derivadas de la reducción de la presión ganadera. El ascenso del límite superior del bosque debe requerir períodos más largos (Burga 1988, Ammann 1995) y puede reaccionar negativamente frente a la variabilidad climática, como indican los estudios sobre *Pinus uncinata* en el Pirineo central (Camarero y Gutiérrez 2004). Peñuelas y Boada (2003) han detectado un ascenso en el límite altitudinal superior de los hayedos del Montseny evaluado en al menos 70 m para los últimos 55 años (13 m/década), aunque no independiente del abandono de los usos ganaderos. También se han detectado ascensos del límite superior del bosque en Escandinavia (Kullman 2001), donde la señal del cambio climático es más notoria, en los Balcanes (Meshinev *et al.* 2000) y en Nueva Zelanda (Wardle y Coleman 1992).

5.3.3.2. Vegetación forestal: bosques

Los bosques constituyen la vegetación potencial natural de la mayor parte de nuestro país, exceptuando, aparte de la alta montaña, los territorios semiáridos peninsulares y los áridos y desérticos canarios (Rivas-Martínez 1987, Blanco *et al.* 1997). La diversidad de los bosques actuales y sus diferentes espacios bioclimáticos motivan que las respuestas esperables frente al cambio climático sean muy variadas.

Los bosques caducifolios son predominantes en los territorios eurosiberianos, aunque también cobran extensiones importantes en la montaña mediterránea. Los bosques caducifolios más ombrófilos, como hayedos, robledales, abetales mixtos, etc., se verán negativamente afectados por la aridización del clima y el acentuamiento de la sequía estival (“mediterraneización”). En algunos montes del Prepirineo, de la transición castellano-cantábrica, del sistema Ibérico septentrional y del sistema Central (Ayllón, Somosierra), los hayedos experimentarán severas contracciones de área que pueden llevarles a la extinción local o a una situación puramente residual, al igual que los robledales de *Quercus petraea*. En otros territorios experimentarán un notable retroceso. Las expectativas para los abedulares carpetanos de *Betula celtiberica,* los oretanos de *B. parvibracteata* y los subbéticos y nevadenses de *B. fontqueri* son similares.

Otros bosques caducifolios de mayor extensión actual y potencial y menores exigencias hídricas sufrirán retracciones importantes en algunos de sus territorios, pero tendrán posibilidades de mantenerse en otros e incluso de expandirse a costa de bosques más ombrófilos, como hayedos y robledales. Es el caso de las carballedas y bosques mixtos galaico-cantábricos, los robledales pelosos (*Quercus pubescens*) pirenaicos, los melojares y los quejigares. Estos últimos tienen sus representaciones más extensas en climas supramediterráneos subhúmedos o húmedos, que se verán mermadas, en tanto que se fortalecerá su papel, hoy a menudo secundario, en los territorios supratemplados colindantes. En cambio, los melojares (*Quercus pyrenaica*), quejigares levantinos (*Q. faginea* subsp. *faginea*) y quejigares africanos (*Q. canariensis*) meso- y supramediterráneos andaluces; los melojares y quejigares portugueses (*Q. faginea* subsp. *broteroi*) meso- y supramediterráneos del suroeste ibérico; y la mayoría de los quejigares levantinos mesomediterráneos, experimentarán una crisis severa, con extinciones locales por falta de territorios más altos e imposibilidad de migrar hacia el norte. La crisis será más aguda en el suroeste peninsular (quejigares africanos y portugueses, melojares) que en la mitad iberolevantina (quejigares levantinos).

Las respuestas de estos bosques perjudicados por el cambio climático proyectado son complejas y se verificarán en plazos más dilatados que los de las proyecciones. En aquellos tipos que cuentan con posibilidades de expandirse, debe tenerse presente que la retracción en las áreas más afectadas por el cambio puede ser bastante rápida, en la medida en que sequías recurrentes, plagas asociadas u otras perturbaciones diezmen el arbolado adulto y reduzcan su reclutamiento. La expansión será, en cambio, mucho más lenta, debido a la longevidad de las especies dominantes y a que se necesitan varias generaciones para que, de forma natural, una especie arbórea amplíe significativamente su área. Las velocidades de migración documentadas en los períodos post-glaciales cuaternarios no parecen alcanzables debido a la degradación de los paisajes actuales y a que los hábitats de destino se hallarán en muchos casos ocupados por otras especies. Las perturbaciones podrán acelerar la dinámica de los cambios, pero el balance previsible es que la expansión no compense a las pérdidas de territorio, al menos a medio plazo. Las masas con mayores posibilidades de persistencia serán aquéllas con suficiente continuidad altitudinal o latitudinal. En las masas localizadas en territorios sometidos a retracción podrán subsistir reductos acantonados en topografías favorables (barrancos, umbrías), por lo que la diversidad topográfica será otro factor importante en la dinámica de cambios. Los procesos de retracción mediados por perturbaciones pueden originar la desaparición temporal del estrato arbóreo hasta que se regenera un nuevo arbolado de composición acorde con las características del clima. En tales períodos muchas especies ligadas al ambiente forestal pueden enrarecerse o desaparecer rápidamente. Además, la sustitución de una cubierta arbórea caducifolia por otra perennifolia comporta cambios en el régimen lumínico que afectarán al rico sotobosque caducifolio. Peñuelas y Boada (2003) describen la sustitución progresiva de hayedos por encinares en un intervalo altitudinal relativamente amplio (700-1200 m) de las laderas meridionales del Montseny durante el último medio siglo. La dinámica de reemplazamiento parece bastante efectiva en las zonas de ecotono entre ambos tipos de bosque, y está apoyada por diferencias en el reclutamiento de las dos especies y por una mayor incidencia de síntomas de defoliación o decoloración en las hayas situadas en las zonas de retracción del hayedo.

La casuística de los bosques de coníferas es también variada. El calentamiento y la aridización generalizados provocará reducciones de área en los tipos de alta montaña, como los pinares de pino negro (*Pinus uncinata*), de pino albar (*Pinus sylvestris*) e incluso de pino salgareño (*Pinus nigra s.l.*). No obstante, en ciertas áreas actualmente lluviosas, como es el caso del Pirineo, los pinares albares y salgareños podrían beneficiarse de la disminución de las disponibilidades hídricas para ganar terreno a bosques caducifolios exigentes en precipitaciones. La menor innivación causará modificaciones en la composición de los bosques de alta montaña; en el Pirineo, por ejemplo, cabe esperar una reducción de los pinares negros

con rododendro en favor de los pinares con gayuba. La incidencia creciente de plagas se ha documentado ya en enclaves meridionales de carácter reliquial del pino albar (Hódar *et al.* 2003), al igual que su sensibilidad a la sequía en enclaves peninsulares septentrionales (Martínez-Vilalta y Piñol 2002).

El comportamiento de los sabinares albares (*Juniperus thurifera*) es más difícil de predecir. Sus territorios actuales, principalmente supramediterráneos e interiores, estarán expuestos al calentamiento pero también a la disminución de precipitaciones, lo que puede prevenirles, en combinación con las características edáficas, frente a la expansión de especies esclerofilas o marcescentes de *Quercus*. Además, la sabina albar tolera los climas mesomediterráneos semiáridos, como muestran sus poblaciones de la depresión del Ebro y el sudeste de La Mancha. En cambio, su tolerancia a las perturbaciones píricas es escasa, y de hecho su distribución actual se asocia a regímenes de baja incidencia y recurrencia de incendios (Vázquez *et al.* 2002). Consideraciones similares pueden hacerse respecto a los enebrales arborescentes (*J. oxycedrus* subsp. *badia*), actualmente muy fragmentados en enclaves abruptos del centro y oeste peninsular, o los sabinares caudados (*Juniperus turbinata*), que aparte de sus localizaciones en los sistemas dunares litorales ocupan reducidos enclaves termomediterráneos interiores en Andalucía y el Algarve. Estos tipos de bosques debieron ocupar mayores extensiones en épocas más áridas, aunque también más frías, del Pleistoceno reciente. La sabina mora (*Tetraclinis articulata*), hoy reliquial en la sierra de Cartagena, podría verse en cambio favorecida por el cambio climático, a tenor de sus preferencias climáticas en el noroeste de África. Todo lo contrario que el pinsapo (*Abies pinsapo*), endémico de las serranías malacitano-gaditanas (Arista *et al.* 1997), donde en la mayor parte de su intervalo altitudinal actual las condiciones se tornarán demasiado cálidas y secas para sus exigencias.

La respuesta de los pinares mediterráneos, que en conjunto suponen la mayor parte de la superficie forestal actual peninsular, será también variada. Ya se ha mencionado la previsible reducción de área de los pinares resineros y salgareños, al menos en parte de sus enclaves actuales, como consecuencia de la aridización. Además, en el caso de los segundos se incrementará la susceptibilidad al fuego de sus territorios actuales, una perturbación que acarrea su fracaso regenerativo (Trabaud y Campant 1991, Escudero *et al.* 1997, 1999; Rodrigo *et al.* 2004). La respuesta de los pinares resineros frente al fuego es buena, aunque con desigualdades territoriales importantes (Faraco *et al.* 1993, Pérez *et al.* 2003). El pino carrasco (*Pinus halepensis*) puede verse favorecido, al menos en la mitad oriental peninsular, puesto que soporta relativamente bien los climas semiáridos, es capaz de establecerse en medios abiertos y además su capacidad competitiva frente a las encinas se incrementa con la xericidad y con la recurrencia de perturbaciones (Zavala 1999, 2003; Zavala *et al.* 2000).

Los bosques esclerofilos están expuestos a tendencias territoriales divergentes. La "mediterraneización" del tercio norte peninsular favorecerá la expansión de encinares (alsinares y carrascales) y alcornocales -sobre todo en el noroeste- a costa de otros bosques caducifolios. Peñuelas y Boada (2003) documentan un proceso de esta naturaleza en la montaña media catalana. La expansión debería ser más rápida en las tierras bajas, aunque su mayor grado de deforestación actuará en contra. Los enclaves fragmentarios de bosques esclerofilos en el litoral y los valles interiores galaicos, en la costa y las montañas vasco-cantábricas y en la vertiente pirenaica meridional constituirán focos eficaces para esta expansión. En la región Mediterránea, en cambio, aunque la aridización favorecerá ascensos altitudinales de la vegetación esclerofila a costa también de bosques principalmente caducifolios, las pérdidas potenciales de territorio serán mayores debido a la expansión de los climas semiáridos y áridos, sobre todo en la mitad meridional. En episodios recientes de sequía se ha puesto de manifiesto la sensibilidad de los bosques esclerofilos, debido a su escasa eficiencia hídrica bajo condiciones extremas y a su lenta recuperación posterior, efectos que se acentúan en orientaciones de solana y suelos bien drenados o con poca capacidad de retención (Peñuelas *et al.* 2000, 2001; Martínez-Vilalta *et al.* 2002a). La agudización de síndromes como la "seca"

de carrascas y alcornoques, hoy extendida en el cuadrante suroccidental (Montoya y López Arias 1997), será uno de los mecanismos que intervengan en la retracción de los bosques esclerofilos (Brasier 1992, 1996; Brasier y Scott 1994, Montoya y Mesón 1994). La aridización afectará de lleno al núcleo principal de las dehesas ibéricas, un sistema agroforestal de elevada biodiversidad en el que la regeneración del arbolado es problemática debido a las interacciones con el uso ganadero (Pulido *et al.* 2001). Tanto la estructura de las dehesas, incluyendo el mantenimiento del arbolado, como la viabilidad de su uso ganadero serían negativamente afectadas por el cambio climático proyectado.

El territorio que puedan perder los carrascales en el sur se compensará en parte con territorios ganados en el norte, a los que su acceso no es difícil debido a la extensa distribución peninsular de este árbol. Más irreversible será el retroceso del alcornoque, por sus mayores exigencias en cuanto a disponibilidad hídrica, en la mitad meridional y sobre todo en el suroeste (Andalucía occidental, Sierra Morena, Extremadura y Montes de Toledo), donde los refugios de mayor altitud son pocos y limitados en extensión.

5.3.3.3. Vegetación arbustiva

Las arbustedas y matorrales constituyen tipos de vegetación extraordinariamente variados en el territorio español y albergan una notable diversidad florística. En efecto, a pesar de su relativa simplicidad estructural, su composición florística responde con elevadas tasas de recambio a los gradientes climáticos, edáficos y geográficos. Como en el caso de los bosques, la mayoría de los tipos de vegetación arbustiva se hallan incluidos en la Directiva Hábitats, y a algunos de ellos se les ha concedido interés prioritario.

Las respuestas de la vegetación arbustiva dependerán en cada territorio de la dirección predominante en las tendencias antagónicas de cambio climático. El incremento de la productividad impulsado por el calentamiento y reforzado por las concentraciones crecientes de CO_2 favorecerá el desarrollo del arbolado y el desplazamiento sucesional de las comunidades de matorral, pero también la colonización por matorrales de superficies de pastos o de cultivos abandonados, como ha venido ocurriendo en los últimos decenios. En cambio, la aridización promoverá la extensión de las estructuras arbustivas y de matorral, más simples y de menores exigencias hídricas que los bosques. La intensificación de ciertas perturbaciones, como los incendios, el abandono de usos agropecuarios en las tierras cuya productividad descienda con el cambio climático, y el colapso de ciertos bosques afectados por las crisis de sequía, serían procesos paralelos y favorecedores de la expansión de los matorrales, que en cualquier caso experimentarán notables reajustes en su composición florística y en su distribución.

Las arbustedas caducifolias comprenden diversos tipos de espinares de hoja caduca (perennifolios en algún caso, como las bojedas de *Buxus sempervirens*) que se hallan ampliamente extendidos como etapa preforestal de muchos bosques eurosiberianos, así como en áreas mediterráneas de montaña y a lo largo de las vegas fluviales. Por sus exigencias hídricas, puede predecirse que sufrirán regresiones en la mayor parte de su distribución actual, particularmente agudas en las representaciones más meridionales, correspondientes a los espinares andaluces con agracejos.

La distribución actual de las arbustedas esclerofilas comprende principalmente los pisos termo- y mesomediterráneo, además de algunos enclaves aislados en territorios eurosiberianos meridionales que actuarán como focos de expansión a medida que se acentúe la “mediterraneización”. El calentamiento y la aridización del clima promoverán su expansión, tanto en altitud como hacia latitudes más septentrionales. La aridización favorecerá la extensión de las formaciones propias de climas semiáridos y áridos (coscojares, lentiscares, espinales murciano-almerienses, etc.), que ampliarán cuando menos sus áreas potenciales de

distribución. Las posibles expansiones no serán homogéneas porque la resistencia a la sequía es diferente entre especies, tanto en los individuos adultos (por ejemplo, lentiscos, labiérnagos y enebros muestran mayor tolerancia que las coscojas; Martínez-Vilalta *et al.* 2002a, b; Ogaya *et al.* 2003), como en las plántulas (Ogaya *et al.* 2003, Vilagrosa *et al.* 2003). De hecho, para algunos tipos de arbustedas esclerofilas exigentes en precipitaciones cabe esperar mermas territoriales, sobre todo en el sur y sudoeste peninsular: madroñales (véase Martínez-Vilalta *et al.* 2002a, Ogaya *et al.* 2003), brezales arbóreos, quejigares enanos, etc. En cambio, estos mismos tipos, u otros similares (bosquecillos de laureles, por ejemplo), ampliarán su territorio en las áreas mediterraneizadas del tercio norte peninsular.

Mientras las arbustedas esclerofilas están dominadas por el llamado elemento pre-mediterráneo, formado por especies en su mayoría rebrotadoras, con sistemas radiculares relativamente profundos, longevas, zoócoras y exigentes en cuanto a las condiciones de germinación e instalación, en los restantes tipos de matorrales mediterráneos predominan arbustos y matas diferenciados más recientemente desde el punto de vista evolutivo, de menor porte y/o longevidad, con raíces más superficiales, desprovistos a menudo de capacidad de rebrotar, con diseminación no especializada o pasiva y diásporas que germinan con facilidad en los claros abiertos por perturbaciones (Herrera 1992, 2001). Parte de esta flora muestra además arquitecturas foliares flexibles, incluyendo la facultad de perder parte del follaje en las épocas de mayor aridez (Valladares 2001). Aunque los individuos adultos de ciertas especies muestran vulnerabilidad frente a la sequía, debido sobre todo a su somero enraizamiento, las poblaciones son capaces de recuperarse con rapidez mediante germinación (Peñuelas *et al.* 2001). Las respuestas de esta naturaleza resultan sin embargo estrechamente dependientes de las fluctuaciones climáticas (Quintana *et al.* 2004). La flora de estos matorrales reúne por ello algunos de los más típicos síndromes adaptativos a la sequía y a otras características de los ambientes mediterráneos, y en conjunto cabe esperar que la aridización del clima pueda facilitar su expansión. No obstante, las relaciones de los distintos tipos de matorrales con el clima son muy variadas y también por ello sus respuestas al cambio proyectado.

Entre los matorrales silicícolas, los tipos más ombrófilos experimentarán reducciones de área y retracciones en sus límites de distribución actuales, aunque en grados probablemente más moderados que otras formaciones más sensibles. Es el caso de los brezales y jaral-brezales de carácter atlántico e ibero-atlántico, cuya distribución actual se produce en climas subhúmedos o más lluviosos. Su retroceso será más fuerte en el cuadrante suroccidental (Merino *et al.* 1995): sierras gaditanas, Sierra Morena, Montes de Toledo y Extremadura. Más al norte, en los Montes de León y la Cordilleras Ibérica y Central, así como en la cornisa vasco-cantábrica, la reducción será menos drástica pero con cambios en la composición florística impulsados por la "mediterraneización". Las brañas o brezales higroturbosos, priorizados en la Directiva Hábitats, experimentarán las afecciones más severas y es previsible que registren extinciones locales importantes. Similares tendencias cabe esperar en los escobonales y piornales, sobre todo aquellos tipos más ombrófilos que ocupan extensiones notables en climas supramediterráneos y supratemplados. En cambio, los retamares (*Retama sphaerocarpa*) gozarán de posibilidades de expansión, por la ampliación considerable de los pisos termo- y mesomediterráneo y por su tolerancia a la sequía.

Las retracciones que experimenten otros matorrales silicícolas más ombrófilos favorecerán a los jarales, que también se beneficiarán de las posibles intensificaciones regionales del régimen de incendios. Dentro de ellos, los tipos más termófilos se ampliarán de forma notable, particularmente los jarales de jara pringosa (*Cistus ladanifer*) y de otras jaras capaces de perder hojas en la estación seca (*C. monspeliensis, C. salviifolius*, ...), en detrimento de las relativamente más mesofíticas como *Cistus populifolius* o *C. laurifolius*.

Los matorrales propios de sustratos particulares, como las rocas ultrabásicas (peridotitas, serpentinas), las dolomías o los yesos, contienen una proporción importante de endemismos

ligados a estos tipos de sustratos selectivos para la flora (edafismos), y probablemente subsistirán en ellos con reajustes menores, puesto que han soportado *in situ* cambios climáticos precedentes de mayor envergadura. Su tolerancia al estrés inducido por la composición química desfavorable de los suelos que habitan, y la baja competencia que caracteriza a tales medios, jugarán a su favor en caso de aridización del clima. No obstante, convendrá realizar seguimientos de su evolución futura puesto que la combinación de calentamiento y aridización proyectada puede ser inédita y limitante en algunos territorios. En el caso de las "estepas" yesíferas ibéricas, priorizadas en la Directiva Hábitats, es factible que con la aridización puedan extenderse a afloramientos yesíferos del Pirineo y del norte del Sistema Ibérico cuyo clima actual es demasiado lluvioso para que se manifieste el efecto selectivo del yeso sobre las plantas.

Los matorrales propios de suelos calcáreos (romerales, salviares, espliegares, aulagares, tomillares, etc.), muy extendidos en la España central y oriental, experimentarán un avance en términos generales. Florísticamente son más ricos que sus homólogos silicícolas, y cuentan con mayores representaciones de plantas adaptadas a la xericidad. Dentro de ellos, los tipos más xerófilos actualmente dominantes en el sudeste semiárido serán los más favorecidos y podrán expandirse hacia el interior manchego, el mediodía valenciano, la hoya de Baza y Andalucía oriental. Los tipos más termófilos, hoy restringidos principalmente a comarcas litorales, se expandirán en altitud y hacia el interior, aunque estas expansiones filtrarán sólo los elementos menos dependientes de la oceanidad y estarán moderadas por el efecto de barrera de las cadenas montañosas costeras. Los tipos mesetarios no sufrirán cambios importantes, salvo las reducciones periféricas y los ascensos en altitud a costa de los tipos de media y alta montaña. En el valle del Ebro los romerales de la depresión podrían expandirse a costa de los tipos periféricos (Gavilán 2003). Los matorrales de media y alta montaña, ricos en endemismos estenócoros y en caméfitos pulviniformes, verán reducido su espacio climático, aunque su desplazamiento por componentes más termófilos de matorral será lento y limitado. Sin embargo, el calentamiento previsible en estas áreas incrementará la productividad y puede facilitar un desplazamiento más efectivo de los matorrales por vegetación arbustiva o arbórea. Este problema será más acusado en las sierras béticas y subbéticas, sometidas a un mayor calentamiento y notablemente ricas en endemismos con escasa capacidad de dispersión, que en el Sistema Ibérico y en las montañas litorales levantinas, que ofrecen mayor posibilidades para la migración y no experimentarán una reducción tan marcada de las áreas de montaña media y alta.

Los cambios en los tipos y superficies de matorral entrañan otras relaciones importantes con el cambio climático. Los matorrales mediterráneos liberan a la atmósfera cantidades considerables de COVs. Igualmente, es característica de muchos tipos de matorral mediterráneo la acumulación rápida de necromasa que favorece el riesgo de ignición y sobre todo de propagación de los incendios (Moreno *et al.* 1998).

5.3.3.4. Vegetación herbácea (prados y pastos)

Las plantas herbáceas constituyen cerca de las cuatro quintas partes del total de las especies de la flora vascular española. En los climas templados del tercio norte peninsular la flora herbácea está dominada por plantas perennes, en tanto que en las áreas de clima mediterráneo dominan las especies anuales, cuyo ciclo vital les permite evitar la sequía estival a la vez que resistir mejor las perturbaciones. Aunque la mayor abundancia y riqueza de flora herbácea se alcanza en las comunidades sin cobertura leñosa o con ésta reducida, y especialmente en aquellas modeladas por las prácticas asociadas al pastoreo, contingentes importantes de la flora herbácea están ligados a los ambientes forestales y preforestales, así como a otros de los grandes tipos de hábitat mencionados en este apartado, y sus respuestas al cambio climático dependerán en mayor o menor grado de las tendencias comentadas al respecto de cada uno de estos hábitat. Las expectativas de la flora y vegetación herbáceas

ante el cambio climático son variadas, dependerán estrechamente de lo que suceda con los usos del territorio, y en particular con el ganadero, que es el que ejerce un mayor control sobre las leñosas y favorece el desarrollo de unos u otros tipos de pastos.

Las tendencias de cambio más destacables para la vegetación pascícola serían las siguientes. De modo general, cabe esperar una reducción de los prados mesofíticos e higrófilos, incluidos los cervunales de montaña media y muchas comunidades megafórbicas de montaña, dependientes tanto de las disponibilidades hídricas como de la abundancia de materia orgánica. Esta reducción será moderada en los territorios de clima templado y más importante en las montañas mediterráneas. Las representaciones finícolas de algunos tipos particulares, como los prados de siega en los sistemas Ibérico y Central, pueden verse sustituidas casi por completo por prados mejor adaptados al agostamiento, como ballicares, fenalares, gramales, juncales churreros, etc.

En contrapartida, diversos tipos de pastos vivaces duros cobrarán mayor importancia, tanto en las montañas eurosiberianas y mediterráneas como en las áreas mediterráneas más afectadas por la aridización. En estas últimas podrán expandirse los espartales (*Stipa tenacissima*), albardinares (*Lygeum spartum*), cerverales (*Brachypodium retusum*), lastonares (*Stipa spp., Helictotrichon spp.*), berceales (*Stipa gigantea*), etc. Estos pastos soportan bien las perturbaciones píricas y contienen habitualmente gran riqueza y abundancia de terófitos. No obstante, ciertos pastos duros de exigencias ombrófilas, como los cerrillares de *Festuca elegans* de las montañas mediterráneas ibero-atlánticas, sufrirán reducciones de área potencial e incluso podrán desaparecer de sus reductos oretanos, mariánicos y nevadenses actuales. También es previsible la retracción, al menos en parte de su área actual, de diversos pastos psicroxerófilos mediterráneos, hoy abundantes en las parameras ibéricas, a lo largo de las vertientes meridionales cantábrica y pirenaica y en las montañas béticas, y marcadamente ligados a climas que promueven procesos de crioturbación del suelo. La retracción obedecería en este caso al desplazamiento competitivo por otros tipos de vegetación favorecidos por el calentamiento del clima, antes que a la aridización.

La vegetación propia de los hábitats más antropizados (comunidades ruderales y arvenses) sufrirá desplazamientos pero no son esperables extinciones, dado el amplio espacio climático propio de la mayoría de sus especies. Al contrario, en un entorno inestable en el que las perturbaciones y los huecos en la cobertura vegetal sean más frecuentes, cabe esperar mayores posibilidades de expansión de estas especies.

En suma, el balance del cambio climático proyectado sería favorable en conjunto para la vegetación herbácea, aunque con condicionamientos importantes derivados de los posibles cambios de uso del territorio. En general el cambio climático favorecería a los tipos de vegetación xerofíticos, a las especies anuales, y en muchos casos a las relativamente oportunistas, con gran amplitud climática (y por tanto geográfica) y mecanismos ágiles de dispersión. Debido al corto ciclo de generación de la mayoría de las especies, y a la facilidad de dispersión anemócora o zoócora de muchas de ellas, los cambios podrían ser relativamente rápidos, aunque la respuesta será más consistente frente a cambios en las disponibilidades hídricas que en el régimen térmico. Se ha especulado con la posibilidad de que la respuesta positiva de las plantas C_4, más exigentes en requerimientos térmicos y lumínicos y con mayor eficiencia transpiratoria, sea más acusada que la de las plantas C_3, aunque la capacidad de carboxilación de éstas se vería favorecida por una atmósfera enriquecida en CO_2.

5.3.3.5 Vegetación rupícola y epífita

El conjunto de la vegetación propia de fisuras de roca, pedregales y canchales comprende una flora altamente especializada con un importante número de endemismos. Prácticamente todos

los tipos se hallan incluidos en la Directiva Hábitats. Las peculiares condiciones de estos medios combinan suelos con escasa capacidad de retención hídrica y pobres en nutrientes, con regímenes de perturbación particulares ligados a los derrumbes periódicos o a la movilidad de los sustratos, para determinar estructuras vegetales muy abiertas en las que las relaciones de competencia por la luz son débiles. La tolerancia al estrés de la flora rupícola incluye la capacidad de afrontar largos períodos de parada o amortiguación fisiológica, y la de concentrar la actividad vegetativa en los cortos y a menudo irregulares períodos favorables. Por todo ello, este tipo de hábitat difícil se cuenta entre los menos directamente afectables por el cambio climático proyectado (Theurillat 1995).

No obstante, el rigor invernal es otro factor adverso para estas plantas, y en sus comunidades se advierte una clara zonación altitudinal. Por ello, ante un calentamiento climático, los tipos de mayor altitud (oro-criorotemplados y oro-crioromediterráneos) podrían verse afectados por la inmigración de especies propias de zonas más bajas. Tal proceso sería en cualquier caso muy lento, puesto que la capacidad de perduración de este tipo de vegetación es importante, como pone de manifiesto la presencia actual en roquedos de baja altitud de poblaciones de especies cuyo óptimo se halla en niveles altitudinales superiores, reminiscentes de períodos fríos precedentes.

La vegetación epífita tiene algunas relaciones florísticas con la rupícola. Se halla débilmente representada en nuestras latitudes, principalmente por helechos y briófitos. Su dependencia de climas con elevada humedad atmosférica y pluviosidad, hacen previsible una reducción de su territorio óptimo, con retracciones hacia áreas oceánicas costeras.

5.3.3.6. Vegetación costera (dunas, playas, acantilados y saladares)

La vegetación costera comprende diversos tipos de hábitats condicionados por la geomorfología litoral y la influencia del rocío marino. Están profusamente recogidos en la Directiva Hábitats, muchos de ellos con carácter prioritario debido a su rareza y a la fuerte regresión de los ecosistemas litorales causada por la concentración ancestral de la población humana en estas áreas, a la que se ha añadido en tiempos recientes la urbanización y la construcción de infraestructuras asociadas al desarrollo turístico.

La modificación del clima debería tener efectos directos bastante moderados sobre los hábitats costeros, por cuanto el calentamiento será ciertamente más suave en el litoral y la aridización se verá parcialmente compensada por la elevada humedad atmosférica que aporta la cercanía del mar. Sin embargo, la previsible elevación del nivel del mar puede provocar una reducción importante de las áreas ocupadas por estos hábitats, además de otras modificaciones en el nivel y la salinidad de las capas freáticas, y en los procesos geomorfológicos que mantienen los sistemas de dunas y los marjales y albuferas litorales. La ocupación del terreno con edificaciones e infraestructuras dificultará que estos sistemas puedan retroceder gradualmente frente al avance del mar. Esta constricción será más grave en sectores como el galaico y sobre todo el cantábrico, donde en algunos tramos la ocupación dunar y post-dunar se ha consumado hace ya tiempo (País Vasco) o corre serio peligro de completarse en breve (Cantabria). Las costas mediterráneas se hallan también afectadas por los mismos procesos, que contribuyen a fragmentar los ecosistemas litorales obstaculizando las posibles vías migratorias. Las ubicaciones actuales de los humedales litorales se verían afectadas por un incremento de la salinidad, que alteraría profundamente la composición del mosaico de comunidades propio de estos sistemas; en casos extremos, podrían ser invadidos directamente por el mar. La vegetación dunar, y en particular las comunidades leñosas, priorizadas en la Directiva Hábitats, se cuentan también entre las más vulnerables a estos procesos. La vegetación de acantilados litorales puede comportarse, en este sentido, como la más resistente frente a los cambios.

Algunas comunidades sabulícolas herbáceas y de matorral tienen interesantes representaciones en arenales del interior. Como en el caso de otros tipos de vegetación ligados a suelos desfavorables, los impactos esperables son moderados, aunque, por tratarse de representaciones muy exiguas cualquier tendencia poblacional descendente acarrearía extinciones bastante rápidas. En el caso de los saladares continentales, un incremento de las temperaturas acompañado de una disminución de las precipitaciones o de su mayor concentración invernal, favorecerían su avance, sobre todo en áreas del sureste ibérico, la meseta manchega, la depresión del Ebro y la cubeta del Duero.

5.3.3.7. Vegetación insular

Se ha especulado con que los impactos del cambio climático podrían ser mayores en las islas, debido a que presentan típicamente floras (y faunas) empobrecidas, con interacciones entre especies más frágiles, y menores tasas de diversidad genética de las especies, tanto endémicas como no endémicas (Frankham 1997). Sin embargo, al menos en islas de extensión reducida el efecto atemperador y humectante del mar puede amortiguar las tendencias del cambio climático. Las proyecciones del modelo Promes (Fig. 5.5-5.6) para las islas Baleares muestran un efecto evidente tanto del calentamiento como de la reducción de disponibilidades hídricas, aunque algo más moderado que el de la mitad oriental peninsular. Por ello, los impactos previsibles en este archipiélago serían similares a los que ya se han comentado para los hábitats que tienen representación en él, con la salvedad de que existiría una mayor proporción de refugios litorales. La vegetación mallorquina de montaña y los efectos del acentuamiento de la aridez en Menorca constituirían los focos de mayor vulnerabilidad.

La resolución de las proyecciones del modelo Promes para el archipiélago canario es insuficiente debido a las dimensiones de las islas en relación con las celdillas y a la difícil interpretación de los cambios en la variada pluviometría de las islas mayores. En cualquier caso, el calentamiento parece que afectará más a las islas occidentales, pero en conjunto será más moderado que en la península y puede evaluarse en algo menos de medio piso bioclimático para el escenario B2 y algo más de medio para el A2. La disminución de las precipitaciones supondrá una expansión moderada de los ombrotipos áridos y semiáridos dominantes en el tramo altitudinal inferior de las islas. Su topografía marcadamente cónica determinará que la disminución de superficie de los distintos termotipos y ombrotipos se incremente progresivamente en los de mayor altitud. En conjunto, y de acuerdo con la peculiar zonación climática y altitudinal de la vegetación canaria (Rivas-Martínez *et al.* 1993, Del Arco *et al.* 2002, Reyes-Betancort *et al.* 2001, Rodríguez Delgado *et al.* 2004), es previsible una expansión de la vegetación inframediterránea árida y semiárida (tabaibales de *Euphorbia balsamifera* y cardonales de *Euphorbia canariensis*), cuyos componentes más dinámicos podrían desempeñar el papel de avanzadillas: tabaibas amargas (*Euphorbia lamarckii, E. regis-jubae, E. berthelotii*), aulagas (*Launaea arborescens*), salados (*Schizogyne sericea*), vinagreras (*Rumex lunaria*), herbazales de cerrillo (*Hyparrhenia sinaica*) y panasco (*Cenchrus ciliaris*), e incluso invasoras como el rabogato (*Pennisetum setaceum*). Los bosquecillos termoesclerofilos de sabinas (*Juniperus canariensis*), acebuches (*Olea cerasiformis*), almácigos y lentiscos (*Pistacia atlantica, P. lentiscus*), con representaciones actuales muy mermadas por los usos urbano y agrícola, tienen pocas posibilidades de desplazarse hacia cotas favorables más elevadas, y serían negativamente afectados por la aridización. Para el monteverde o laurisilva, dependiente de la influencia de las nieblas del alisio, cabe esperar también una reducción de área a causa del adelgazamiento del mar de nubes, motivado por el calentamiento del aire húmedo costero y el rebajamiento del límite inferior de la capa cálida de subsidencia. Los matorrales de *Hypericum canariense* y *Rhamnus crenulata* y el fayal-brezal de *Myrica faya* y *Erica arborea* podrían beneficiarse de la reducción de área de los bosques lauroides, cuya persistencia en los enclaves reliquiales de las islas orientales sería problemática. En cambio, el eventual descenso de la capa de nubes favorecería la expansión de los pinares canarios (*Pinus*

canariensis) y sus escobonales asociados. Son esperables también y destacables los impactos negativos sobre la vegetación hidrófila (sauzales de *Salix canariensis*, palmerales de *Phoenix canariensis*, etc.), hoy ya muy afectada por el aprovechamiento hídrico de las islas, y sobre los hábitats costeros, en los que la remodelación de las costas asociada a la elevación del nivel del mar se superpondrá a las profundas transformaciones causadas por el desarrollo turístico.

5.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

La exposición del apartado precedente pone de manifiesto que prácticamente todos los hábitats y territorios españoles van a experimentar impactos relevantes como consecuencia del cambio climático proyectado. Si se considera que los procesos inducidos por el cambio climático implicarán presiones que superarán la plasticidad y la capacidad de aclimatación de muchas especies, que las respuestas evolutivas son inviables en el corto plazo a que va a producirse el cambio, y que la eficacia de la migración de las especies como mecanismo de persistencia no será suficiente para compensar las extinciones locales, la única conclusión posible es que el cambio climático determinará pérdidas considerables de diversidad florística, añadidas a las que están produciendo ya otros componentes del cambio global (Thomas *et al.* 2004). En este apartado se destacan aquellos grupos de hábitats y territorios cuya diversidad vegetal puede ser afectada más rápida o más intensamente, de acuerdo con lo expuesto hasta aquí.

Alta montaña

La reducción del espacio climáticamente apto para la flora propia de muchos hábitats de alta montaña provocará mermas en sus cortejos florísticos, particularmente relevantes debido a la alta tasa de endemicidad que los caracteriza. Los riesgos son mayores en los macizos no excesivamente elevados, porque el intervalo altitudinal ocupado en la actualidad por hábitats típicos de alta montaña es menor. Por la misma razón y por las tendencias diferenciales del calentamiento proyectado, los problemas serán más graves en las montañas meridionales que en las septentrionales, y más en las cantábricas que en las pirenaicas.

Hábitats mesofíticos de media montaña

La mayoría de los hábitats mesofíticos supramediterráneos y supratemplados sufrirán también presiones de desplazamiento altitudinal, aunque en este caso dispondrán de cotas superiores para expandirse, al menos en los principales sistemas montañosos. De nuevo el mayor riesgo para estos ecosistemas se localizará en las montañas modestas, como Sierra Morena, Montes de Toledo y muchas estribaciones de otros sistemas orográficos, así como en las serranías meridionales. Mientras que el desplazamiento altitudinal es una alternativa de subsistencia para la flora de estos hábitat, la migración latitudinal será muy problemática debido a la orientación transversa de la mayoría de las cordilleras y a la fragmentación y alteración de las tierras bajas intermedias. Por ello, las reducciones de área y el enrarecimiento y quizá la extinción local de elementos florísticos son impactos previsibles, con el agravante de que estos hábitats se caracterizan por albergar taxones en final de área meridional que contribuyen sustancialmente a la rareza florística territorial (Fernández-González 1999). El retroceso de estos hábitats mesofíticos de montaña en el sur de la Península entrañará también una disminución de la abundancia de ciertas especies leñosas con frutos carnosos, con posibles repercusiones en sus animales dispersores. La retracción y el consiguiente empobrecimiento en flora mesofítica de los sistemas montañosos mermará uno de los componentes a los que deben su riqueza florística actual; en contrapartida, actuarán como refugios para la flora de hábitats hoy extendidos por los piedemontes y sensibles a la aridización. Por último, las modificaciones de la vegetación en la media y alta montaña pueden suponer importantes riesgos adicionales si los

colapsos locales de ciertas poblaciones provocan reducciones temporales de la cobertura, que desencadenarían el potencial erosivo propio de los relieves de montaña.

Hábitats mesofíticos cálidos

El conjunto de la vegetación mediterránea rica en elementos marcescentes y lauroides ligados a climas lluviosos en invierno y primavera, experimentará presiones contrapuestas en el norte y el sur peninsular. En el norte la agudización de la sequía estival favorecerá su expansión a partir de los enclaves que actualmente ocupa con carácter más o menos reliquial, aunque tal avance estará fuertemente condicionado por la degradación y fragmentación del territorio, el uso forestal, la competencia con especies invasoras y la elevadísima incidencia de incendios intencionados en algunas áreas. En el sur, y sobre todo en el suroeste, el alargamiento de la sequía estival, combinado con una recarga hídrica insuficiente durante el período invernal, jugarán en su contra, y hay evidencias de la sensibilidad de la flora marcescente y lauroide mediterránea frente a los últimos episodios de sequía. Las distancias son demasiado grandes como para ser salvadas por la flora de los hábitats más meridionales en procesos migratorios naturales. Por ello, en el sur y suroeste peninsular cabe esperar un empobrecimiento del cortejo mediterráneo cálido y mesofítico. Similares consideraciones pueden hacerse respecto a la laurisilva o monteverde canario. En los archipiélagos será importante, además, la presión de las especies invasoras.

Bosques mediterráneos y dehesas meridionales

Grandes extensiones de la mitad meridional peninsular que hoy tienen vocación forestal experimentarán una reducción considerable de las disponibilidades hídricas, por debajo incluso de los requerimientos de los bosques menos exigentes. Los efectos de las sequías crónicas en estos territorios se vienen apreciando ya durante los últimos decenios. La crisis puede ser todavía más aguda en el caso de las dehesas, en las que los problemas de regeneración del arbolado se agravarán con la aridización, que también pondrá en cuestión la viabilidad de los usos agropecuarios tradicionales.

En el sur y sobre todo en el suroeste peninsular, las proyecciones de cambio climático indican la aparición de tipos climáticos nuevos, como el inframediterráneo o las versiones continentalizadas del termomediterráneo, y de combinaciones de sustratos y tipos climáticos hasta ahora inéditas para la vegetación ibérica, como los semiáridos y áridos sobre sustratos silíceos. Estas nuevas condiciones ejercerán un efecto selectivo sobre la flora actual, que en parte se verá excluida por su intolerancia. Como la inmigración de flora adaptada a estas situaciones es improbable a corto plazo, puede producirse un fenómeno de “vaciamiento” de la riqueza florística regional y un empobrecimiento de las comunidades. En una coyuntura semejante se agravaría la invasibilidad por especies exóticas, entre las que las cactáceas y otros elementos xerofíticos, como ciertas acacias, encontrarían huecos para expandirse.

Hábitats litorales

Ya se han mencionado los riesgos particulares que afectan a ciertos sistemas costeros, como los de dunas y albuferas, agravados por la larga historia de ocupación humana del litoral y la intensificación de ciertos usos en las últimas décadas. Las franjas costeras han desempeñado en cambios climáticos anteriores un importante papel de refugio, función que también pueden desempeñar ahora puesto que el calentamiento será más suave y el impacto de la aridización se verá parcialmente compensado por la mayor humedad atmosférica. En contrapartida, la toxicidad del ozono es potencialmente mayor en los ambientes litorales. Las interacciones entre cambio climático y cambios de uso van a ser por ello especialmente decisivas en la conservación de los hábitat litorales.

5.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

Debido a su magnitud y alcance, los impactos del cambio climático sobre la diversidad vegetal serán difíciles de paliar con actuaciones locales. A continuación se enumeran algunas de las opciones que cabría considerar al respecto, englobadas en el marco de las políticas sectoriales correspondientes.

Revisión de la red de espacios protegidos y de la política de conservación

La red actual de espacios protegidos, incluyendo los propuestos para integrar la red europea Natura 2000, cubre una extensión considerable, pero concentrada principalmente en las áreas de montaña y con importantes huecos en las zonas intermedias de llanuras y piedemontes. La conservación de la alta y media montaña es una medida recomendable frente a los impactos del cambio climático, puesto que permitirá los desplazamientos altitudinales de flora. No obstante, es también recomendable revisar la delimitación de los espacios protegidos asegurando que cubran intervalos altitudinales completos, hasta las líneas de cumbres, particularmente en macizos de altitud moderada en los que los pisos de vegetación superiores tienen márgenes de cota estrechos. Además, en esta coyuntura cobran un valor particular las representaciones continuas y extensas de hábitat naturales y seminaturales, sobre todo si se hallan extendidas a lo largo de un intervalo altitudinal amplio, puesto que tendrán mayores posibilidades de conservarse al menos en parte del mismo. Deberá prestarse atención a la conservación de pasillos o corredores y a la conexión entre áreas naturales protegidas demasiado distantes entre sí para los umbrales de dispersión media de las especies. El calentamiento y la aridización conferirán un importante papel como enclaves de refugio a las vertientes norte y las umbrías, que requerirán por ello una atención especial en la conservación. Respecto a las tierras bajas, es importante incrementar la preservación de los hábitats forestales, que desempeñarán un papel importante como focos de recolonización o como jalones en los procesos migratorios. Los bosques mixtos, con estrato de copas integrado por varias especies arbóreas, tendrán más posibilidades de mantener la continuidad forestal a lo largo de los avatares climáticos futuros, en la medida en que alguna de las especies subsista.

En otro orden de actuaciones, sería recomendable el esfuerzo de armonizar las figuras actuales de espacios naturales protegidos, demasiado numerosas (Gómez-Limón 2000), y sobre todo su gestión, puesto que la conservación de la biodiversidad va a convertirse más que nunca en un problema transfronterizo. La puesta en marcha de la Red Natura 2000 puede representar una oportunidad para avanzar por este camino. La generalización de procedimientos de gestión adaptativa en los espacios protegidos (véase más adelante 5.10) constituirá otro requerimiento indispensable para afrontar el seguimiento de los efectos del cambio climático.

Como consecuencia del cambio climático, la protección de especies se verá sometida a un largo proceso de reajustes, que requerirán seguimientos de las poblaciones amenazadas y revisiones periódicas de las listas rojas y de los catálogos de especies protegidas. Como las especies con rangos de distribución geográfica, intervalos altitudinales y tamaños poblacionales menores poseen *a priori* niveles más bajos de plasticidad fenotípica y diversidad genética, son también las principales candidatas a enrarecerse aún más o a extinguirse en medio de cambios ambientales abruptos. La detección de declives poblacionales importantes en especies actualmente no amenazadas requerirá una atención particular en el marco de la conservación, que probablemente se prestará de forma más efectiva desde los ámbitos regionales o autonómicos.

El apoyo de las técnicas de conservación *ex situ* puede ser crucial para la flora amenazada. Los resultados del Libro Rojo revelan que en la actualidad apenas el 40% de las especies más

amenazadas tienen representación suficiente de al menos una de sus poblaciones en los bancos de germoplasma (Moreno Saiz *et al.* 2003).

Restauración ecológica y cambio climático

La restauración ecológica debe incorporar criterios preventivos de los efectos del cambio climático. El uso de especies exóticas en actuaciones de revegetación debe ser estrictamente regulado; de hecho, es previsible que entre las actuaciones futuras de restauración se hallen cada vez con más frecuencia las destinadas a erradicar especies invasoras. Además, la restauración de cubiertas vegetales deberá considerar especies tolerantes a las tendencias de cambio del clima y prever los episodios de marras generalizadas en años desfavorables.

Revisión de la política forestal

Como en el caso de la restauración, deben evitarse las reforestaciones practicadas con especies o procedencias intolerantes al cambio climático o a los riesgos de plagas e incendios asociados. Es recomendable favorecer plantaciones mixtas, para prever fracasos que pueden ser considerables en años climatológicamente adversos, cuya frecuencia aumentará previsiblemente. Los criterios productivistas deberán abandonarse en gran parte de la geografía española en favor de los relacionados con la lucha contra la erosión, la regeneración post-incendio y la conservación de la biodiversidad. El empleo de especies arbustivas en las reforestaciones deberá hacerse más frecuente, por las mismas razones y por su papel facilitador de la regeneración de las leñosas mediterráneas (Vallejo *et al.* 2003). La aridización fomentará el abandono de tierras agrícolas poco productivas, en las que la dinámica natural de la sucesión secundaria puede ser muy lenta bajo las nuevas condiciones climáticas; la reforestación de estas áreas, con especies tolerantes a la sequía y elásticas frente a los incendios, se hará cada vez más necesaria para evitar tendencias degradativas.

Las técnicas de manejo forestal deberán adaptarse a un marco en el que los riesgos de erosión, incendios, pérdida de materia orgánica edáfica y deficiente regeneración de la cubierta forestal van a ser críticos. Los tratamientos forestales deberán ser especialmente cuidadosos con los enclaves susceptibles de desempeñar el papel de áreas de refugio o de escalones migratorios en los desplazamientos de flora, así como, en general, con la diversidad florística de los sotobosques. A medida que se conozcan mejor los procesos de desplazamiento de la vegetación, mediante técnicas de extracción selectiva e incluso reforestaciones planificadas se podrá favorecer el reemplazamiento de masas forestales. Una selección adecuada de las especies utilizables en las reforestaciones que se practican en el marco de las subvenciones de la PAC puede contribuir a paliar las limitaciones migratorias de la flora leñosa, sobre todo en territorios afectados por la aridización y el abandono de tierras cultivadas. En muchos montes mediterráneos serán igualmente necesarios los tratamientos de mejora de la estructura del arbolado que favorezcan su eficiencia hídrica (véase Capítulo 9).

Regulación de los usos ganadero y cinegético en sistemas forestales

La presión excesiva de ganado en bosques y matorrales sometidos a un fuerte estrés hídrico puede acelerar su regresión por la insuficiente regeneración natural y por las lesiones infligidas a los individuos adultos a través del ramoneo. La regulación de las cargas ganaderas es importante en las áreas de monte mediterráneo todavía bien conservadas dedicadas a usos cinegéticos, que han experimentado tendencias recientes hacia la intensificación. En los territorios más afectados por la aridización, en cambio, la disminución de la productividad vegetal terminará por colapsar económicamente las posibilidades de la ganadería extensiva, lo que redundará en un empobrecimiento de la flora herbácea. El posible incremento del uso

ganadero en la alta montaña puede retardar la progresión altitudinal de la vegetación arbustiva y arbórea, aunque en contrapartida acelerará el recambio de la flora herbácea.

Ordenación del territorio y evaluación de impacto ambiental

Varias de las opciones adaptativas mencionadas requieren ser planificadas desde la concepción de una ordenación del territorio que tenga en cuenta los impactos del cambio climático, de forma que se minimicen las interacciones sinérgicas entre cambio climático y cambios de uso. En el nuevo marco para la sostenibilidad que se va a configurar a medida que se modifique el clima, la evaluación del impacto ambiental debe empezar a incorporar la consideración de las interacciones entre los efectos ambientales de los proyectos y los impactos derivados del cambio climático. Por lo que concierne a la diversidad vegetal, impactos como la fragmentación y la reducción de hábitat, la introducción de flora exótica, la intensificación de usos, el excesivo consumo de agua asociado a ciertos usos (véase Capítulo 3), o las afecciones a hábitat no protegidos pero que pueden representar piezas importantes para la redistribución de la vegetación, deben comenzar a evaluarse en este nuevo marco. El desarrollo de evaluaciones ambientales estratégicas y su aplicación a la problemática de la conservación de la biodiversidad (Díaz *et al.* 2001) son herramientas que pueden contribuir al cambio de escala y de perspectiva necesario.

5.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

El papel ecológico de las plantas como productores primarios hace que los cambios en la flora y en la vegetación ejerzan influencias directas o indirectas en casi todos los sectores contemplados en este Informe. Las pérdidas de diversidad florística afectarán a los distintos bienes y servicios que reporta la biodiversidad. Estas pérdidas tiene una relevancia especial en el caso español, puesto que nuestro país alberga una proporción muy elevada de la biodiversidad europea, como se ha indicado en el apartado 5.1. Una sucinta enumeración de estas conexiones es la siguiente.

Los cambios en la estructura y la composición de la vegetación ejercen a su vez efectos sobre el clima, a través de las modificaciones del albedo, de los balances de carbono, la emisión de COVs y, por vía de sus interacciones con el régimen de incendios, contribuyen también a las emisiones de CO_2. Las relaciones entre la diversidad vegetal y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, los ecosistemas acuáticos continentales, las zonas costeras y los recursos edáficos e hídricos en general, se han expuesto en los Capítulos correspondientes (2, 4, 7 y 8) y en el apartado 5.3 de éste. Las interacciones entre especies vegetales y animales son particularmente importantes para ambos grupos de organismos, a la vez que sensibles a las modificaciones fenológicas y distribucionales que impondrá el cambio climático, y se han mencionado en los Capítulos 2 y 6 y en el apartado 5.3. La relación con los riesgos naturales se establece principalmente a través de los incendios y los procesos erosivos superficiales (Capítulo 12). Los cambios fenológicos, las modificaciones de la productividad vegetal y de la composición química de la fitomasa, y los desplazamientos de flora tendrán repercusiones sobre los sectores agropecuarios (Capítulo 10) y forestal (Capítulo 9); a su vez, las interacciones entre cambios de usos vinculados a estos sectores y cambio climático, constituyen uno de los factores determinantes más importantes de la dinámica futura de la diversidad vegetal. Según la Organización Mundial de la Salud (WHO 2003), una de las consecuencias del cambio climático insuficientemente conocida y que necesita seguimiento continuo se refiere a los cambios en la polución del aire y en sus niveles de aeroalérgenos. Respecto a estos últimos, las modificaciones del calendario de floración de muchas especies (García-Mozo *et al.* 2002) supondrán un período más prolongado de presencia polínica en el aire, con las consecuentes repercusiones sanitarias: aumento del número de pacientes de alergia y del período de duración de los

síntomas alérgicos, aumento del gasto farmacéutico derivado, mayor absentismo laboral y escolar, incremento de las urgencias hospitalarias e incluso modificaciones en la temporalidad del turismo. Este problema sanitario tiene implicaciones tanto en el marco local, como regional e incluso nacional. También en relación con el turismo hay que mencionar que ciertos procesos de degradación de la cubierta vegetal susceptibles de desencadenarse con el cambio climático, como la deforestación por sequías, plagas o incendios, la erosión, la homogeneización de los paisajes, etc., suponen pérdidas del atractivo natural para los visitantes potenciales de espacios protegidos que pueden afectar localmente a la demanda ecoturística y a la economía dependiente de este sector.

5.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

Las incertidumbres sobre los impactos que puede entrañar el cambio climático provienen principalmente de nuestro desconocimiento sobre cómo se irán acoplando en el tiempo los distintos factores en juego. Así, por ejemplo, disponemos de escenarios climáticos razonablemente fiables que describen la situación de los elementos del clima dentro de un siglo, pero sus efectos sobre la diversidad vegetal pueden ser sustancialmente distintos dependiendo de las trayectorias temporales de cambio, sobre todo en lo que respecta a las precipitaciones. La incidencia de eventos extremos y los cambios de la estocasticidad climática son más difíciles de proyectar con fiabilidad, pero, por lo que sabemos, sus efectos, directos e indirectos, pueden ser más contundentes e irreversibles que los producidos por las tendencias medias de cambio (Walther *et al.* 2002).

Las sinergias entre el cambio climático y otros componentes del cambio global (atmosféricos y de usos del territorio) constituyen otro de los elementos de incertidumbre. Los indicios apuntan en el sentido de que estos componentes amplificarán en general los impactos del cambio climático, sobre todo en relación con la aridización.

Las respuestas de las especies aportan también fuentes de incertidumbre, debido a la variabilidad esperable y constatada en los signos y magnitudes, así como en los tiempos de respuesta. El elevado número de especies involucradas incrementa esta incertidumbre, por lo que éste es uno de los aspectos que requiere un esfuerzo importante desde el campo de la investigación, enfocado previsiblemente hacia la definición de los atributos funcionales de las especies que condicionan los tipos de respuestas. La incertidumbre es mayor en la medida en que las interacciones entre especies jugarán un papel decisivo (véase apartado 5.3.1), puesto que la modificación de estas interacciones puede anular en muchos casos las respuestas individuales esperables.

Por último, las escalas temporales y espaciales de los impactos representan otro de los retos en la investigación sobre el cambio climático. La mayor parte de la información sobre respuestas biológicas se ha obtenido en escalas de individuo, población o comunidad, pero los efectos en las escalas de paisaje o regionales son más difíciles de modelar y por tanto de predecir. Por otro lado, la resolución espacial de las proyecciones del clima futuro no alcanzan todavía el detalle de las variaciones mesoclimáticas inducidas por la topografía y el relieve, que pueden resultar cruciales para la subsistencia de comunidades y especies en enclaves de refugio.

5.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

La señal del cambio climático confirmado hasta ahora es todavía moderada (véase apartado 5.3.1) y por consiguiente sus efectos se empiezan a detectar de modo parcial. Las evidencias más palpables y extensas por lo que concierne a las plantas en nuestras latitudes se refieren a las modificaciones de la fenología de ciertas especies y a los

patrones de crecimiento detectados en los anillos anuales de los árboles (Hughes 2000, Walther *et al.* 2002, Gitay *et al.* 2002). Existen también evidencias de cambios en la composición de ciertas comunidades, de movimientos de flora, tanto autóctona como invasora, e incluso de virulencia de ciertas plagas, que se han interpretado como consecuencias del cambio climático. Estas evidencias, referidas en el apartado 5.3, son a menudo difíciles de separar de otros impactos del cambio global y, en cualquier caso, no reúnen todavía el cuerpo de datos necesario para conformar un indicador. Disponemos también de estudios que muestran cómo pueden producirse los impactos del cambio climático en las plantas, así como de evidencias sobre los efectos de otros componentes del cambio global (composición química de la atmósfera, cambios de uso del territorio) en la diversidad vegetal, que se han referido igualmente en el apartado 5.3.

La magnitud y complejidad de los impactos previsibles requieren por ello desarrollar seguimientos más detallados, para confirmar las respuestas esperadas o prever a tiempo las inesperadas. Los indicadores de cambio consignados aquí son aquéllos que pueden suministrar información desvinculada de los efectos de otros componentes del cambio global, para los que se dispone de series de datos previas con las que establecer referencias y proyecciones, y que pueden aportar a corto o medio plazo valores indicativos de la magnitud de los efectos del cambio climático en las plantas. Además, la interpretabilidad de los datos, la existencia de bancos de datos internacionales, la comparabilidad con éstos y los métodos de validación están suficientemente establecidos o pueden desarrollarse con un esfuerzo moderado (Erhard *et al.* 2002). Otros indicadores cuyo desarrollo futuro se considera viable y recomendable se comentan en el apartado 5.10.

Bases de datos fenológicos

Diversas fases del ciclo vital de las plantas dependen del curso anual del clima, sobre todo en los climas extratropicales. El desencadenamiento fisiológico de estas fases está controlado por la temperatura en muchas plantas, y por ello su respuesta al calentamiento climático es una de las que primero se han constatado. Hay que tener en cuenta, no obstante, que dependiendo de las especies y fases del ciclo vital que se consideren, el control puede estar ejercido por otros factores, como el fotoperíodo, las disponibilidades hídricas, o aún por combinaciones de factores (Larcher 1995).

Pero para las especies sensibles, la floración y la foliación se han anticipado durante las 3-5 últimas décadas a un ritmo de entre 1.4-3.1 días/década en Europa y algo menos (1.2-2(3.8)) en Norteamérica (Ahas 1999, Chmielewski y Rötzer 2002, Menzel y Estrella 2001, Menzel *et al.* 2002, Walther *et al.* 2002). Los cambios son menos consistentes en las fases estivales u otoñales (Bradley *et al.* 1999, Menzel y Estrella 2001, Menzel *et al.* 2002), pero en Europa el marchitamiento de las hojas de los caducifolios se está retrasando entre 0.3-1.6 días/década. Como resultado, el período de actividad vegetativa se ha estado alargando en promedio unos 3.6 días/década durante el último medio siglo (Menzel y Fabian 1999, Peñuelas y Filella 2001). Estos valores no se desvían demasiado de los deducidos analizando los períodos de crecimiento de la vegetación a través de imágenes de satélite (Myneni *et al.* 1997) y los ciclos anuales de concentraciones atmosféricas de CO_2 (Keeling *et al.* 1996), que señalan además que el alargamiento de la actividad vegetativa es más notorio en las dos últimas décadas. Las modificaciones fenológicas no se producen de una forma territorialmente homogénea, y han permitido detectar áreas en las que el calentamiento no está ocurriendo al mismo ritmo, como sucede en partes del SE de Europa (Menzel y Fabian 1999, Chmielewski y Rötzer 2002), o incluso períodos fríos registrados a lo largo del siglo pasado (Ahas 1999). Los datos disponibles en el nordeste de España (Peñuelas *et al.* 2002) muestran adelantos de 1-5 semanas en la foliación y de 1-10 semanas en la floración para el último medio siglo, y retrasos en la caída de la hoja de entre 1-2 semanas, con valores medios de la respuesta que deben

considerarse elevados en comparación con los del contexto europeo. Las respuestas son muy variables entre especies; en lo que concierne al adelantamiento fenológico, las herbáceas y las plantas de floración temprana responden mejor que las leñosas y en general las de floración tardía (Post y Stenseth 1999).

Por todo ello, los estudios fenológicos son una poderosa herramienta para el seguimiento de la respuesta biótica al cambio climático y, a pesar de que las tomas clásicas de datos fenológicos venían siendo criticadas por diversos sectores de la comunidad científica, en la actualidad se han revitalizado extraordinariamente (Lieth 1997, Schwartz 1999, Wuethrich 2000, McCarty 2001, Menzel 2002). En el marco europeo la principal iniciativa en este campo es la Red Europea de Fenología (*European Phenology Network*, EPN, www.dow.wau.nl/msa/epn), creada para normalizar protocolos (Bruns y van Vliet 2003), coordinar e integrar información y grupos de trabajo (Bruns *et al.* 2003, Schwartz 2003) y desarrollar programas educativos. La coordinación mundial de las redes de seguimiento fenológico se ha tratado de impulsar desde GLOBE (*Global Learning to Benefit the Environment*) (Peñuelas y Filella 2001).

Bases de datos aerobiológicos

La Aerobiología se está utilizando como herramienta para el estudio de la fenología floral masculina de muchas plantas con polinización anemófila, debido a que la presencia de granos de polen en la atmósfera es una consecuencia del estado fenológico de la floración. En esta línea, las bases de datos aerobiológicos están resultando útiles para tales estudios, puesto que en varios países se dispone de series temporales de al menos 20 años. Los datos aerobiológicos se toman diariamente con aparatos que aspiran volúmenes constantes de aire, lo que permite estudiar con detalle la evolución de la fenología floral. Estos aparatos tiene una autonomía semanal y una cobertura de unos 50 km de radio, dependiendo de la topografía y de la capacidad de dispersión de los granos de polen de las especies a estudiar.

En España existe la Red Española de Aerobiología (REA) que cuenta con unas 50 estaciones de muestreo repartidas por todo el territorio español. Recientemente se ha creado la Red Portuguesa de Aerobiología (RPA) que, junto con la REA, permite tener un conocimiento del contenido de polen aerovagante en todo el territorio de la Península Ibérica. Aunque la REA fue constituida formalmente en 1992, en algunos puntos de muestreo cuenta con datos continuos desde 1982. Esta base de datos está poniendo de manifiesto la sensibilidad al cambio climático de las diferentes especies.

Las especies herbáceas tienen un comportamiento diferente de las leñosas. En el área mediterránea su desarrollo y floración dependen más del régimen de lluvias, siendo más importantes los efectos de su distribución temporal que la cantidad total registrada (Emberlin *et al.* 2000). La influencia del cambio climático no ha sido hasta ahora muy acusada ya que los principales cambios se están apreciando en las temperaturas. Sin embargo, un cambio en el régimen de lluvias hacia una mayor torrencialidad o una redistribución estacional de la precipitación podrían tener un mayor efecto.

En cuanto a las especies leñosas la temperatura es el factor que más afecta al desarrollo de las yemas florales de árboles que florecen en primavera temprana, como es la encina, mientras que los árboles de floración más tardía, como el olivo y el alcornoque, son más afectados por el fotoperíodo (García-Mozo *et al.* 2002, Galán *et al.* 2001, 2005, véase también Osborne *et al.* 2000). Un adelanto en la fecha del despertar de las yemas de los árboles y de la floración en general, podría hacerlos más vulnerables a las heladas tardías. Un incremento de la temperatura aceleraría el desarrollo de los órganos florales y vegetativos. Asimismo, se han observado respuestas diferentes de una misma especie dependiendo de la zona geográfica, como cabe esperar teniendo en cuenta las distintas magnitudes y direcciones del cambio climático según territorios.

En el ámbito europeo se está trabajando en esta línea utilizando datos aerobiológicos, ya que se cuenta con una red de ámbito europeo, la *European Aeroallergen Network* (EAN), a la cual pertenece la REA, y que está coordinada también con la EPN. Diferentes trabajos han puesto de manifiesto un adelanto generalizado a nivel europeo de la estación polínica de diferentes especies (D'Odorico *et al.* 2002, Emberlin *et al.* 1997, 2000). En España la mayoría de las series disponibles son todavía cortas, pero parecen apuntar hacia un adelanto en la floración de las especies arbóreas. Este adelanto es más consistente en la estación polínica de *Quercus* en las localidades del interior peninsular (García-Mozo *et al.* 2002a, b). A partir de las bases de datos aerobiológicas y meteorológicas se han podido elaborar modelos en los que se determinan los requerimientos bioclimáticos previos a la floración. Aplicando escenarios climáticos para los próximos 100 años a estos modelos se puede prever que estos árboles de floración temprana podrían sufrir un adelanto en su floración de hasta un mes y medio en algunas zonas del interior peninsular como León o Madrid.

Por otra parte, el incremento de la productividad vegetal asociado al aumento de la concentración atmosférica de CO_2 se manifiesta también en la producción de polen por antera, hecho ya probado de forma experimental (Rogers *et al.* 2004). Los datos aerobiológicos de diferentes estaciones de Europa central muestran una tendencia al aumento de las concentraciones polínicas en la atmósfera. En España no hay aún evidencias claras de este hecho, probablemente debido a que la gran variabilidad interanual de las concentraciones polínicas en el aire, ligada a las fluctuaciones del clima mediterráneo, requiere períodos de análisis más dilatados que en zonas de clima más estable.

Los datos aerobiológicos pueden ser representados mediante tablas y gráficos fácilmente interpretables por los gestores encargados de evaluar los resultados del seguimiento. La REA tiene una dilatada experiencia en difusión de los datos aerobiológicos, ya que éste fue uno de los principales objetivos desde su constitución. Dichos datos deben ser analizados estadísticamente para probar que las tendencias que se están observando no son fruto de las habituales variaciones interanuales.

Banco de datos dendrocronológicos

El crecimiento en grosor de los árboles, estimado a partir de los anillos anuales de crecimiento, se relaciona con las condiciones climáticas y puede servir para confirmar los efectos del cambio climático. Los estudios dendrocronológicos y dendroclimáticos son relativamente recientes en España, puesto que se inician prácticamente con los trabajos de Creus y Puigdefábregas en 1976 y 1983. Desde 1984 la dendroclimatología española se ha desarrollado a partir de estudios sobre especies de *Pinus* y de *Quercus* caducifolios y marcescentes, además de algunos otros géneros de coníferas y fagáceas. Entre los investigadores que más han contribuido a estas actividades cabe mencionar a J. Creus, A. Fernández-Cancio, R. Génova, M. Génova, E. Manrique, K. Ritcher, E. Trobajo, E. Gutiérrez y A. Pérez-Antelo.

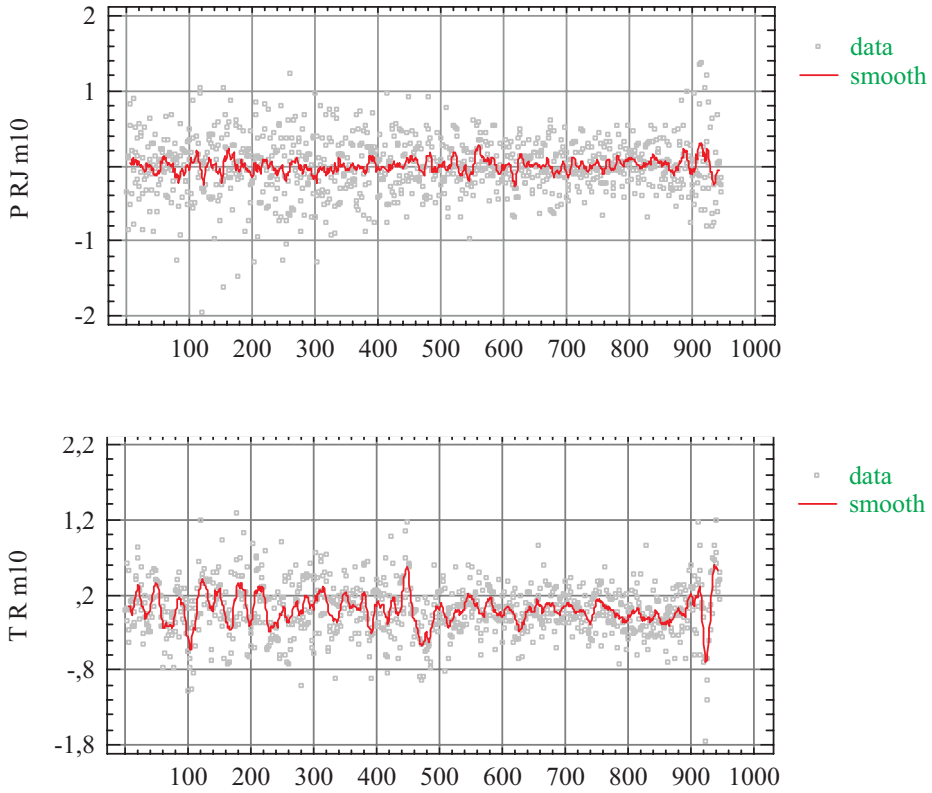


Fig. 5.7. *Representación de la precipitación (arriba) y la temperatura media (abajo) estandarizadas, reconstruidas dendrocronológicamente para 320 estaciones españolas, y su media móvil de 10 años. El intervalo temporal reconstruido (en abscisas) comprende desde 1050 a 1997. Se observan los patrones de alta variabilidad entre 0 y 400 y el comportamiento anómalo de los últimos 50 años, que corresponden ya a datos reales.*

Tabla 5.6. *Zonas y características del Banco de Datos Dendroclimático*.

Zona	Nº de series	Nº de árboles	Especies	Longitud máxima de las series (años)
Guadarrama	259	134	*Pinus nigra*	505 (La Jarosa)
Cuenca	150	91	*Pinus nigra*	629 (Uña)
Galicia	59	40	*Quercus spp.*	432 (Invernadero)
Gredos	43	22	*Pinus nigra*	322 (Piedralaves)
Demanda-Urbión	129	76	*Pinus uncinata*	528 (Vinuesa)
Pirineos	98	65	*Pinus uncinata*	690 (Aigüestortes)
Alcaraz-Segura	74	50	*Pinus nigra*	409 (Paterna)
Cazorla-Filabres-María	60	40	*Pinus nigra*	939 (Sierra de Cazorla)
Teruel	68	56	*Pinus nigra*	410 (Bellena)

El Banco de Datos Dendrocronológicos de referencia para la investigación del clima cuenta en la actualidad con 1064 series, de las que 940, correspondientes a 574 árboles, tienen alto interés por su longevidad y sensibilidad (Tabla 5.6). El intervalo temporal cubierto por las cronologías comprende desde el año 1050 hasta 1997. En los estudios dendroclimáticos la información suministrada por las estaciones meteorológicas empieza a ser suficiente desde el año 1945, empleándose el intervalo 1945-1997 para la calibración y verificación de los modelos. Espacialmente la cobertura de la Península es completa, ya que se ha desarrollado una nueva metodología (Fernández-Cancio y Manrique 1997, Creus *et al.* 1997) que permite, utilizando los sistemas clásicos de reconstrucción del Tree Ring Laboratory (Tucson, Arizona), reconstruir cualquier variable meteorológica mensual en aquellas estaciones que tengan al menos 50 años de registros instrumentales.

Este método se basa en la reconstrucción selectiva de cada variable, correlacionándola con la totalidad del Banco de Datos. El modelo aplicado se calibra y verifica y su fiabilidad estadística se analiza por comparación con simulaciones aleatorias del registro climático, según la distribución de los datos de la variable real. Así, pueden reconstruirse de forma fiable un 57% de las variables. En el año 1300 comienza la estabilización de la varianza y a partir del 1500 las reconstrucciones son válidas en la totalidad del territorio. El alcance de la señal climática para las temperaturas es muy amplio, puesto que llega a Canarias por el sur y no está determinado hasta qué punto de Europa por el norte. Para las precipitaciones, en cambio, la fiabilidad es mucho más baja. La Pequeña Edad Glacial (PEG) queda completamente definida y también la evolución de la variabilidad climática (Manrique y Fernández-Cancio 1999, 2000). Espacialmente, toda la Península Ibérica puede ser reconstruida (Candelas 2000).

La señal (Fig. 5.7) concuerda cualitativamente con las tendencias detectadas en la evolución climática del Hemisferio Norte (www.ngdc.noaa.gov/paleo/recons.html). Algunas de las cronologías obtenidas se han incorporado a la Base de Batos Geofísicos de carácter Dendrocronológico de NOAA *Paleoclimatology Program* a través del *International Tree Ring Data Bank* (ITRDB). Como se observa en las reconstrucciones estandarizadas del milenio en 320 estaciones españolas (Fig. 5.7), el episodio de precipitación y temperatura del último medio siglo, esencialmente cálido y alternativamente muy húmedo y muy seco, parece tener características inéditas en España por comparación con las tendencias y variabilidad de los últimos 1000 años. Desde este punto de vista podemos hablar de un cambio climático actual respecto a las tendencias del último milenio.

Localmente es posible identificar, en cada estación meteorológica, el comportamiento del actual episodio climático y su evolución. La reconstrucción adicional del clima permite detectar el impacto en la vegetación y, consecuentemente, pueden ser analizadas las tendencias de los cambios en la misma, simulando los desplazamientos actuales y futuros. Un análisis ARIMA sobre las series temporales permite, además, tener una idea cualitativa de las predicciones en los próximos diez años. Los gestores de los sectores forestal, hidrológico y protección civil pueden ser los principales beneficiarios de estas predicciones.

Teledetección

La información brindada por los sensores remotos instalados en los satélites tiene múltiples aplicaciones ambientales, entre las que se cuentan recientes e importantes contribuciones sobre los impactos del cambio climático en la vegetación. El análisis de series temporales del índice de vegetación basado en la diferencia normalizada (NDVI) ha confirmado el alargamiento del período vegetativo en el hemisferio norte (Myneni *et al.* 1997, Chen y Pan 2002). Disponibles desde los años 70, las series de imágenes de satélite permiten asimismo cuantificar, cada vez con mayor resolución, los cambios de uso y de cobertura vegetal de los territorios, y a través de ellos los cambios en la estructura del paisaje, uno de los indicadores de

biodiversidad considerados más prometedores (Fernández-González 2002). Utilizando series temporales pueden llegar a caracterizarse límites biogeográficos con independencia de los diferentes tipos de vegetación actual (Lobo *et al.* 1997), que podrían emplearse en los seguimientos de los desplazamientos vegetacionales forzados por el cambio climático. Con los modernos sensores es posible también evaluar cada vez con mayor resolución el contenido hídrico, el estado fisiológico o el crecimiento de la vegetación, por lo que la tecnología basada en la teledetección representa una importante herramienta para el seguimiento de los impactos del cambio climático.

5.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

El objetivo de avanzar hacia formas de desarrollo sostenible ha encontrado un problema de gran calado en el cambio climático. La Unión Europea formuló en la reciente cumbre de Göteborg (2001) el compromiso de detener las pérdidas de diversidad biológica en su territorio para 2010, como una implicación ineludible del desarrollo ambientalmente compatible. Evitar las pérdidas de biodiversidad añadidas que se deriven de los impactos del cambio climático, un conflicto global que requiere respuestas globales, representa un reto difícilmente abordable con medidas locales, cuya eficacia siempre se verá limitada. Las políticas sectoriales concernidas por los impactos del cambio climático sobre la diversidad vegetal se han mencionado en el apartado 5.5 y se relacionan fundamentalmente con competencias asumidas por las autonomías o las administraciones locales. De ahí que, por una parte, las estrategias que se elaboren en este sentido requieren un marco geográfico más amplio en el que puedan coordinarse e integrarse. Por otra, en el ámbito de las iniciativas que se desplieguen desde la UE debe reivindicarse la importante proporción de la biodiversidad europea albergada en España. La magnitud de los impactos previsibles del cambio climático recomiendan por ello una revisión de la estrategia española para la conservación de la biodiversidad (MIMAM 1999).

La ordenación del territorio debe incorporar la consideración de los impactos del cambio climático cuando menos para tratar de minimizar sus interacciones negativas con los cambios de uso del territorio, en particular los efectos de la construcción de infraestructuras y de la urbanización en la fragmentación y degradación de hábitat, y los desplazamientos geográficos de otros usos forzados por el cambio climático. La gestión de los recursos naturales afronta cambios considerables en la productividad de las explotaciones forestales, agrícolas y ganaderas, en la localización futura de las mismas y en sus modalidades de intensificación, con connotaciones que serán difícilmente sostenibles en muchos casos. El área de calidad y evaluación ambiental tiene también que asumir el nuevo marco de interacciones generado por el cambio climático; la aplicación de evaluaciones ambientales estratégicas, en lugar de evaluaciones del impacto individual de cada proyecto, puede contribuir al cambio de perspectiva.

La protección de la naturaleza, junto con la restauración ecológica en sentido amplio, es la política sectorial más directamente involucrada en los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad, como se ha expuesto en el apartado 5.5. Estos impactos están empezando a poner de manifiesto, y lo harán con mayor contundencia en un futuro inmediato, el valor de los ecosistemas y los beneficios directos e indirectos que reportan a la humanidad, lamentablemente infraestimados con demasiada frecuencia, sobre todo en sus valoraciones económicas. Es por ello el momento de reivindicarlos a través de programas de educación y concienciación ambiental, para hacer asumibles las políticas sectoriales capaces de atenuar los impactos y para involucrar a las administraciones y a los ciudadanos en su desarrollo y aplicación.

5.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

La investigación sobre los impactos del cambio climático en la vegetación puede estructurarse en tres líneas principales e interconectadas: el seguimiento de los cambios reales que se están produciendo o se produzcan, las respuestas de las especies y comunidades a los cambios previsibles, y la elaboración de modelos predictivos, basados en la información suministrada por las anteriores y en las proyecciones climáticas, que permitan anticipar los cambios florísticos y vegetacionales esperables. La continuidad de los seguimientos permitirá contrastar el grado de adecuación de las predicciones de los modelos, introduciendo en su caso y con suficiente antelación medidas correctoras o paliativas de los impactos.

Las actividades de seguimiento comprenden varios niveles desigualmente desarrollados en la actualidad. Es conveniente impulsar la participación de grupos de investigación en las redes de seguimiento fenológico, puesto que la participación actual es muy escasa (sólo dos grupos, aparte de la REA, en la EPN). Es poco probable, además, que los grupos de investigación se involucren en seguimientos a largo plazo sin un apoyo financiero seguro. Respecto al seguimiento aerobiológico, aunque se cuenta con un número importante de estaciones aerobiológicas en España gestionadas por la REA, existen grandes zonas geográficas insuficientemente cubiertas, como Castilla y León y Castilla-La Mancha. Este hecho, junto con los costes de mantenimiento de los captadores y sobre todo de lectura de las muestras, que requieren un gran número de horas de análisis al microscopio óptico, componen las necesidades de financiación de la red, aportadas hasta ahora por las diversas administraciones públicas a cambio de la información generada para aplicaciones alergológicas. Las posibilidades de aplicación del banco de datos dendrocronológicos como indicador del cambio climático requieren todavía desarrollos metodológicos. La comprensión completa del alcance de la perturbación actual y de sus características se alcanzaría buscando más árboles longevos de más de 500 años y localizando y analizando maderas fósiles y subfósiles, con las que se fortalecería la señal de la fase cálida Altomedieval (1000-1300 DC) y el importante episodio climático que la precedió (600-1000 DC).

Además del desarrollo de seguimientos basados en la teledetección, como se ha indicado en el apartado 5.8, el seguimiento sobre el terreno de los cambios florísticos y de vegetación constituye otro elemento imprescindible. La aproximación más interesante consistiría en articular una red de parcelas de seguimiento permanente, representativas de distintos hábitat y paisajes con diferentes grados de vulnerabilidad a los efectos del cambio climático y adecuadamente distribuidas de acuerdo con las unidades biogeográficas españolas. La red de espacios protegidos podría constituir un marco para la localización de los puntos de seguimiento, por cuanto ofrecen un control aceptable de los usos del territorio y disponen de información cartográfica y florística de apoyo. La iniciativa podría coordinarse con los planes de seguimiento que exigirá la Red Natura 2000 y beneficiarse de las posibilidades de cofinanciación desde la UE. Aparte de muestreos periódicos de la diversidad florística a distintas escalas de resolución espacial, se podrían incorporar también seguimientos fenológicos y demográficos de especies clave o de especies seleccionadas y representativas de distintos modelos de respuesta al cambio climático. Los protocolos de seguimiento deben poder acoplarse a procedimientos de manejo adaptativo para evaluar los efectos sobre la biodiversidad de actuaciones concretas y sus interacciones con el cambio climático. Para la alta montaña está funcionando el proyecto GLORIA-Europe, con parcelas permanentes en las cumbres de 17 cordilleras europeas, entre las que se incluye Sierra Nevada y el Pirineo (Pauli *et al.* 2004; www.gloria.ac.at). La iniciativa está globalizándose a través de GLORIA-Worldwide. La red de parcelas para el seguimiento de daños forestales (Montoya y López Arias 1997), por su parte, debe mantener sus actividades, imprescindibles para evaluar los efectos de sequías y plagas.

En este sentido, el proyecto de seguimiento demográfico iniciado con 40 especies vegetales amenazadas dentro del Atlas de la Flora Amenazada (Moreno Saiz *et al.* 2003) podrá permitir

en un futuro detectar tendencias en estas especies y extrapolar conclusiones y medidas de gestión respecto a otras plantas sometidas a riesgo. Los estudios demográficos deberían acompañarse de los imprescindibles estudios genéticos (e.g., sistemas de cruzamiento, niveles y efectos de la consanguinidad, diferenciación genética entre poblaciones) para clarificar el papel en la conservación y la vulnerabilidad de las distintas poblaciones (Hampe 2004). Otra red complementaria que cabría considerar es la que atañe al seguimiento de la regeneración post-incendio en los incendios forestales, puesto que es previsible que tras estas perturbaciones se empiecen a registrar cambios importantes.

En los enfoques sobre respuestas de las especies y comunidades al cambio climático se necesitan aproximaciones experimentales y de campo. Estas últimas, como los seguimientos antes mencionados, deben enfocarse a largo plazo, por las características de los procesos climáticos y por la naturaleza fluctuante de los climas mediterráneos. La carencia de este tipo de enfoques a largo plazo en nuestro país ha sido manifestada por numerosos investigadores (Moreno y Fellous 1997, Herrera 2001, Zamora *et al.* 2001, Hampe 2004). Las modificaciones de las interacciones entre especies, la caracterización de grupos funcionales de plantas con similares respuestas al cambio climático y la evaluación de indicadores de los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad (Díaz 2002, Fernández-González 2002) son algunos de los temas prioritarios en esta línea.

Por último, el desarrollo de modelos predictivos de la dinámica de la diversidad florística bajo las presiones del cambio climático, representará la herramienta más elaborada para generar proyecciones, diseñar medidas paliativas y evaluar su eficacia (Nualart 2003, Thomas *et al.* 2004). Los modelos predictivos deberán incorporar progresivamente resoluciones en las escalas de paisaje y regional, efectos de la fragmentación, capacidades de dispersión y migración, efectos indirectos del cambio climático e interacciones con otros componentes del cambio global, aspectos todos ellos que requieren desarrollos metodológicos. La fiabilidad de las predicciones depende en buena medida de la calidad de la información de partida sobre la distribución de la diversidad florística y vegetacional española, que empieza a ser importante, pero tiene todavía carencias en la resolución espacial de los datos y sobre todo en la recopilación de fuentes documentales, cartográficas y de colecciones (herbarios) muy dispersas. Es necesario apoyar las iniciativas de informatización de este tipo de datos, entre las que se cuentan, a nivel nacional, el proyecto Anthos (www.programanthos.org), del Jardín Botánico de Madrid, que ha recopilado hasta ahora cerca de 700000 registros florísticos españoles, y el Banco de Datos de Biodiversidad de Cataluña (BDBC, http://biodiver.bio.ub.es/bioca), con objetivos similares pero limitado al territorio catalán. A nivel internacional destacan el GBIF (Global Biodiversity Information Facility, www.gbif.org) y BIOCASE (Biological Collection Access Service for Europe, www.biocase.org). Los Atlas de Flora Amenazada y de Hábitats Naturales y Seminaturales, impulsados desde la Dirección General de Conservación de la Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente, constituyen otra importante consecución en este campo, en el que se requiere articular la informatización del vasto repertorio de datos fitosociológicos, sólo en parte publicados, y ampliarla a otros componentes vegetales de la biodiversidad vegetal. Las posibilidades de aplicación de estos datos en estudios sobre los impactos del cambio climático requieren una buena calidad tanto en la georeferenciación, con precisiones de 1 km^2 o inferiores para los nuevos registros, como en la cronoreferenciación (fecha) de las observaciones.

5.11. BIBLIOGRAFÍA

Ahas R. 1999. Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. International Journal of Biometeorology 42: 119-123.

Aizpuru I. *et al.* 2000. Lista Roja de la flora vascular española. Conservación Vegetal 6 (extra): 1-39.

Alcaraz F., Sánchez-Gómez P. y de la Torre A. 1991. Biogeografía de la provincia Murciano-Almeriense hasta el nivel de subsector. Rivasgodaya 6: 77-100.

Allen J.R.M., Huntley B. y Watts W.A. 1996. The vegetation and climate of northwest Iberia over the last 14000 yr. Journal of Quaternary Science 11: 125-147.

Ammann B. 1995. Paleorecords of plant biodiversity in the Alps. En: Chapin III F.S. y Korner C. (Eds.), Arctic and alpine biodiversity: pattern, causes and ecosystem consequences. Springer, Ecological Studies 113, Heidelberg. Pgs. 137-149.

Archer S., Schimel D.S. y Holland E. 1995. Mechanisms of shrubland expansion: land use, climate or CO_2? Climate Change 29: 91-99.

Arista M., Herrera F.J. y Talavera S. 1997. Biología del pinsapo. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla, 162 pgs.

Bakkenes M., Alkemade J.R.M., Ihle F., Leemans R. y Latour J.B. 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. Global Change Biology 8: 390-407.

Bañares Á., Blanca G., Güemes J., Moreno Saiz J.C. y Ortiz S. (Eds.) 2003. Atlas y Libro Rojo de la Flora Vascular Amenazada de España. Taxones prioritarios. Dirección General Conservación Naturaleza, Madrid, 1067 pgs.

Beniston M. (Ed.) 1994. Mountain environments in changing climates. Routledge, London.

Betts R.A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. Nature 408: 187-190.

Billings W.D. y Mooney H.A. 1968. The ecology of arctic and alpine plants. Biological Review Cambridge Philosophical Society 43: 481-529.

Blanca G., Cueto M., Martínez-Lirola M.J. y Molero-Mesa J. 1998. Threatened vascular flora of Sierra Nevada (Southern Spain). Biological Conservation 85: 269-285.

Blanca G., Cabezudo B., Hernández-Bermejo J.E., Herrera C.M., Molero-Mesa J., Muñoz J. y Valdés B. 1999. Libro Rojo de la Flora Silvestre Amenazada de Andalucía. Tomo I: Especies en Peligro de Extinción. Junta de Andalucía, Sevilla.

Blanca G. *et al.* 2002. Flora amenazada y endémica de Sierra Nevada. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Granada.

Blanco E., Casado M.A., Costa Tenorio M., Escribano R., García Antón M., Génova M., Gómez Manzaneque A., Gómez Manzaneque F., Moreno J.C., Morla C. *et al.* 1997. Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica. Ed. Planeta, Barcelona, 572 pgs.

Blasi C. 1996. Un approccio fitoclimatico allo studio dei cambiamenti climatici in Italia. S. It. E. Atti 17: 39-43.

Blondel J. y Aronson J. 1999. Ecology and wildlife of the Mediterranean environments. Cambridge University Press, Cambridge.

Box E.O. 1981. Macroclimate and plant forms: an introduction to predictive modeling in Phytogeography. W. Junk Publ., Tasks for Vegetation Science 1, The Hague, 258 pgs.

Box E.O. 1996. Plant functional types and climate at the global scale. Journal of Vegetation Science 7: 309-320.

Bradley N.L., Leopold A.C., Ross J. y Huffaker W. 1999. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. Proceedings of the National Academy of Science USA 96: 9701-9704.

Bradshaw A.D. y McNeilly T. 1991. Evolutionary response to Global Climatic Change. Annals of Botany 67(Suppl. 1): 5-14.

Brasier C.M. 1992. Oak tree mortality in Iberia. Nature 360: 539.

Brasier C.M. 1996. Phytophthora cinnamomi and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. Annales des Sciences Forestieres 53: 347-358.

Brasier C.M., Robredo F. y Ferraz J.F.P. 1993. Evidence for Phytophthora cinnamomi involvement in Iberia oak decline. Plant Pathology 42: 140-145.

Brasier C.M. y Scott J.K. 1994. European oak declines and global warming: a theoretical assessment with special reference to the activity of Phytophthora cinnamomi. Bull. OEPP 24: 221-232.

Bruns E. y van Vliet A.J.H. 2003. Standardisation and observation of phenological networks in Europe. Wageningen University, Wageningen, 70 pgs.

Bruns E., Chmielewski F.-M. y van Vliet A.J.H. 2003. The Global Phenological Monitoring concept. En: Schwartz M.D. (Ed.). Phenology: an integrative environmental science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Pgs. 93-104.

Burga C.A. 1988. Swiss vegetation history during the last 18000 years. New Phytologist 110: 581-602.

Burjachs F. y Julià R. 1994. Abrupt climatic changes during the Last Glaciation based on pollen analysis of the Abric-Romani, Catalonia, Spain. Quaternary Research 42: 308-315.

Burjachs F., Giralt S., Roca J.R., Seret G. y Julià R. 1997. Palinología holocénica y desertización en el Mediterráneo occidental. En: Ibáñez J.J., Valero B.L. y Machado C. (Eds.). El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación. Geoforma Ed., Logroño. Pgs. 379-394.

Caldwell M.M., Searles P.S., Flint S.D. y Barnes P.W. 1999. Terrestrial ecosystem response to solar UV-B radiation mediated by vegetation, microbes and abiotic photochemistry. En: Press M., Scholes J.D. y Barker M.G. (Eds.). Physiological Plant Ecology. Blackwell Scientific Publication, London. Pgs. 241-262.

Callaway R.M. *et al.* 2002. Positive interactions among alpine plants increase with stress. Nature 417: 844-848.

Candela V. 2000. Reconstrucción dendroclimática de las zonas central y meridional de España. Análisis espacio temporal. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Minas.

Camarero J.J. y Gutiérrez E. 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. Climate Change 63: 181-200.

Carrión J.S. 2002. Patterns and processes of Late Quaternary environmental change in a montane region of southwestern Europe. Quaternary Science Review 21: 2047-2066.

Carrión J.S., Andrade A., Bennett K.D., Navarro C. y Munuera M. 2001a. Crossing forest thresholds: inertia and collapse in a Holocene sequence from south-central Spain. The Holocene 11: 635-653.

Carrión J.S., Munuera M., Dupré M. y Andrade A. 2001b. Abrupt vegetation changes in the Segura mountains of southern Spain throughout the Holocene. Journal of Ecology 89: 783-797.

Carrión J.S., Sánchez-Gómez P., Mota J.F., Yll R. y Chaín C. 2003. Holocene vegetation dynamics, fire and grazing in the Sierra de Gádor, southern Spain. The Holocene 13: 839-849.

Castro I., Moreno J.C., Humphries C.J. y Williams P.H. 1996. Strengthening the Natural and National Park system of Iberia to conserve vascular plants. Botanical Journal of the Linnean Society 121: 189-206.

Castroviejo S. 1995. Flora Ibérica. Política Científica 44: 39-43.

Castroviejo S. 2002. Riqueza florística de la Península Ibérica e islas Baleares. El proyecto "Flora iberica". En: Pineda F.D., de Miguel J.M., Casado M.A. y Montalvo J. (Eds.). La diversidad biológica de España. Pearson Educación, Madrid. Pgs. 167-174.

CBD Secretariat. 2001. Handbook of the Convention on Biological Diversity. Earthscan Publ. Ltd, London.

Ceulemans R. y Mousseau M. 1994. Effects of elevated atmospheric CO_2 on woody plants. New Phytologist 127: 425-446.

Cheddadi R., Lamb H.F., Guiot J. y van der Kaars S. 1998. Holocene climatic change in Morocco: a quantitative reconstruction from pollen data. Climate Dynamics 14: 883-890.

Chen X.Q. y Pan W.F. 2002. Relationships among phenological growing season, time-integrated normalized difference vegetation index and climate forcing in the temperate region of Eastern China. International Journal of Climatolology 22: 1781-1789.

Chmielewski F.M. y Rötzer T. 2002. Annual and spatial variability of the beginning of the growing season in Europe in relation to air temperature changes. Climate Research 19: 257-265.

Cowling R.M., Rundel P.W., Lamont B.B., Arroyo M.K. y Arianoutsou M. 1996. Plant diversity in Mediterranean-climate regions. Trends in Ecology and Evolution 11: 362-366.

Creus Novau J. y Puigdefábregas J. 1976. Climatología histórica y dendrocronología de *Pinus uncinata* Ramond. Cuadernos de Investigación 2: 17-30.

Creus Novau J. y Puigdefábregas J. 1983. Climatología histórica y dendrocronología de *Pinus nigra* Arnold. Avances sobre la Investigación en Bioclimatología, CSIC. Pgs. 121-128.

Creus Novau J., Fernández-Cancio A. y Manrique E. 1997. Dendrocronología y clima del último milenio en España. Aspectos metodológicos y avance de resultados. En: Ibáñez J.J. (ed.). El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación. Ed. Geoforma, Logroño. Pgs. 311-330.

Dana E.D., Sobrino E. y Sanz-Elorza M. 2003. Plantas invasoras en España: un nuevo problema en las estrategias de conservación. En: Bañares Baudet Á., Blanca G., Güemes J., Moreno Saiz J.C. y Ortiz S. (Eds.), Atlas y Libro Rojo de la flora vascular amenazada de España. Taxones prioritarios. Dirección General Conservación Naturaleza, Madrid. Pgs. 1007-1027.

Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C. y Guiot J. 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. Quaternary Science Review 2215-17: 1701-1716.

Davis M.A., Grime J.P. y Thompson K. 2000. Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. Journal of Ecology 88 (3): 528-534.

D'Antonio C.M. y Vitousek P.M. 1992. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. Annual Review of Ecology and Systematics 23: 63-87.

D'Odorico, P., J. Yoo, y S. Jäger. 2002. Changing seasons: an effect of the North Atlantic Oscillation? Journal of Climate 15: 435-445.

Del Arco M.J., Salas M., Acebes J.R., Marrero M.C., Reyes-Betancort J.A. y Pérez de Paz P.L. 2002. Bioclimatology and climatophilous vegetation of Gran Canaria (Canary Islands). Annales Botanici Fennici 39: 15-41.

Del Río S. 2003. El cambio climático y su influencia en Castilla y León. Universidad de León, León. 822 pgs.

Del Río S., Penas A. y Fraile R. 2005. Analysis of recent climatic variations in Castile and Leon (Spain). Atmospheric Research 73: 69-85.

Díaz M. 2002. Elementos y procesos clave para el funcionamiento de los sistemas naturales: las medidas con significado funcional como alternativa a los indicadores clásicos. En: Ramírez L. (Ed.) Indicadores ambientales. Situación actual y perspectivas. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. Pgs. 229-264.

Díaz M., Illera J.C. y Hedo D. 2001. Strategic Environmental Assessment of Plans and Programs: a methodology for biodiversity evaluations. Environmental Management 28: 267-279.

Domínguez Lozano F., Galicia Herbada D., Moreno Rivero L., Moreno Sáiz J.C. y Sainz Ollero H. 1996. Threatened plants in Peninsular and Balearic Spain. A report based on the EU Habitats Directive. Biological Conservation 76: 123-133.

Dukes J.S. y Mooney H.A. 1999. Does global change increases the success of biological invaders? Trends in Ecology and Evolution 14: 135-139.

Emberlin E., Mullins J., Corden J., Millington W., Brooke M., Savage M. y Jones S. 1997. The trend to earlier birch pollen seasons in the UK: A biotic response to changes in weather conditions?. Grana 36:29-33.

Emberlin J., Jäeger S., Dominguez E., Galán C., Hodal L., Mandrioli P., Rantio-Lehtimäki A., Savage M., Spieksma F.Th. y Barlett C. 2000. Temporal and geographical variations in grass pollen seasons in areas of western Europe: an analysis of season dates at sites of the European pollen information system. Aerobiologia 16:373-379.

Erhard M., van Minnen J. y Voigt T. 2002. Proposed set of climate change state and impact indicators in Europe. Copenhagen, European Environment Agency, Technical Report 20.

Eriksson O. 1996. Regional dynamics of plants: a review of evidence for remnant, source-sink and metapopulations. Oikos 772: 248-258.

Escudero A., Barrero S. y Pita J.M. 1997. Effects of high temperatures and ash on seed germination of two Iberian pines (*Pinus nigra* ssp *salzmannii, P. sylvestris* var. *iberica*). Annales des Sciences Forestieres 54: 553-562.

Escudero A., Sanz M.V., Pita J.M. y Pérez-García F. 1999. Probability of germination after heat treatment of native Spanish pines. Annals of Forest Science 56: 511-520.

Faraco A.M., Fernández-González F. y Moreno J.M. 1993. Post-fire vegetation dynamics of pine woodlands and shrublands in the Sierra de Gredos, Spain. En: Trabaud L. y Prodon R. (Eds.), Fire in Mediterranean Ecosystems. Commission of the European Communities, EUR 15089 EN, Ecosystems Research Report 5. Pgs. 101-112.

Fernández Cancio A. y Manrique E. 1997. Nueva metodología para la reconstrucción dendroclimática y aplicaciones más importantes. Madrid. 130 pgs.

Fernández-González F. 1997. Bioclimatología. En: Izco J. *et al.* (Ed.), Botánica. McGraw-Hill Interamericana, Madrid. Pgs. 607-682.

Fernández-González F. 1999. La flora y la vegetación del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular (Madrid): implicaciones en la conservación de la biodiversidad. En: Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (Ed.), Primeros Encuentros Científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular. Madrid. Pgs. 181-198.

Fernández-González F. 2002. Indicadores de biodiversidad: el estado actual de la investigación. En: Ramírez L. (Ed.) Indicadores ambientales. Situación actual y perspectivas. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. Pgs. 265-294.

Figueroa M.E. y Davy A.J. 1991. Response of Mediterranean grassland species to changing rainfall. Journal of Ecology 79: 625-641.

Frankham R. 1997. Do island populations have less genetic variation than mainland populations? Heredity 78: 311-327.

Galán C., García-Mozo H., Cariñanos P., Alcázar P. y Domínguez E. 2001. The role of temperature in the onset of the *Olea europaea* L. pollen season in Southwestern Spain. International Journal of Biometeorology 45: 8-12.

Galán C., García-Mozo H., Vázquez L., Ruiz L., Díaz de la Guardia C. y Trigo M.M. 2005. Heat requirement for the onset of the *Olea europaea* L. pollen season in several sites in Andalusia and the effect of the expected future climate change. International Journal of Biometeorology 49: 184-188.

García-Fayos P., Recatalá T.M., Cerdá A. y Calvo A. 1995. Seed population dynamics on badland slopes in southeastern Spain. Journal of Vegetation Science 6: 691-696.

García-Mozo H., Galán C., Aira M..J., Belmonte J., Díaz De La Guardia C., Fernández D. Gutiérrez A.M., Rodriguez F., Trigo M.M. y Dominguez-Vilches E. 2002a. Modelling start of oak pollen season in different climatic zones in Spain. Agricultural and Forest Meteorology 110: 247-257.

García-Mozo H., Galán C. y Domínguez-Vilches E. 2002b. The impact of future climate change in the start of Quercus flowering in the Iberian Peninsula. En: B. Zapata (Ed.). Quaternary Climatic Changes and Environmental crises in the Mediterranean Region. Universidad de Alcalá de Henares. Pgs. 279-285.

Gavilán R. 1994. Estudio de las relaciones entre la vegetación y el clima en el Sistema Central español. Tesis Doctoral ined., Facultad de Farmacia, Universidad Complutense, Madrid, 332 pgs.

Gavilán R.G. 2003. Does global warming pose a true threat to Mediterranean biodiversity? Bocconea 161: 379-395.

Gavilán R. y Fernández-González F. 1997. Climatic discrimination of Mediterranean broad-leaved sclerophyllous and deciduous forests in central Spain. Journal of Vegetation Science 8: 377-386.

Gavilán R., Fernández-González F. y Blasi C. 1998. Climatic classification and ordination of the Spanish Sistema Central: relationships with potential vegetation. Plant Ecology 139: 1-11.

Gehrke C., Johanson U., Callaghan T.V., Chadwick D. y Robinson C.H. 1995. The impact of enhanced ultraviolet-B radiation on litter quality and decomposition processes in Vaccinium leaves from the Subarctic. Oikos 72: 213-222.

Gitay H., Suárez A., Watson R.T. y Dokken D.J. (Eds.) 2002. Climate Change and Biodiversity. WMO - UNEP, IPCC Technical Paper, 73 pgs.

Goldberg D.E., Rajaniemi T., Gurevitch J. y Stewart-Oaten A. 1999. Empirical approaches to quantifying interactions intensity: competition and facilitation along productivity gradients. Ecology 80: 1118-1131.

Gómez-Campo C., Bermúdez de Castro L., Cagiga M.J. y Sánchez-Yélamo M.D. 1984. Endemism in the Iberian peninsula and Balearic Islands. Webbia 38: 709-714.

Gómez-Campo C. (Ed.) 1985. Plant Conservation in the Mediterranean Area. W. Junk Publ., Den Haag.

Gómez-Campo C. *et al*. 1987. Libro Rojo de especies vegetales amenazadas de España peninsular e Islas Baleares. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Serie Técnica, Madrid.

Gómez-Campo C. *et al*. 1996. Libro Rojo de especies vegetales amenazadas de las Islas Canarias. Gobierno de Canarias - ICONA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid.

Gómez Campo C. 2002. Especies vegetales amenazadas. En: Pineda F.D., de Miguel J.M., Casado M.A. y Montalvo J. (Eds.). La diversidad biológica de España. Pearson Educación, Madrid. Pgs. 319-330.

Gómez-Limón D. 2000. Los espacios naturales protegidos del Estado Español en el umbral del siglo XXI. Fundación Fernando González Bernáldez, Madrid, 94 pgs.

Gottfried M., Pauli H., Reiter K. y Grabherr G. 2000. A fine-scale predictive model for climate warming-induced changes of high mountain plant species distribution patterns. Diversity and Distribution 8: 10-21.

Grabherr G., Gottfried M. y Pauli H. 1994. Climate effects on mountain plants. Nature 369: 448.

Grabherr G., Gottfried M., Gruber A. y Pauli H. 1995. Patterns and current changes in alpine plant diversity. En: Chapin III F.S. y Korner C. (Eds.), Arctic and alpine biodiversity: pattern, causes and ecosystem consequences. Springer, Ecological Studies 113, Heidelberg. Pgs. 167-181.

Graham R.W. y Grimm E.C. 1990. Effects of global climate change on the patterns of terrestrial biological communities. Trends in Ecology and Evolution 5: 289-292.

Greuter W. 1991. Botanical diversity, endemism, rarity, and extinction in the Mediterranean area: an analysis based on the published volumes of Med-Checklist. Bot. Chronika 10: 63-79.

Greuter W. 1994. Extinctions in Mediterranean areas. Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series B 344: 41-46.

Grime J.P. 2001. Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties. John Wiley y Sons, Chichester.

Hampe A. 2004. Cómo ser un relicto en el Mediterráneo: ecología de la reproducción y la regeneración de *Frangula alnus* subsp. *baetica*. Tesis doctoral, Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla.

Harrington R., Woiwod I. y Sparks T. 1999. Climate change and trophic interactions. Trends in Ecology and Evolution 14: 146-150.

Haxeltine A., Prentice I.C. y Creswell I.D. 1996. A coupled carbon and water flux model to predict vegetation structure. Journal of Vegetation Science 7: 651-666.

Herrera C.M. 1992. Historical effects and sorting processes as explanations for contemporary ecological patterns: character syndromes in Mediterranean woody plants. American Naturalist 140: 421-446.

Herrera C.M. 1995. Plant-vertebrate seed dispersal systems in the Mediterranean: ecological, evolutionary and historical determinants. Annual Review of Ecology and Systematics 26: 705-727.

Herrera C.M. 1998. Long-term dynamics of Mediterranean frugivorous birds and fleshy fruits: a 12-yr study. Ecological Monographs 68: 511-538.

Herrera C.M. 2001. Dispersión de semillas por animales en el Mediterráneo: ecología y evolución. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (Eds.), Ecosistemas mediterráneos. Análisis

funcional. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada. Pgs. 125-152.
Heywood V.H. 1995. The Mediterranean flora in the context of world biodiversity. Ecologia Mediterranea (Marseille) 21: 11-18.
Heywood V.H. y Baste I. 1995. Introduction. En: Heywood V.H. (Ed.) Global Biodiversity Assessment. Cambridge Univ. Press, Cambridge. Pgs. 1-20.
Hódar J.A., Castro J. y Zamora R. 2003. Pine processionary caterpillar Thaumetopoea pityocampa as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climate warming. Biological Conservation 110: 123-129.
Holt R.D. 1990. The microevolutionary consequences of climate change. Trends in Ecology and Evolution 5: 311-315.
Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P. y Xiaosu, D. 2001. Climate Change 2001: The scientific basis. Third Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
Hughes L. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? Trends in Ecology and Evolution 15: 56-61.
Hulme M., Barrow E.M., Arnell N.W., Harrison P.A., Johns T.C. y Downing T.E. 1999. Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. Nature 397: 688-691.
Humphries C.J. 1979. Endemism and Evolution in Macaronesia. En: Bramwell D. (Ed.) Plants and Islands. Academic Press, London. Pgs. 171-199.
Huntley B. y Birks H.J.B. 1983. An atlas of past and present pollen maps of Europe: 0-13000 years ago. Cambridge University Press, Cambridge.
Huntley B. 1991. How plants respond to climate change: migration rates, individualism and the consequences for plant communities. Annals of Botany 67 (suppl. 1): 15-22.
Izquierdo I., Martín Esquivel J.L., Zurita N. y Arechavaleta M. (Eds.) 2001. Lista de especies silvestres de Canarias. Hongos, plantas y animales terrestres. Direccion General de Política Ambiental, Consejeria de Politica Territorial y Medio Ambiente, La Laguna.
Jalut G., Esteban A., Riera S., Fontugne M., Mook R., Bonnet L. y Gauquelin T. 1997. Holocene climatic changes in the western Mediterranean: installation of the Mediterranean climate. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Ser. II, Fasc. A - Sci. Terre Planetes 325: 327-334.
Jalut G., Esteban A., Bonnet L., Gauquelin T. y Fontugne M. 2000. Holocene climatic changes in the western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 160: 255-290.
Keeling C.D., Chin J.F.S. y Whorf T.P. 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from athmospheric CO_2 measurements. Nature 382: 146-149.
Körner C. 1994. Impact of atmospheric changes on high mountain vegetation. En: Beniston M. (Ed.) Mountain environments in changing climates. Routledge, London. Pgs. 155-166.
Körner C. 1995a. Alpine plant diversity: a global survey and functional interpretations. En: Chapin III F.S. y Korner C. (Eds.), Arctic and alpine biodiversity: pattern, causes and ecosystem consequences: Springer, Ecological Studies 113, Heidelberg. Pgs. 45-62.
Körner C. 1995b. Impact of atmospheric changes on alpine vegetation: the ecophysiological perspective. En: Guisan A., Holten J.I., Spichiger R. y Tessier L. (Eds.), Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains. Conserv. Jard. Bot. Genève, Genève. Pgs. 113-120.
Körner C. 2000. Biosphere responses to CO_2 enrichment. Ecological Applications 10: 1590-1619.
Kramer K. 1995. Phenotypic plasticity of the phenology of seven European tree species in relation to climatic warming. Plant, Cell and Environment 18: 93-104.
Kullman L. 2001. Twentieth century climate warming and tree-limit rise in the Southern Scandes of Sweden. Ambio 30: 72-80.
Larcher W. 1995. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups. Springer, Berlin. 506 pgs.

Laguna E. 1999. The Plant Micro-Reserves Programme in the Region of Valencia, Spain. En: Synge H. y Akeroyd J. (Eds.), Planta Europa, Proceedings of the Second Conference on the Conservation of Wild Plants, 9-14 June, Uppsala. Plantlife-Swedish University of Agricultural Sciences, Newcastle. Pgs. 181-186.

Lavorel S. 1999. Ecological diversity and resilience of Mediterranean vegetation to disturbance. Diversity and Distribution 5: 3-13.

Lavorel S., Canadell J., Rambal S. y Terradas J. 1998. Mediterranean terrestrial ecosystems: research priorities on global change effects. Global Ecology and Biogeography Letters 7: 157-166.

Lieth H. 1997. Aims and methods in phenological monitoring. En: Lieth H. y Schwartz M.D. (eds.). Phenology in seasonal climates I. Backhuys Publishers, Leiden.

Lobo A., Ibáñez J.J. y Carrera C. 1997. Regional scale hierarchical classification of temporal series of AVHRR vegetation index. International Journal of Remote Sensing 18: 3167-3193.

Lobo J.M., Castro I. y Moreno Saiz J.C. 2001. Spatial and environmental determinants of vascular plant species richness distribution in the Iberian Peninsula and Balearic Islands. Biological Journal of the Linnean Society 73: 233-253.

Loidi J. 1999. General description of the Iberian Peninsula: substrate and relief. Itinera Geobotánica 13: 17-40.

Lövei G.L. 1997. Global change through invasion. Nature 388: 627-628.

Machado A. 2002 La biodiversidad de las islas Canarias. En: Pineda F.D., de Miguel J.M., Casado M.A. y Montalvo J. (Eds.), La diversidad biológica de España. Pearson Educación, Madrid. Pgs. 89-99.

Mack M.C. y D'Antonio C.M. 1999. Impacts of biological invasions on disturbance regimes. Trends in Ecology and Evolution 13: 195-198.

Manrique E. y Fernández-Cancio A. 1999. Evolución fitoclimática de los últimos siglos en España a partir de reconstrucciones dendroclimáticas. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales (Fuera de Serie 1): 75-91.

Manrique E. y Fernández-Cancio A. 2000. Extreme climatic events in dendroclimatic reconstructions from Spain. Climatic Change 44: 123-138.

Marrero M.V., Carqué E., Bañares Á., Oostermeijer J.G.B., Acosta F. y Hernández J.C. 2003. La extinción de *Helianthemum juliae* Wildpret (Cistaceae), una especie amenazada de las Islas Canarias. Parque Nacional del Teide.

Martínez-Vilalta J. y Piñol J. 2002. Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. Forest Ecology and Management 161: 247-256.

Martínez-Vilalta J., Piñol J. y Beven K. 2002a. A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. Ecological Modelling 155: 127-147.

Martínez-Vilalta J., Prat E., Oliveras I. y Piñol J. 2002b. Xylem hydraulic properties of roots and stems of nine Mediterranean woody species. Oecologia 133: 19-29.

McCarty J.P. 2001. Ecological consequences of recent climate change. Conservation Biology 15: 320-331.

McNeely J.A., M.Gadgil, Levèque C., Padoch C. y Redford K. 1995. Human influences on biodiversity. En: Heywood V.H. (Ed.) Global Biodiversity Assessment. Cambridge Univ. Press, Cambridge. Pgs. 711-822.

Médail F. y Quézel P. 1997. Hot-spots analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean basin. Annals of the Missouri Botanical Garden 84: 112-127.

Médail F. y Quézel P. 1999. Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: setting global conservation priorities. Conservation Biology 13: 1510-1513.

Melendo M., Giménez E., Cano E., Gómez-Mercado F. y Valle F. 2003. The endemic flora in the south of the Iberian Peninsula: taxonomic composition, biological spectrum, pollination, reproductive mode and dispersal. Flora 198: 260-276.

Menzel A. y Estrella N. 2001. Plant phenological changes. En: Walther G.R., Burga C.A. y Edwards P.J. (Eds.), Fingerprints of climate change. Adapted behaviour and shifting species range. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. Pgs. 123-137.

Menzel A. 2002. Phenology. Its importance to the Global Change community. Climatic Change 54: 379-385.

Menzel A. y Fabian P. 1999. Growing season extended in Europe. Nature 397: 659.

Menzel A., Jakobi G., Ahas R. y Scheifinger H. 2002. Variations of the climatological growing season 1951-2000 in Germany compared with other countries. International Journal of Climatology 22: 793-812.

Merino O., Villar R., Martín A., García D. y Merino J. 1995. Vegetation responses to climatic change in a dune ecosystem in southern Spain. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (Eds.), Global change and Mediterranean-Type ecosystems. Ecological Studies 117. Pgs. 225-238.

Meshinev T., Apostolova I. y Koleva E. 2000. Influence of warming on timberline rising: a case study on Pinus peuce Griseb. in Bulgaria. Phytocoenologia 30(3-4): 431-438.

MIMAM (Ministerio de Medio Ambiente) 1999. Estrategia española para la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica. Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría General del Medio Ambiente, Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid, 160 pgs.

Mittermeier R.A., Myers N., Gil P.R. y Goettsch C. 1999. Hotspots. Earth`s biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Cemex SA y Agrupacion Sierra Madre, SC. 431 pgs.

Montoya J.M. y Mesón M.L. 1994. Los factores catalizadores de "la seca de *Quercus*". Ecología 8: 185-191.

Montoya R. y López Arias J. 1997. La red europea de seguimiento de daños en los bosques (Nivel 1). España, 1987-1996. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Montserrat P. y Villar L. 1973. El endemismo ibérico. Aspectos ecológicos y fitotopográficos. Bol. Soc. Brot. (ser. 2) 46: 503-527.

Moore P.D. 1990. Vegetation's place in history. Nature 347: 710.

Moreno J.M. y Fellous J.L. (Eds.) 1997. Global change and the Mediterranean Region. Report of the ENRICH/START International Workshop held in Toledo, Spain, 25-28 September, 1996. Comité IGBP España, Madrid, 78 pgs.

Moreno J.M. y Oechel W.C. (Eds.) 1992. Anticipated effects of a changing global environment on Mediterranean-Type ecosystems. UIMP y CEAM, Valencia. 26 pgs.

Moreno J.M. (Ed.) 1994. Global change and landscape dynamics in Mediterranean Systems. Report of the GCTE/IGBP-Spain Workshop held in Toledo (Spain), November 15-18, 1993. Comité IGBP España, Aranjuez (Madrid), 47 pgs.

Moreno J.M., Pineda F.D. y Rivas-Martinez S. 1990. Climate and vegetation at the Eurosiberian-Mediterranean boundary in the Iberian Peninsula. Journal of Vegetation Science 1: 233-244.

Moreno J.M., Vázquez A. y Vélez R. 1998. Recent history of forest fires in Spain. En: Moreno J.M. (Ed.) Large Forest Fires. Backhuys Publishers, Leiden. Pgs. 159-185.

Moreno J.M., Fernández González F., Cruz A., Quintana J.R., Zuazua E., Luna B. y Pérez Badia R. 1999. Efecto de la estacionalidad y de la climatología anual sobre el comportamiento del fuego y la dinámica postincendio del matorral mediterráneo sometido a quemas controladas. Programa de Investigación y Desarrollo en Relación con la Restauración de la Cubierta Vegetal. Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, Castellón. Pgs. 214-229.

Moreno Saiz, J.C., Martínez Torres, R. y Tapia, F. 2003. Análisis del estado de conservación de la flora española. En: Bañares Baudet Á., Blanca G., Güemes J., Moreno Saiz J.C. y Ortiz S. (eds.). Atlas y Libro Rojo de la flora vascular amenazada de España. Taxones prioritarios. Direcc. General Conserv. Nat., Madrid. Pgs. 963-971.

Moreno Saiz J.C., Domínguez Lozano F. y Sainz Ollero H. 2003. Recent progress in conservation of threatened Spanish vascular flora: a critical review. Biological Conservation 113: 419-431.

Moreno Saiz J.C. y Sainz Ollero H. 1992. Atlas corológico de las monocotiledóneas endémicas de la Península Ibérica e islas Baleares. Bases para una política de conservación.

Colección Técnica. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 354 pgs.
Moreno Saiz J.C. y Sainz Ollero H. 1993. El endemismo vegetal ibérico-balear. Vida Silvestre 73: 35-41.
Morillo C. y Gómez-Campo C. 2000. Conservation in Spain: 1980-2000. Biological Conservation 95: 165-174.
Mucina L. 1997. Conspectus of classes of European vegetation. Folia Geobotánica Phytotax. 32: 117-172.
Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., Da Fonseca G.A.B. y Kent J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 403: 853-858.
Myneni R.B., Keeling C.D., Tucker C.J., Asrar G. y Nemani R.R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature 386: 698-702.
Noss R.F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. Conservation Biology 4: 355-364.
Nualart N. 2003. Modelització de la distribució potencial a Catalunya de 24 espècies vegetals vasculars. Universidad de Barcelona, Barcelona, 72 pgs.
Ogaya R., Peñuelas J., Martínez-Vilalta J. y Mangirón M. 2003. Effect of drought on diameter increment of Quercus ilex, Phillyrea latifolia, and Arbutus unedo in a holm oak forest of NE Spain. Forest Ecology and Management 180: 175-184.
Orella J.C. 1999. Desarrollo de la Directiva Habitats 92/43 CEE. En: Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (Ed.), Primeros Encuentros Científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular. Madrid. Pgs. 85-90.
Osborne C.P., Chuine I., Viner D. y Woodward F.I. 2000. Olive phenology as a sensitive indicator of future climatic warming in the Mediterranean. Plant, Cell and Environment 23: 701-710.
Parker I.M., Simberloff D., Lonsdale W.M., Wonham M., Goodell K., Kareiva P.M., Williamson M.H., Von Holle B., Moyle P.B., Byers J.E. *et al.* 1999. Impact: toward a framework for understanding the ecological effects of invaders. Biological Invasions 1: 3-19.
Parmesan C. y Yohe G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature 421: 37-42.
Parry M. 1992. The potential effect of climate change on agriculture and land use. Advances in Ecological Research 22: 63-91.
Parry M.L. (Ed.) 2000a. Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: summary and conclusions. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 24 pgs.
Parry M.L. (Ed.) 2000b. Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: The Europe ACACIA project. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 pgs.
Pauli H., Gottfried M. y Grabherr G. 2001. High summits of the Alps in a changing climate. The oldest observation series on high mountain plant diversity in Europe. En: Walther G.R., Burga C.A. y Edwards P.J. (Eds.), Fingerprints of climate change. Adapted behaviour and shifting species range. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. Pgs. 139-149.
Pauli H., Gottfried M., Hohenwallner D., Reiter K., Cassale R. y Grabherr G. 2004. The Gloria Field Manual - Multi-Summit Approach. European Commission EUR 21213, Luxembourg, 89 pgs.
Pausas J.G., Carreras J., Ferré A. y Font X. 2003. Coarse-scale plant species richness in relation to environmental heterogeneity. Journal of Vegetation Science 14: 661-668.
Peco B., Espigares T. y Levassor C. 1998. Trends and fluctuations in species abundances and richness in Mediterranean annual pastures. Applied Vegetation Science 1: 21-28.
Peñalba M.C. 1994. The history of the Holocene vegetation in northern Spain from pollen analysis. Journal of Ecology 82: 815-832.
Peñuelas J. y Azcón-Bieto J. 1992. Changes in $\delta^{13}C$ of herbarium plant species during the last 3 centuries of CO_2 increase. Plant, Cell and Environment 15: 485-489.
Peñuelas J., Llusiá J. y Estiarte M. 1995. Terpenoids: a language of plants. Trends in Ecology and Evolution 10: 289.

Peñuelas J. y Matamala R. 1990. Changes in N and S leaf content, stomatal density and specific leaf area of 14 plant species during the last three centuries of CO_2 increase. Journal of Experimental Botany 230: 1119-1124.

Peñuelas J. 1996. Overview on current and past global changes in the Mediterranean ecosystems. Orsis 11: 165-175.

Peñuelas J., Lloret F. y Montoya R. 2001. Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain. Forest Science 47: 214-218.

Peñuelas J., Filella I., Lloret F., Piñol J. y Siscart D. 2000. Effects of a severe drought on water and nitrogen use by Quercus ilex and Phillyrea latifolia. Biologia Plantarum 43: 47-53.

Peñuelas J. 2001. Cambios atmosféricos y climáticos y sus consecuencias sobre el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas terrestres mediterráneos. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (Eds.), Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Granada. Pgs. 423-455.

Peñuelas J. y Filella I. 2001. Phenology: responses to a warming world. Science 294: 793-795.

Peñuelas J., Filella I. y Comas P. 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. Global Change Biology 9: 531-544.

Peñuelas J. y Boada M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). Global Change Biol. 9: 131-140.

Pérez B., Cruz A., Fernández-González F. y Moreno J.M. 2003. Effects of the recent land-use history on the post-fire vegetation of uplands in Central Spain. Forest Ecology and Management 182: 273-283.

Pérez-Obiol R. y Julià R. 1994. Climatic change on the Iberian Peninsula recorded in a 30000-yr pollen record from lake Banyoles. Quaternary Research 41: 91-98.

Pickett S.T.A. y White P.S. (Eds.) 1985. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Academic Press, Orlando.

Pita J.M. y Gómez-Campo C. 1990. La flora endémica ibérica en cifras. En: Hernández Bermejo J.E., Clemente M. y Heywood V. (Eds.), Conservation techniques in Botanic Gardens. Koeltz Sci. Books, Koenigstein. Pgs. 175-177.

Pitelka L.F. y The Plant Migration Workshop Group 1997. Plant migration and climate change. American Scientist 85: 464-473.

Pons A. y Quézel P. 1985. The history of the flora and vegetation and past and present human disturbance in the Mediterranean region. En: Gómez-Campo C. (Ed.) Plant conservation in the Mediterranean area. Dr W. Junk Publ., Dordrecht. Pgs. 25-43.

Pons A. y Reille M. 1988. The Holocene-Pleistocene and Upper-Pleistocene pollen record from Padul (Granada, Spain) - a new study. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 66: 243-263.

Post E. y Stenseth N.C. 1999. Climatic variability, plant phenology, and northern ungulates. Ecology 80: 1322-1339.

Prentice I.C., Guiot J. y Harrison S.P. 1992. Mediterranean vegetation, lake levels and palaeoclimate at the Last Glacial Maximum. Nature 360: 658-660.

Prentice I.C., Cramer W., Harrison S.P., Leemans R., Monserud R.A. y Solomon A.M. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. Journal of Biogeography 19: 117-134.

Pugnaire F.I., Armas C. y Tirado R. 2001. Balance de las interacciones entre plantas en ambientes mediterráneos. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (Eds.), Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada. Pgs. 213-235.

Pulido F.J., Díaz M. y Hidalgo S.J. 2001. Size-structure and regeneration of Spanish holm oak *Quercus ilex* forests and dehesas: effects of agroforestry use on their long-term sustainability. Forest Ecology and Management 146: 1-13.

Purvis A. y Hector A. 2000. Getting the measure of biodiversity. Nature 405: 212-219.

Quintana J.R., Cruz A., Fernández-González F. y Moreno J.M. 2004. Time of germination and establishment success after fire of three obligate seeders in a Mediterranean shrubland of central Spain. Journal of Biogeography 31: 241-249.

Rambal S. y Debussche G. 1995. Water balance of Mediterranean ecosystems under a changing climate. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (Eds.). Global change and Mediterranean-type ecosystems. Springer Verlag, New York.

Reichstein M., Tenhunen J.D., Roupsard O., Ourcival J.M., Rambal S., Miglietta F., Peressotti A., Pecchiari M., Tirone G. y Valentini R. 2002. Severe drought effects on ecosystem CO_2 and H_2O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? Global Change Biology 8: 999-1017.

Reille M. y Pons A. 1992. The ecological significance of sclerophyllous oak forests in the western part of the Mediterranean basin: a note on pollen analytical data. Vegetatio 99-100: 13-17.

Rey Benayas J.M. y Scheiner S.M. 2002. Plant diversity, biogeography and environment in Iberia: patterns and possible causal factors. Journal of Vegetation Science 13: 245-258.

Reyero J.M. 2002. La naturaleza de España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Reyes-Betancort J.A., Wildpret W. y León-Arancibia M.C. 2001. The vegetation of Lanzarote (Canary Islands). Phytocoenologia 312: 185-247.

Riera S. y Esteban A. 1997. Relations homme-milieu végétal pendant les cinq derniers millénaires dans la plaine littorale du Penedès (nord-est de la Péninsule Ibérique). Vie Milieu 471: 53-68.

Rivas-Martínez S. 1987. Mapa de series de vegetación de España 1:400000. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), Ser. Técnica, Madrid. 268 pgs.

Rivas-Martínez S. 1997. Syntaxonomical synopsis of the potential natural plant communities of North America, I. Itinera Geobotánica 10: 5-148.

Rivas-Martínez S., Wildpret W., del Arco M., Rodríguez O., Pérez de Paz P.L., García-Gallo A., Acebes J.R., Díaz T.E. y Fernández-González F. 1993. Las comunidades vegetales de la Isla de Tenerife (Islas Canarias). Itinera Geobotánica 7: 169-374.

Rivas-Martínez S. y Loidi J. 1999a. Bioclimatology of the Iberian Peninsula. Itinera Geobotánica 13: 41-48.

Rivas-Martínez S. y Loidi J. 1999b. Biogeography of the Iberian Peninsula. Itinera Geobotánica 13: 49-68.

Rivas-Martínez S., Fernández-González F., Loidi J., Lousa M. y Penas A. 2001. Syntaxonomical Checklist of vascular plant communities of Spain and Portugal to association level. Itinera Geobotánica 14: 5-341.

Rivas-Martínez S., Díaz T.E., Fernández-González F., Izco J., Loidi J., Lousa M. y Penas A. 2002. Vascular plant communities of Spain and Portugal. Addenda to the Syntaxonomical Checklist of 2001. Itinera Geobotánica 151-2: 5-922.

Rodó X. y Comín F. 2001. Fluctuaciones del clima mediterráneo: conexiones globales y consecuencias regionales. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (Eds.), Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada. Pgs. 1-35.

Rodrigo A., Retana J. y Picó F.X. 2004. Direct regeneration is not the only response of Mediterranean forests to large fires. Ecology 85: 716-729.

Rodríguez-Delgado O., García-Gallo A. y Marrero M.V. 2004. El bioclima y la biogeografia. En: Rodríguez-Delgado O. (Ed.) Patrimonio natural de Fuerteventura (Islas Canarias). Cabildo Insular de Fuerteventura - Centro de la Cultura Popular Canaria. Pgs. 75-88.

Rogers C.A., Wayne P., Muilenberg M.L., Wagner C., Bazzaz F. y Epstein P. 2004. Spring germination date and CO_2 concentration influences pollen production in ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L). Polen 14: 91-92.

Romao C. 1996. Interpretation Manual of European Union Habitats (version EUR 15). European Commission - DG XI, Brussels, 103 pgs.

Sáez Ll. y Roselló J.A. 2001. Llibre Vermell de la Flora Vascular de les Illes Balears. Govern de les Illes Balears, Palma de Mallorca.

Sainz Ollero H. y Hernández Bermejo E. 1985 Sectorización fitogeográfica de la península Ibérica e islas Baleares: la contribución de su endemoflora como criterio de semejanza. Candollea 40: 485-508.

Sainz Ollero H. y Moreno Saiz J.C. 2002. Flora vascular endémica española. En: Pineda F.D., de Miguel J.M., Casado M.A. y Montalvo J. (Eds.). La diversidad biológica de España. Pearson Educación, Madrid. Pgs. 175-195.

Sala O.E. *et al.* 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science 287: 1770-1774.

Santos A. 2001. Flora vascular nativa. En: Fernández-Palacios J.M. y Martín Esquivel J.L. (Coords.), Naturaleza de las Islas Canarias. Ecología y Conservación. Turquesa, Santa Cruz de Tenerife. Pgs. 185-192.

Sanz-Elorza M., Dana E.D., González A. y Sobrino E. 2003. Changes in the high-mountain vegetation of the Central Iberian Peninsula as a probable sign of global warming. Annals of Botany 92: 273-280.

Schwartz M.D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. International Journal of Biometeorology. 42: 113-118.

Schwartz M.D. (Ed.) 2003. Phenology, an integrative environmental science. Kluwer Academic Publisher, Boston-Dordrecht-London, 564 pgs.

Sobrino E., González A., Sanz-Elorza M., Dana E., Sánchez-Mata D. y Gavilán R. 2001. The expansion of thermophilic plants in the Iberian peninsula as a sign of climatic change. EIn: Walther G.R., Burga C.A. y Edwards P.J. (Eds.), Fingerprints of climate change. Adapted behaviour and shifting species range. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. Pgs. 163-184.

Stanners D. y Bourdeau P. (Eds.) 1998. Medio Ambiente en Europa - El Informe Dobrís. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 678 pgs.

Strain R.R. y Thomas R.B. 1995. Anticipated effects of elevated CO_2 and climate change on plants from Mediterranean-type ecosystems utilizing results of studies in other ecosystems. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (Eds.), Anticipated effects of a changing global environment on Mediterranean-type ecosystems. Springer, Ecological Studies 117. Pgs. 121-139.

Suc J.P. 1984. Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. Nature 307: 409-432.

Tellería J.L. y Santos T. 2001. Fragmentación de hábitats forestales y sus consecuencias. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (Eds.), Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada. Pgs. 293-317.

Theurillat J.-P. 1995. Climate change and the alpine flora: some perspectives. En: Guisan A., Holten J.I., Spichiger R. y Tessier L. (Eds.), Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains. Conserv. Jard. Bot. Genève, Genève. Pgs. 121-127.

Thomas C.D. *et al.* 2004. Extinction risk from climate change. Nature 427: 145-148.

Tilman D. 1988. Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities. Princeton University Press, New Jersey.

Trabaud L. y Campant C. 1991. Difficulté de recolonisation naturelle du pin de Salzmann *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco aprés incendie. Biological Conservation 58: 329-343.

Valladares F. 2001. Características mediterráneas de la conversión fotosintética de la luz en biomasa: de órgano a organismo. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (Eds.), Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada. Pgs. 67-93.

Vallejo R., Cortina J., Vilagrosa A., Seva J.P. et alloza J.A. 2003. Problemas y perspectivas de la utilización de leñosas autóctonas en la restauración forestal. En: Rey Benayas J.M., Espigares T. y Nicolau J.M. (Eds.), Restauración de Ecosistemas Mediterráneos. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares. Pgs. 11-42.

van Hark C.M., Aptroot A. y van Dobben H.F. 2002. Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. Lichenologist 34: 141-154.

Vázquez A., Pérez B., Fernández-González F. y Moreno J.M. 2002. Recent fire regime characteristics and potential natural vegetation relationships in Spain. Journal of Vegetation Science 13: 663-676.

Vilà M., Garcia-Berthou E., Sol D. y Pino J. 2002. Survey of the exotic plants and vertebrates in peninsular Spain. Biodiversity and Conservation.

Vilagrosa A., Bellot J., Vallejo V.R. y Gil-Pelegrín E. 2003. Cavitation, stomatal conductance, and leaf dieback in seedlings of two co-occurring Mediterranean shrubs during an intense drought. Journal of Experimental Botany 54: 2015-2024.

Visser M.E. y Holleman L.J.M. 2001. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. Proceedings of the Royal Society, London B 268: 289-294.

Visser M.E., van Noordwijk A.J., Tinbergen J.M. y Lessels C.M. 1998. Warmer springs lead to mistimed reproduction in great tits (*Parus major*). Proceedings of the Royal Society, London B 265: 1867-1870.

Vitousek P.M. 1990. Biological invasions and ecosystem processes: towards an integration of population biology and ecosystem studies. Oikos 57: 1-13.

Vitousek P.M. 1994. Beyond global warming: ecology and global change. Ecology 75: 1861-1876.

Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenko J. y Melillo J.M. 1997. Human domination of earth's ecosystems. Science 277: 494-504.

Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.M., Hoegh-Guldberg O. y Bairlein F. 2002. Ecological responses to recent climate change. Nature 416: 389-395.

Wardle P. y Coleman M.C. 1992. Evidence for rising upper limits of four native New Zealand forest trees. New Zealand Journal of Botany 30: 303-314.

White M.A., Running S.W. y Thornton P.E. 1999. The impact of growing season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. International Journal of Biometeorology. 42: 139-145.

WHO 2003. Climate Change and Human Health. Risks and Responses. WHO Library Cataloguing in Publication Data. France.

Woodward F.I. 1987. Climate and plant distribution. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 174 pgs.

Woodward F.I. y Williams B.G. 1987. Climate and plant distribution at global and local scales. Vegetatio 69: 189-197.

Woodward F.I., Thompson G.B. y McKee I.F. 1991. The effects of elevated concentrations of carbon dioxide on individual plants, populations, communities and ecosystems. Annals of Botany 67 (suppl. 1): 23-38.

Woodward F.I. (Ed.) 1992. The ecological consequences of global climate change. Academic Press, Advances in Ecological Research 22, London.

Wuethrich B. 2000. How climate change alters rhythms of the wild. Science 287: 793-795.

Zamora R. 2000. Functional equivalence in plant-animal interactions: ecological and evolutionary consequences. Oikos 88: 442-447.

Zamora R., Gómez J.M. y Hódar J.A. 2001. Las interacciones entre plantas y animales en el Mediterráneo: importancia del contexto ecológico y el nivel de organización. En: Zamora R. y Pugnaire F.I. (Eds.), Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional. Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Asociación Española de Ecología Terrestre, Granada. Pgs. 237-268.

Zavala M.A. 1999. A model of stand dynamics for holm oak-Aleppo pine forests. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (Eds.), Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer Verlag, Berlin. Pgs. 105-117.

Zavala M.A. 2003. Dinámica y sucesión en bosques mediterráneos: modelos teóricos e implicaciones para la selvicultura. En: Rey Benayas J.M., Espigares T. y Nicolau J.M. (Eds.), Restauración de Ecosistemas Mediterráneos. Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares. Pgs. 43-63.

Zavala M.A., Espelta J.M. y Retana J. 2000. Constraints and trade-offs in Mediterranean plant-communities: the case of mixed holm oak-Aleppo pine forests. Botanical Review 66: 119-149.

6. IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD ANIMAL

Juan Moreno, Eduardo Galante y Mª Ángeles Ramos

Contribuyentes

R. Araujo, J. Baixeras, J. Carranza, M. Daufresne, M. Delibes, H. Enghoff, J. Fernández, C. Gómez, A. Marco, A. G. Nicieza, M. Nogales, M. Papes, N. Roura, J. J. Sanz, V. Sarto i Monteys, V. Seco, O. Soriano, C. Stefanescu

Revisores

M. Álvarez Cobelas, J. Bustamante, B. Elvira, R. Márquez, A. Martin, P. A. Rincón, J. L. Tellería, F. Valladares

A. Pape Möller, J. P. Lumaret, A. Minelli

RESUMEN

Existen dos escenarios futuros de efectos del cambio climático sobre la biodiversidad de vertebrados: 1) Los ecosistemas se desplazan en conjunto en función del clima, y 2) Los ecosistemas se adaptan y cambian. El primero es poco realista debido a la tremenda y creciente fragmentación de hábitat en Europa y a la complejidad de las respuestas de las distintas especies y de sus interacciones. Sólo en ríos parece que existe esta posibilidad de desplazamiento de las biocenosis. El segundo no permite predicciones exactas en la mayoría de los casos con el nivel de conocimientos actual.

Existen evidencias de efectos directos del cambio climático ocurrido hasta el presente, a pesar de la escasez de buenas series temporales. Así se han detectado importantes cambios fenológicos en poblaciones de vertebrados e invertebrados, con adelantos (y en ciertos casos retrasos) en procesos de inicio de actividad, llegada de migración o reproducción.

Los desajustes entre predadores y sus presas debidos a respuestas diferenciales al clima son otra consecuencia detectada de recientes cambios.

La distribución de ciertas especies se está desplazando hacia el Norte o hacia mayores altitudes, lo que para ciertas especies de montaña está significando una clara reducción de sus áreas de distribución. De forma similar, en ríos, se ha observado un desplazamiento de especies termófilas aguas arriba (sobre todo de moluscos), mientras disminuye la proporción de especies de aguas frías (sobre todo de insectos). En lagunas y lagos se ha observado que la altitud, la latitud y la profundidad tienen efectos similares sobre las comunidades, lo que parece relacionado con la temperatura.

Existen algunas evidencias de mayor virulencia de parásitos o de aumento de poblaciones de especies invasoras, en general más adaptables a cambios ambientales, que podrían vincularse a cambio en el clima.

El deterioro de hábitat frágiles como pequeñas masas de agua, fuentes, manantiales, pequeños arroyos y bosques aislados por desecación o incendio o la desaparición de plantas nutricias de limitada distribución pueden afectar seriamente a poblaciones animales e incluso provocar la desaparición de especies, sobre todo de invertebrados.

Ni el desplazamiento de áreas de distribución (hipótesis I) ni la adaptación rápida a nuevas condiciones ecológicas (hipótesis II) parecen soluciones viables para la mayoría de las especies estudiadas.

Entre las zonas más vulnerables a efectos del cambio climático podrían incluirse zonas costeras, humedales, cursos de agua permanentes que pasarán a estacionales y estacionales que tendrán un caudal más irregular o incluso desaparecerán, zonas de alta montaña y pastizales húmedos.

Las principales soluciones adaptativas deben incluir el diseño de reservas y parques naturales que permita la posibilidad de migración y cambios de distribución mediante la inclusión de corredores biológicos entre ellas. La red de áreas protegidas debería incorporar gradientes latitudinales y altitudinales que permitieran proteger a poblaciones con distribuciones geográficas en vías de desplazamiento geográfico debido al cambio climático.

Sería interesante valorar la catalogación o creación de “zonas o áreas especialmente sensibles al cambio climático" para aquellas áreas con ecosistemas originales únicos o especies amenazadas o endémicas que no tengan opción para desplazar su hábitat y puedan sufrir extinción. Son ejemplos de estas zonas los territorios de alta montaña o los pozos, manantiales, arroyos y otros cursos de agua con presencia de especies en peligro de extinción o vulnerables.

La conservación de la biodiversidad debe prestar atención no sólo a las áreas protegidas, sino de modo muy especial a la promoción con carácter general de usos del territorio compatibles con la conservación y con capacidad de contrarrestar efectos del cambio climático.

El aumento de la demanda de agua para usos humanos debido a aumentos de temperatura y en un contexto posible de sequías prolongadas, determinará posiblemente el aumento de soluciones tecnológicas que no tengan en cuenta los impactos sobre la biodiversidad de animales que dependen del mantenimiento de los acuíferos y de los cursos permanentes de agua.

La reforestación puede tener efectos positivos o adversos sobre la diversidad faunística dependiendo de cómo se hagan. En cualquier caso influirá en la composición taxonómica de la fauna edáfica.

Es necesario potenciar la investigación en taxonomía y la que incluya series temporales largas, tanto a nivel específico como de comunidades, y no permitir el deterioro o progresiva desaparición de fuentes de información como la base fenológica de plantas y animales (aves e insectos) que se inició en 1940 por el Servicio de Meteorología Agrícola del Instituto Nacional de Meteorología (INM).

6.1. INTRODUCCIÓN

6.1.1. La fauna de vertebrados en España

Se conoce con bastante aproximación el número de especies de vertebrados que existen en España (ver Atlas y Libros Rojos recientemente publicados). Unas 51.000 especies o el 4,1% de las especies descritas en el mundo son vertebrados (Ramos y Templado 2002 y Tabla 6.1). En la península Ibérica se han computado aproximadamente unas 1180 especies incluyendo peces continentales y marinos y considerando entre las aves sólo las residentes y reproductoras (Ramos *et al*. 2002), lo que constituiría menos del 2% de todas las especie animales existentes en nuestro país. Habría 118 especies de mamíferos, 368 especies de aves, 61 especies de reptiles y 29 de anfibios. En anfibios, reptiles y mamíferos, esta cifra puede oscilar levemente según el criterio taxonómico utilizado, pero la mayor discrepancia se produce en relación con el grupo taxonómico menos conocido y más diverso, los peces marinos y continentales, de los que podría haber unas 750 especies (Doadrio y Ramos com. pers.). Con la referencia de los números conocidos para las distintas clases de vertebrados de los países europeos, España resulta ser el país con mayor cantidad de especies descritas y también de endemismos (un 8% en relación con el segundo país, Italia peninsular, con un 4%) (Ramos *et al*. 2002). También resulta desgraciadamente el primer país europeo en número de especies de vertebrados amenazadas de extinción, un 7% (Ramos *et al*. 2002). España es pues un país clave para la preservación de la biodiversidad europea en especies de vertebrados. Hay que destacar la elevada endemicidad de la fauna vertebrada de Canarias. Así las 14 especies de reptiles que habitan en Canarias, excepto una introducida, son endémicas. En aves, el número de especies endémicas es más elevado que en el resto del territorio nacional, oscilando entre 4 y 6 especies según autores.

6.1.2. La fauna de invertebrados en España

La extraordinaria variedad ambiental española, en la que están representadas cuatro de las seis regiones biogeográficas de la Unión Europea (mediterránea, atlántica, alpina y macaronésica), así como un 60% de los hábitat de interés comunitario incluidos en la red Red Natura 2000 (Hidalgo 2002 y Capítulos 2, 3, 4 de este libro), permite que nuestro país albergue una elevada diversidad de especies animales. La combinación de los factores causales de esta biodiversidad, en términos de posición geográfica, orografía, climatología, litología, así como factores paleobiogeográficos y sociológicos, se ha revisado en Ramos *et al*. (2001) y se resumen en el capítulo 5. La enorme diversidad de ecosistemas y hábitat únicos, tanto en la Península como en los archipiélagos de Baleares y Canarias, se traduce no sólo en un elevado número de especies (aproximadamente el 50% de las inventariadas por los proyectos Fauna Europaea 130.000 especies, y European Register of Marine Species (ERMS) 25.000 especies), sino también en un alto porcentaje de endemismos (más del 50% de las especies endémicas en Europa), sobre todo teniendo en cuenta que nuestro territorio representa menos de un 6% del europeo.

Aunque no se dispone aún de inventarios completos de las especies descritas en España (http://www.fauna-iberica.mncn.csic.es/), se estima que en nuestro país habitan unas 68.000 especies animales (Ramos y Templado 2002 y Tabla 6.1). Los invertebrados constituyen, sin duda, la mayor contribución a la diversidad animal, tanto en el medio terrestre como en las aguas dulces, salobres y marinas de la Península y Archipiélagos. Cerca de un 98% de las especies de nuestra fauna son invertebrados y, de ellos, alrededor de un 76% son insectos (unas 50.000 especies). Si bien las cifras de especies de invertebrados no insectos son relativamente bajas en comparación con los insectos, su contribución a la biodiversidad y a los procesos vitales del planeta es muy notable. En cuanto a formas de vida se refiere, mientras que todos los insectos pertenecen a un mismo grupo de artrópodos, con categoría de Clase en el Reino Animal, los demás invertebrados con representantes en España pertenecen a 32 de

los 33 grupos con categoría de Filo descritos en el Planeta, lo que significa, un gran número de líneas evolutivas independientes, que corresponden a otros tantos planes estructurales distintos dentro del Reino Animal.

Nuestra fauna invertebrada está aún lejos de ser bien conocida. En los últimos años se han publicado algunos estudios que compilan y analizan los nuevos taxónes descritos en la Península y los archipiélagos de la Macaronesia (Templado *et al*. 1995; Fernández 1996 1998 2000 2001 2002 y 2003; Esteban y Sanchíz 1997). Dichos trabajos recogen, en el período 1994-2000, un total de 2.152 nuevas especies descritas en España (1.737 peninsulares y 415 canarias), de las que 609 (465 peninsulares y 144 canarias) corresponden a invertebrados no insectos. Ello equivale a una tasa de descripción de 250-300 especies nuevas al año, de las que un 72% son insectos y el resto corresponden a otros tipos de invertebrados. Los datos del proyecto Fauna Europaea (sin publicar) corroboran que los países de la Cuenca Mediterránea son los que poseen mayor número de especies en Europa. España, seguida por Grecia e Italia son los países que destacan por el elevado número de nuevas especies que se describen anualmente. La asíntota en la tasa de nuevas descripciones está aún lejos de ser alcanzada.

Catorce de los 32 Filos son exclusivamente marinos, los restantes 17 Filos habitan tanto en medios marinos como continentales de nuestro país (Tabla 6.1). De ellos, nueve tienen representantes en todos los medios terrestres y dulceacuícolas, mientras que otros siete sólo habitan en ecosistemas marinos y de agua dulce. Los Filos con mayor éxito evolutivo son los Moluscos, los Nematodos (un grupo aún muy poco conocido) y especialmente los Artrópodos (que incluyen a los insectos –Hexápodos- y por tanto acaparan las tres cuartas partes de la biodiversidad del planeta y de nuestra fauna.

Tabla 6.1. *Relación de los Filos animales actuales con indicación de su presencia relativa en los medios marino (M, m), dulceacuícola (D, d) o terrestre (T, t), número de especies descritas a nivel mundial, número de especies estimadas en España (Península y Archipiélagos), y número de especies presentes en cada uno de los grandes medios: marino (M), dulceacuícola (D) y terrestre (T). Una interrogación después de una cifra significa que el grupo está insuficientemente estudiado y el número de especies es estimativo. Una interrogación aislada significa que no se dispone de datos que permitan hacer una estimación. (Tomado de Ramos y Templado 2002).*

	Medio	**Nº especies descritas global**	**Nº especies estimadas España**	**Nº especies M**	**Nº especies D**	**Nº especies T**
PLACOZOOS	M	2	1?	1?	—	—
PORÍFEROS	Md	10.000	606	600	6	—
CNIDARIOS	Md	10.500	650	647	3	—
CTENÓFOROS	M	90	20	20	—	—
MESOZOOS	M-P	90	25?	25?	—	—
PLATELMINTOS	MDT	19.000	800?	500?	200?	100?
GNATOSTOMÚLIDOS	M	80	15?	15?	—	—
GASTROTRICOS	Md	500	100?	75?	25?	—
ROTÍFEROS	mD	2.000	350	20	330	—
ACANTOCÉFALOS	MDT-P	1.200 P	50?	50?	?	?
CICLIÓFOROS	M-P	1	1?	1? P	—	—
ENTOPROCTOS	Md	100	20?	20?	—	—
NEMERTINOS	Mdt	900	146?	145	1	—
SIPUNCÚLIDOS	M	150	35	35	—	—

EQUIÚRIDOS	M	120	15	15	—	—
ANÉLIDOS	MDT	13.100	1.328	1.000	25	300
MOLUSCOS	MDT	125.000	2.700	2.250	120	330
NEMATODOS	MDT	20.000	1.000?	300?	100?	600?
NEMATOMORFOS	mD	250	?	?	?	—
QUINORRINCOS	M	80	15?	15?	—	—
LORICÍFEROS	M	20	1?	1?	—	—
PRIAPÚLIDOS	M	17	3	3	—	—
ONICÓFOROS	DT	110	—	—	—	—
TARDÍGRADOS	MDT	800	30?	30?	?	?
ARTRÓPODOS	MDT					
Hexápodos	T	800.000	50.000	?	?	50.000
Miriápodos	T	15.000	500	?	?	500
Quelicerados	mdT	70.000	3.400	270	630	2.500
Crustáceos	Mdt	100.000	3.550	2.500	700	350
QUETOGNATOS	M	60	30	30	—	—
FORONÍDEOS	M	10	8	8	—	—
BRAQUIÓPODOS	M	350	31	31	—	—
BRIOZOOS	Md	4.500	300	300	?	—
EQUINODERMOS	M	7.000	300	300	—	—
HEMICORDADOS	M	80	5	5	—	—
CORDADOS	MDT					
Urocordados	M	1.400	350	350	—	—
Cefalocordados	M	25	2	2	—	—
Vertebrados	MDT	51.000	1.792	1.180	108	504
TOTAL		1.253.535	68.179	10.744	2.248	55.184

Abreviaturas

M= marino, D= dulceacuícola, T= terrestre, P= parásito.
M= grupo exclusivamente marino.
Md= mayoritariamente marino, con algunas especies en las aguas dulces.
Mdt= mayoritariamente marino, con algunas especies en las aguas dulces y en el medio terrestre.
MDT= se encuentran bien representados en todos los medios marino, dulceacuícola y terrestre.
mD= mayoritariamente dulceacuícolas, pero también marinos.
mdT= mayoritariamente terrestres, con algunas especies acuáticas.
T= exclusivamente terrestres.
DT= exclusivamente terrestres y de agua dulce.
P= exclusivamente parásitos.+

Los Moluscos constituyen, después de los Artrópodos, el Filo más diversificado del Reino Animal. Sólo las clases de los Gasterópodos y Bivalvos tienen representantes en medios continentales. Los moluscos se están estudiando intensamente en España, donde se conocen un elevado número de endemismos (sobre todo entre los gasterópodos terrestres y dulceacuícolas). Este número es particularmente alto entre los caracoles terrestres, Helicoidea, (tanto en Canarias como en la región mediterránea) y en la familia Hydrobiidae de moluscos de agua dulce (con un 90% de especies endémicas en la península Ibérica y en Baleares). Los bivalvos dulceacuícolas incluyen, además de a los pequeños Esféridos que están presentes en prácticamente todos los medios, a las grandes y amenazadas especies de náyades. Todos los moluscos parecen ser muy sensibles a los factores climáticos.

Si existe un grupo de animales del que podemos decir que ha alcanzado un éxito biológico sin precedentes y que tiene un importante papel en todos los ecosistemas es el de los Artrópodos Además de los insectos, los artrópodos incluyen a las arañas, ácaros y escorpiones (Quelicerados), que son sobre todo terrestres, y a los ciempiés, milpiés, escolopendras y afines (Miriápodos) con unas 500 especies en España y un alto porcentaje de endemismos. Los Crustáceos constituyen el otro gran grupo de Artrópodos que, al contrario que los anteriores, dominan en el medio acuático.—Comprende muy diversos grupos como cangrejos (Malacostráceos), pulgas de agua (Anfípodos), cochinillas de la humedad (Isópodos), así como muchas formas planctónicas, como los Copépodos.–Estos últimos son tan abundantes en el plancton que constituyen el grupo animal con mayor número de individuos en todo el planeta. Los Isópodos son los crustáceos dominantes en el medio terrestre y cuentan con numerosos endemismos en España. Hay que resaltar también un alto número de endemismos y especies nuevas de crustáceos (Bathynellaceos, Copépodos y Ostrácodos) descritas en aguas subterráneas y cuevas, tanto en las aguas dulces peninsulares como en el medio anquihalino (cavidades kársticas y tubos volcánicos inundados por agua marina estancada) de Baleares y Canarias.-Asimismo, son numerosos los endemismos entre los Anfípodos. Muchas especies de estos grupos son excelentes indicadores de la calidad del agua y de cambios ambientales producidos directamente por el clima e indirectamente por influencia humana.

Los insectos constituyen el grupo con mayor éxito evolutivo. Supera el millón de especies conocidas actualmente, lo que supone cerca del 75% de todos los seres vivos conocidos, estando involucrados en prácticamente todos los procesos ecológicos (Galante y Marcos-García 1997, Samways 1994, Tepedino y Griwold 1990).

La cuenca mediterránea, una de las áreas de más alta diversidad del mundo (Myers *et al*. 2000), alberga aproximadamente unas 150.000 de insectos (Balleto y Casale 1991), siendo la región iberobalear española el área geográfica europea con mayor biodiversidad, estimándose que posee cerca de 50.000 especies de artrópodos, lo que constituye aproximadamente el 81% de todas las especies animales presentes en España (Ramos *et al*. 2001, 2002, Martín-Piera y Lobo 2000). A esta extraordinaria biodiversidad que España posee en esta región, debemos añadir la importante riqueza entomológica que las Isla Canarias con más de 6.000 especies de artrópodos y con un índice de endemicidad cercana al 45% (Machado 2002).

Los sistemas montañosos ibéricos presentan en general un elevado número de endemismos de grupos de especies ligados a la vegetación y altitud (Martín *et al*. 2000). Por otra parte encontramos una alta endemicidad entre los grupos de especies que viven en áreas de climatología más extrema y con mayores índices de aridez como las zonas costeras de la región del sudeste de la península Ibérica (Verdú y Galante 2002). El resultado es que la región iberobalear posee una de la más altos índices de endemicidad de insectos de Europa (Galante 2002), y si bien el porcentaje varía mucho según los grupos (Gurrea Sanz y Sanz Benito 2000, Vives 2000, Mico y Galante 2002), se puede afirmar que casi el 25% de las especies ligadas a ecosistemas terrestres que habitan en territorio español son endémicas. Este procentaje se ve ampliamente superado en algunos grupos como los Coleópteros Tenebrionidae en el que el 60,2% de las 522 especies y 129 subespecies españolas son endémicas (Cartagena 2001).

Respecto a la fauna entomológica que vive en agua dulce de la región iberobalear, en esta región vive más del 25% de las especies de insectos acuáticos que se conocen en Europa exceptuando Dípteros (Pujante Mora 1997). Una tercera parte de las especies de Tricópteros, Plecópteros y Efemerópteros que encotramos en lo cursos de agua y ecosistemas lacustres españoles son endemismos de distribución muy restringida y en todo caso exclusivos de España (Alba-Tercedor 2002, Alba-Tercedor y Jáimez-Cuéllar 2003, Tierno de Figueroa *et al*. 2003).

6.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

6.2.1. Papel del clima actual en la distribución y biología de la fauna de Vertebrados

Existen evidencias de efectos climáticos sobre la biología, abundancia y distribución de vertebrados españoles:

- Censos realizados durante 15 años en 4 localidades de un pequeño río de Asturias muestran una relación clara entre el caudal en marzo (mes en que emergen los alevines de truchas *Salmo trutta* de los frezaderos) y el número de truchas jóvenes del año en julio (P. Rincón, com. pers.). La relación no es lineal, mostrando un máximo para valores intermedios de caudal y mínimos para años de sequía o muy lluviosos. Estas relaciones se han comprobado también en otros estudios (Moore y Gregory 1988a, b). A su vez la cantidad de truchas jóvenes en julio explica más del 70% de la variación en el número de truchas adultas 16 meses más tarde (época de reproducción). Las zonas protegidas de corriente, asociadas a las orillas y necesarias para los alevines, son más extensas con caudales intermedios. Un aumento de la proporción de años secos reduciría los tamaños poblacionales al reducirse el hábitat disponible para los alevines.

- Las capturas de salmones *Salmo salar* en ríos españoles han disminuido desde cifras próximas a los 10000 ejemplares en la década de los 60 del siglo pasado hasta un 20% de esas cifras en la actualidad. Ello puede tener que ver con aumentos de temperatura en el mar, aunque sus efectos se pueden confundir con los de la sobreexplotación y deterioro o destrucción del hábitat dulceacuícola. Concretamente hay evidencias de efectos negativos importantes de las pesquerías de otras especies. Si los cambios en temperaturas en los ambientes de agua dulce y marinos no están sincronizados, puede aumentar la mortalidad de post-esguines (Hansen 2003). Un periodo crítico para los salmónidos es el del desarrollo embrionario. En algunas fases de éste y especialmente durante la eclosión, la demanda de oxígeno es muy alta, y una tendencia de aumento de la temperatura de los ríos podría tener una influencia severa en la supervivencia. Se requiere más información e investigación sobre la arquitectura genética de caracteres implicados (tasa metabólica), diferenciación genética de poblaciones asociadas a ambientes térmicos diferentes, y plasticidad de las fases tempranas del desarrollo en respuesta a cambios en la temperatura de incubación y desarrollo embrionario.

- La dinámica de reproducción del Sapo corredor *Bufo calamita* (“especie de interés especial”, según el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas) sigue unos ciclos naturales condicionados por la precipitación primaveral que afecta de forma importante al éxito de la metamorfosis (Tejedo 2003). Estos ciclos pueden tener una duración de una década, lo cual sugiere la necesidad de establecer series temporales de mayor duración para poder constatar la realidad de declives demográficos.

- En poblaciones españolas de Camaleón *Chamaeleo chamaeleon* (“especie de interés especial”), los años secos conllevan una mayor mortalidad de hembras y una menor fecundidad (Díaz-Paniagua *et al*. 2002). Largas series de años secos podrían reducir las poblaciones de esta especie. Este problema se acentúa por la escasa longevidad de la especie, que en muchos casos solo cría una vez en su vida y raramente dos veces o más. Esta especie, como muchos otros reptiles, pone huevos de cáscara flexible muy permeable al agua. El aumento de la aridez del suelo durante la incubación (verano) es un riesgo directo para estos animales, pues provoca una mayor mortalidad de huevos y menor viabilidad de crías (además de mayor mortalidad de hembras y menor fecundidad). Una predicción del cambio climático es precisamente el aumento de la aridez del suelo que puede ser especialmente agresiva en suelos blandos como los típicos para la puesta de huevos del camaleón (arena). Este cambio ambiental podría afectar al desarrollo

embrionario y reproducción de reptiles con cáscara flexible de zonas áridas (ofidios y saurios, excluyendo salamanquesas). Datos de campo muestran una altísima mortalidad de puestas naturales, que en algunos años supera el 80 % de puestas completas muertas, así como experimentos que corroboran esta sensibilidad (Díaz-Paniagua y Marco en prep.).

- La precipitación también es el mejor predictor ambiental de la presencia de varios reptiles como el Lagarto verdinegro *Lacerta schreiberi* ("especie de interés especial"), saurio ligado a arroyos de montaña (Marco y Pollo 1993).

- Especies como la Lagartija de Carbonell *Podarcis carbonelli* muestran una distribución muy condicionada por la distancia a la costa (relacionada con la humedad) en el área de Doñana (J. Román, en prep.). Estas avanzadillas meridionales de ciertas distribuciones podrían retirarse ante un aumento de la temperatura y/o una reducción de la humedad.

- Existe un alto riesgo de extinción para ciertas poblaciones de reptiles endémicos, de gran talla, presentes en áreas restringidas de algunas islas Canarias, como son los casos del Lagarto Gigante de La Gomera (*Gallotia gomerana*), cuya única población sobrevive en los riscos de la Mérica (La Gomera) (Nogales *et al*. 2001), el Lagarto Gigante de El Hierro (*Gallotia simonyi*, "en peligro de extinción") en el Risco de Tibataje (Jurado y Mateo 1997) y el Lagarto Canario Moteado (*Gallotia intermedia*, "en peligro de extinción") en el Acantilado de Los Gigantes, en Tenerife (Hernández *et al*. 2000). Cualquier alteración de las condiciones ambientales podría empujarlas hacia la extinción.

- Las precipitaciones tienen un efecto importante sobre la abundancia de paseriformes forestales en bosques ibéricos (Santos y Tellería 1995). Las especies norteñas y paleárticas (muchas de ellas "de interés especial") son más escasas cuanto menor es el nivel de precipitaciones. A nivel de toda la avifauna española, el clima explica un 7% de la diversidad de especies, aumentando la misma con las precipitaciones y disminuyendo con el grado de insolación (Carrascal y Lobo 2003).

- En Canarias, especialmente en las islas orientales más áridas, varias especies de aves parecen reaccionar a los años lluviosos adelantando la reproducción. En años secos, ciertas especies (codornices, trigueros) pueden dejar de criar. Las palomas de laurisilva, especialmente la Paloma turqué (*Columba bollii*, "especie sensible a la alteración del hábitat"), dejan prácticamente de criar en algunos años, lo cual podría achacarse a baja producción de frutos. Una serie de años de bajas precipitaciones podría afectar a los tamaños poblacionales. Los desplazamientos fuera del bosque en busca de alimento podrían determinar una mayor incidencia de daños a cultivos y una mayor vulnerabilidad a cazadores furtivos y venenos. En el caso de la Hubara (*Chlamydotis undulata*, "especie en peligro de extinción"), los niveles distintos de precipitaciones entre islas (Lanzarote, Fuerteventura, La Graciosa) pueden forzar movimientos entre islas, con los consiguientes costes de desplazamiento.

- La abundancia de diversas especies de anátidas en el P.N. de las Tablas de Daimiel durante la primavera está fuertemente correlacionada con la superficie inundada, que a su vez depende de los aportes de agua y, por tanto, indirectamente, de la precipitación. No así la abundancia de anátidas invernantes (Álvarez Cobelas, comunicación personal).

- Existe una correlación entre la distribución del Cernícalo primilla *Falco naumanni* ("especie de interés especial") y la precipitación en Andalucía, existiendo una preferencia por zonas con más precipitación en este marco geográfico (Bustamante 1997). Existe un óptimo de precipitación para la distribución de la especie en España en torno a precipitaciones medias-altas (Seoane *et al*. 2003).

- En poblaciones de Topillo campesino *Microtus arvalis* y Topillo mediterráneo *M. duodecimcostatus* se han comprobado fuertes correlaciones positivas en abundancia con niveles de precipitación primaveral y otoñal en España central (Veiga 1986).

- Las lluvias otoñales desencadenan la reproducción del Conejo *Oryctolagus cuniculus*, especie clave en los ecosistemas de monte ibérico (Villafuerte 2002). Por otro lado, las lluvias torrenciales pueden ser catastróficas para las poblaciones de conejos (Palomares 2003). Un régimen de precipitaciones marcado por una mayor frecuencia de fenómenos extremos podría condicionar la abundancia de conejos y de sus depredadores.

- En poblaciones de Cabra montés *Capra pyrenaica* del Sur de España existe una fuerte correlación positiva entre la producción de crías y la precipitación en primavera. Largas series de primaveras secas podrían afectar negativamente a la productividad de estas poblaciones (Escós y Alados 1991).

- En poblaciones andaluzas de Jabalí *Sus scrofa*, la reproducción en años de sequía es mínima con solo un 17% de hembras que crían y un tamaño medio de camada de solo 3 crías (Fernández-Llario y Carranza 2000).

6.2.2. Papel del clima actual en la distribución y biología de la fauna invertebrada

La mayoría de los estudios sobre los efectos del cambio climático en invertebrados se han llevado a cabo en insectos. Los datos publicados sobre los efectos del clima en las especies de invertebrados no insectos, su distribución o dinámica poblacional son prácticamente inexistentes u ocasionales. Además, con tan amplia diversidad de grupos animales, el conocimiento que poseemos sobre la distribución geográfica y biología de las especies es muy deficiente. Muchos de los escasos datos disponibles se refieren a trabajos experimentales, a observaciones ocasionales en trabajos faunísticos, extrapolaciones y observaciones no publicadas. Los moluscos son, probablemente, los mejor conocidos.

En general puede decirse que la vagilidad del heterogéneo grupo de organismos que denominamos como invertebrados no insectos es baja. Su capacidad de dispersión está, con frecuencia, condicionada al transporte pasivo. Revisaremos, por tanto, en conjunto los datos referidos a la fauna asociada a los ecosistemas edáficos y acuáticos (lagunas, humedales, fuentes, arroyos y ríos), ya que ellos concentran los representantes de todos los Filos animales en el continente, y analizaremos los efectos de los cambios sobre la propia fauna o la influencia de ésta sobre los ecosistemas.

- Los nueve Filos animales con especies terrestres tienen representantes o pasan parte de su vida en el suelo, aunque la diversidad de organismos, genética y taxonómica, está muy pobremente conocida debido a su abundancia y complejidad. La fauna del suelo, junto con la microflora, juegan a su vez un papel fundamental en el funcionamiento del ecosistema: en la descomposición de la materia orgánica, la transformación de nutrientes y (junto con las raíces de las plantas) en el mantenimiento de la estructura de los suelos, así como en la producción de gases de efecto invernadero (Ingram y Wall 1998). El suelo es un sustrato dinámico y altamente estructurado, resultado de las interacciones estables entre su propia estructura y la biota (Erhlich y Erhlich 1992). Los efectos del cambio global por alteraciones en la temperatura, precipitaciones o cambios en el uso del suelo pueden desestabilizar el sistema. Algunas de las alteraciones producidas por cambios bruscos climáticos (disminución de la estabilidad, aumento de la erosión, descenso en los niveles de carbono y de la actividad microbiana), quedan con frecuencia enmascarados por los efectos de los

contaminantes químicos usados en la agricultura que tienen una influencia más directa y drástica sobre la biota.

- La suerte de la fauna edáfica está, con frecuencia, más condicionada por cambios indirectos del clima sobre la vegetación (en especies herbívoras), la disponibilidad de nutrientes y sobre los propios suelos, que por los efectos directos del mismo. No obstante, todos estos efectos directos e indirectos del clima no pueden desligarse de los cambios en el uso del territorio que, con frecuencia, enmascaran o actúan sinérgicamente con los producidos por el cambio global. Los organismos edáficos están universalmente presentes en todos los ecosistemas terrestres, y dada la gran variedad de estos organismos la complejidad de sus interacciones es enorme. Es decir, aunque pueda conocerse el papel individual de cada uno de sus componentes en el ecosistema, o cómo son afectados por cambios climáticos, es difícil predecir el impacto de un cambio sobre las comunidades que forman. Los estudios sobre biodiversidad edáfica son escasos, aunque existe suficiente evidencia para identificar los grupos clave en el funcionamiento de los ecosistemas y que, por consiguiente, pueden ser utilizados como indicadores de cambios ambientales (Ingram y Wall 1998, Porazinska y Wall 2002). En lo referente a la fauna estos son las lombrices de tierra en hábitat húmedos sobre todo, las termitas en hábitat secos y los nematodos que, aunque existen en todos tipos de suelos, muestran especificidad diferente para distintos grados de humedad . Las poblaciones de nematodos parecen ser muy sensibles a la alteración de los suelos y muestran respuestas rápidas a las variaciones ambientales en series temporales cortas, lo que sugiere que pueden ser también afectadas por cambios climáticos a largo plazo (Porazinska y Wall 2002). La estabilidad en la estructura de la comunidad de lombrices de tierra (proporción de tamaños entre las especies, etc.) es esencial para el mantenimiento de las propiedades físicas de los suelos. (Young *et al*. 1998). Las hormigas son un grupo potencialmente importante, aunque los estudios son tan escasos que lo único que puede afirmarse es que su papel es menos relevante que el de las termitas (Lobry de Bruyn y Conacher 1990).

- Se ha constatado que las alteraciones en los ciclos humedad/sequía o hielo/deshielo, que pueden ocurrir cuando se altera la intensidad en el régimen de precipitaciones, influyen de manera directa incrementando el riesgo de erosión que es, sin duda, la principal fuente de degradación entre el conjunto de las alteraciones que pueden ser producidas por variables climáticas. La fauna más afectada es la que habita los suelos con mayor riesgo, y estos son los de las zonas templadas del planeta en la que se incluye la cuenca mediterránea (Young *et al*. 1998).

- De forma experimental se ha estudiado el efecto de dos escenarios climáticos sobre una comunidad de moluscos terrestres y su interacción con la vegetación de pradera en terrenos calizos en el Reino Unido (Sternberg 2000). Los dos escenarios consistían en: 1) inviernos cálidos con aumento de las lluvias estivales y 2) inviernos cálidos y sequía estival. Las manipulaciones climáticas tuvieron efecto significativo sobre la abundancia relativa de moluscos, sin embargo no se observaron cambios en la composición específica. La distribución y densidades de caracoles y babosas resultaron afectadas como consecuencia de cambios en los suelos y en la vegetación, como resultado de cambios fenológicos y en la preferencia alimenticia de las distintas especies.

- También de forma experimental se ha investigado el efecto aislado y combinado de un aumento de CO_2 y de temperatura sobre el comportamiento y la dinámica poblacional de un molusco herbívoro generalista, *Helix aspersa*. El número de juveniles reclutados cuando el CO_2 es elevado no difería de la población control, mientras que se obtuvieron menos juveniles ante un aumento de temperatura. En el experimento combinado (alto CO_2 y temperatura), sin embargo, el número de juveniles reclutados era superior al control. La emergencia de juveniles no se vio afectada dentro de cada experimento, sin embargo,

emergieron 70 días antes en el experimento combinado que en el de temperatura. En ninguno de los casos se observó relación con la calidad del follaje (proporción C:N), ni con la abundancia de la planta preferida *Cardamine hirsuta*. La abundancia de la especie se vio alterada en los tres experimentos (Bezemer y Knight 2001).

- Siete Filos animales tienen representantes en los medios dulceacuícolas (ríos, arroyos, lagos, lagunas, embalses, humedales, fuentes, manantiales). Los invertebrados, y las comunidades que forman, son los elementos más sensibles a la alteración de los ecosistemas acuáticos, tanto por estrés ambiental (calentamiento de la masa de agua), como por la producida por el hombre (contaminación, sobreexplotación de acuíferos, etcétera), y sobre todo por una combinación de ambos, como la prevista. La composición de las comunidades de invertebrados es, por consiguiente, el mejor indicador de la salud del ecosistema. El aumento de la sequía estival y disminución de la precipitación, producirán una reducción de la superficie de humedales, así como en los procesos biogeoquímicos, cuyas consecuencias sobre la fauna dependerán de las características propias de cada sistema. La gran diversidad de humedales en el área Mediterránea hace difícil hacer predicciones de patrones generales. Sin embargo, si cabe prever que se favorezcan los grupos animales y las especies más primitivas y, por tanto, menos especializadas, que tienen mayor plasticidad y son más tolerantes al estrés. La consiguiente dominancia de estas especies no implica necesariamente una disminución de la riqueza faunística aunque si es probable un empobrecimiento de la diversidad específica. Algunas especies, o grupos animales, responderán a la sequía produciendo huevos durables o formas resistentes (ej. Turbelarios, Branquiópodos y Rotíferos, entre otros), otros lo harán prolongando la fase de pupa (algunos insectos, como los Tricópteros).

- En el caso de los ríos, el único estudio que conocemos en Europa, que implique series temporales largas se debe a Daufresne *et al*. (2003). En el alto Ródano se compararon las comunidades de peces (37 especies) e invertebrados (92 taxa) inventariadas entre 1979 y 1999. Se observó que la variabilidad en la abundancia de peces estaba correlacionada con el caudal y temperatura en el periodo de reproducción: bajo caudal y altas temperaturas coincidían con la mayor abundancia de peces (abril-junio). Además se comprobó que las especies de peces y los taxa de invertebrados termófilos remplazaban progresivamente a los peces y los taxa de invertebrados de aguas frías (Figura 6.1). En general los taxa de invertebrados no insectos, y sobre todo los moluscos, que prefieren los cursos medios con corriente lenta (*Potamopyrgus, Corbicula, Theodoxus fluviatilis, Physella, Valvata, Pisidium, Radix, Ancylus fluviatilis*, etc., por este orden) resultaron favorecidos, aumentando sus efectivos y su expansión aguas arriba, sobre la mayoría de los taxa de insectos estudiados que prefieren aguas de corriente rápida (en particular, y por este orden Chloroperla, Protonemura, Nemoura, Rhyaciphila, Stratiomyidae fueron los más perjudicados). Estos patrones estaban directamente correlacionados con las variables térmicas sugiriendo un efecto causal del calentamiento climático. Estos resultados 'in situ' apoyan las predicciones sobre el efecto del cambio climático sobre el desplazamiento aguas arriba de las comunidades dulceacuícolas.

- En los ríos salmoneros y trucheros es ya patente una disminución de las poblaciones de peces, como consecuencia de la fragmentación de los hábitat (capítulo 3). Entre los efectos más sobresalientes sobre invertebrados cabe mencionar el efecto negativo que esto tiene sobre las poblaciones de grandes bivalvos de agua dulce, que necesitan un pez hospedador para cerrar su ciclo vital con la metamorfosis de sus larvas en el cuerpo del pez. Algunas de estas especies, como *Margaritifera margaritifera* y *M. auricularia*, muestran una alta especificidad por el pez hospedador. En el caso de *M. margaritifera* estos son truchas y salmones, con lo que se puede anticipar un declive importante en sus poblaciones que sólo habitan los ríos de la zona norte y noroeste peninsular (Ramos 1998). M. margaritifera está protegida por el Convenio de Berna (Anexo III), la Directiva Hábitat

(Anexos II y V), UICN (en peligro). Aún no se tiene certeza sobre el pez hospedador de las larvas de M. auricularia en la naturaleza -Río Ebro y canales adyacentes- (en caso de no haberse extinguido ya), aunque en laboratorio se ha demostrado que el blenio de río (*Salaria fluviatilis*), puede ser un hospedador potencial (Araujo *et al*. 2001). No obstante, se trata de una especie de pez muy amenazado, con poblaciones fragmentadas, por lo que la supervivencia de ambas especies está comprometida. *M. auricularia* está protegida por el Convenio de Berna (Anexo II), Directiva Hábitat (Anexo IV), UICN (en peligro de extinción), Catálogo Nacional de Especies Amenazadas ("en peligro de extinción"). La especie *Unio elongatulus* utiliza como hospedadores varias especies de peces, por lo que la amenaza no es tan grande. Esta especie está protegida por el Convenio de Berna (Anexo II) y Directiva Hábitat (Anexo V).

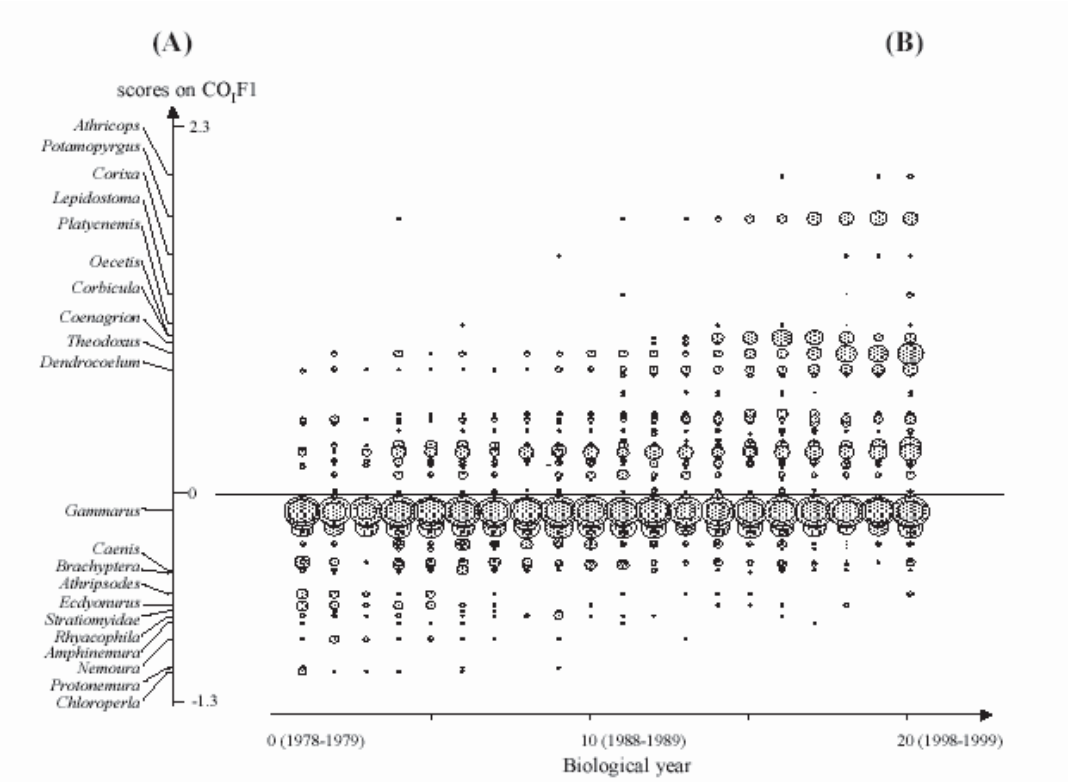


***Fig. 6.1**. Evolución de la composición faunística de invertebrados en la cuenca alta del río Garona desde 1979 hasta 1999. Abundancia media anual por muestra de los diferentes taxónes de invertebrados (el área del círculo es proporcional a la abundancia) clasificados según el primer eje de un análisis de correspondencias (CO1F1). Sólo se muestran los 10 táxones con los valores más altos de los factores y los 10 con los más bajos. (Figura publicada en Daufresne et al. 2003 y amablemente cedida por el primer autor).*

- El estudio de los anillos de crecimiento anual en las conchas de *Margaritifera margaritifera* en Suecia se ha estudiado en un gradiente norte-sur y proporcionaron un registro de la variación del crecimiento durante 217 años (1777 – 1993) (Schöne *et al*. 2004). El patrón observado indica que el crecimiento anual está en gran parte controlado por la temperatura estival. Los meses de junio-agosto son cruciales en las poblaciones más septentrionales, y se desplazan hacia el otoño hacia el sur. En general, a temperaturas más elevadas el crecimiento es mayor. Este estudio pone de manifiesto que las conchas de los moluscos bivalvos, en general longevos (en torno a 70 años) pueden ser utilizados como excelentes herramientas para el registro de eventos climáticos, en particular la variación de temperaturas.

- Los ecosistemas dulceacuícolas son muy sensibles al estrés ambiental y al producido por el hombre, por lo que responden más rápidamente que los ecosistemas terrestres a las alteraciones. La figura 6.2 ilustra este fenómeno.

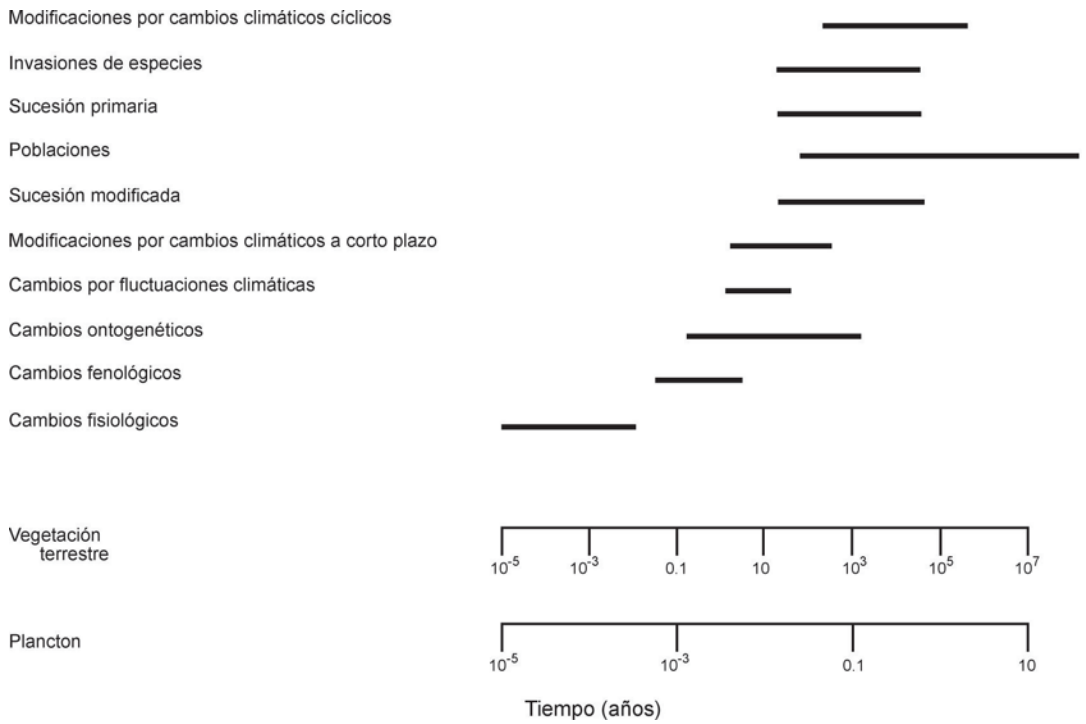


Fig. 6.2. *Diferencias en la escala temporal de los procesos en comunidades terrestres y planctónicas. La escala es logarítmica y los procesos celulares en organismos de ambos medios coincide en aproximadamente 10-5 años (ej., 5 min).*

Existen algunos datos en España sobre efectos del clima sobre las especies de insectos y modelos que predicen cambios en distribución o dinámica poblacional en función de alteraciones climáticas.

- Existen evidencias de que el número de especies de lepidópteros ropalóceros en el noreste peninsular ibérico está básicamente condicionado por dos variables climáticas, la temperatura y la pluviosidad. La riqueza de especies está negativamente correlacionada con las temperaturas y positivamente con el índice pluviométrico (Stefanescu *et al*. 2004). Estos datos nos indican que en el contexto del cambio climático, un aumento de las temperaturas y un clima más seco comportará una pérdida clara de la diversidad de especies.

- La mariposa *Parnassius apollo* (Lepidoptera Papilionidae) es una especie protegida por el Convenio de Berna (Anexo II), UICN 2000 (Vulnerable), CITES (Anexo II) y Directiva de Hábitat (anexo IV). Es una especie ampliamente distribuida por Eurasia aunque de manera fragmentaria y aislada en pequeñas poblaciones. Se han descrito numerosas subespecies (hasta 160 en toda su área de distribución y hasta 24 en España). Posee una distribución discontinua boreoalpina representada en toda Europa, extendiéndose por Siberia hasta el centro de Asia. En la península Ibérica se encuentra en los principales sistemas montañosos entre altitudes de 800 y 3000 m. Los principales núcleos poblacionales se encuentran en la Cornisa Cantábrica (desde los montes leoneses y Asturias a las sierras alavesas), Pirineo oscense y catalán, Sistema Ibérico (desde las provincias más septentrionales hasta Teruel y Comunidad Valenciana), Sistema Central (Sierra de Guadarrama) y sierras béticas (desde

Sierra María en Almería hasta Sierra Nevada). Se sabe que según el único estudio existente sobre la movilidad de los adultos, los desplazamientos son cortos, cifrándose entre los 260 m y los 1840 m (Brommer y Fred 1999). Las actividades antrópicas (sobre todo estaciones de esquí e infraestructuras en la alta montaña) y el cambio climático se han señalado como los factores más importantes de regresión de sus poblaciones en las montañas más meridionales de España (Baixeras 2002). Es una especie restringida en general a hábitat muy reducidos, y cualquier factor que incida directamente sobre la especie en las cotas más bajas de su distribución constreñirá a la especie en unos límites que pueden hacer inviable su supervivencia en muchas localidades. Se ha calculado que en algunas poblaciones meridionales y aisladas, como las existentes en Penyagolosa (Castellón), un aumento de 0,1º C anuales podría conducir a la desaparición de estas poblaciones en algo más de 30 años (Baixeras 2002).

- *Culicoides imicola* es un díptero de la familia Ceratopogonidae, vector de arbovirus del ganado que produce entre otras la enfermedad de la lengua azul en rumiantes y peste equina en África (Wittmann *et al*. 2001), enfermedades incluidas en las listas internacionales de epizootias. En este momento se conoce su presencia en la mitad sur-occidental de la península Ibérica (Rawling *et al*. 1997). La distribución de *Culicoides imicola* está condicionada por la temperatura media anual y las precipitaciones (Baylis y Rawling 1998). De acuerdo con el modelo predictivo desarrollado por Wittman *et al*. (2001), se ha visto que esta especie puede ampliar rápidamente hacia el norte su área de distribución. Un incremento de unos 2º C en la temperatura media global en el presente siglo podría conllevar la ampliación en 200 km su límite norte de distribución en Europa, lo que indudablemente provocaría la aparición de graves epizootias en España que podrían alcanzar el norte de Francia y Suiza (Wittman *et al*. 2001). Los datos predictivos sobre la dispersión hacia el norte de esta especie han sido recientemente confirmados con la captura de ejemplares en Baleares, Cataluña y Comunidad Valenciana (Sarto i Montenys y Saiz Ardanaz 2003).

- *Linepithema humile* es la denominada hormiga argentina, una especie invasora en numerosas partes del mundo. El origen de esta especie es Argentina y ha logrado penetrar en numerosos hábitat urbanos y naturales de ecosistemas mediterráneos y tropicales. Su actividad provoca graves alteraciones en los ecosistemas y daños en recursos humanos, provocando graves pérdidas económicas. Esta especie está presente en España, y de acuerdo con los modelos predictivos existentes, se prevé una importante expansión hacia el norte de Europa en los próximos 50 años, lo que implicará en España una presencia generalizada de la especie (Roura *et al*. 2003, figura 6.3). Esto provocará graves consecuencias para la biodiversidad en muchos hábitat por competencia en unos casos y por depredación en otros.

- Existen datos que indican que en los ecosistemas mediterráneos la distribución espacial y periodos diarios de actividad de especies de coleópteros Scarabaeidae y Geotrupidae dependen de la temperatura (Mena *et al* 1989, Galante *et al*. 1991, Galante 1992), por lo que un incremento de la misma va a tener una importante repercusión sobre las especies de estos grupos.

- Se ha visto en algunas especies de lepidópteros y coleópteros del medio mediterráneo ibérico que una estrategia para sobrevivir durante las épocas más desfavorables es retrasar la maduración ovárica, evitando de este modo la aparición de fases inmaduras en un momento en el que los recursos alimenticios son escasos y las condiciones ambientales no permiten el desarrollo (García-Barros 1988, Lumbreras *et al*. 1990 1991). Por ejemplo en los estudios realizados por Galante y su grupo se vio como en el coleóptero escarabeido *Bubas bubalus*, las hembras que aparecen a principios del otoño copulan y almacenan los espermatozoides en la espermateca sin que se produzca la fecundación de los óvulos. Los

ovarios sufren reabsorción de óvulos y movilización de reservas de grasa, lo que les permite optimizar sus recursos energéticos durante la fase invernal, desarrollando óvulos viables en la siguiente primavera que serán fecundados probablemente como resultado de nuevas cópulas (Lumbreras *et al*. 1991).

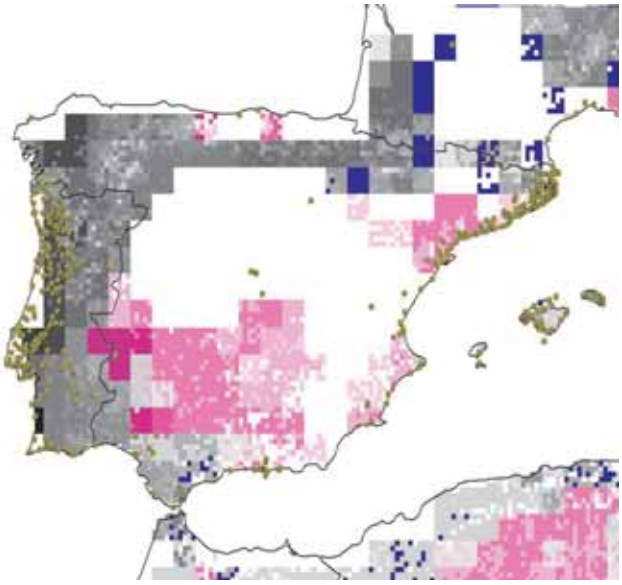


Fig. 6.3. *Modelización de los efectos del cambio climático en la distribución potencial de la Hormiga argentina (Linepithema humile), una especie invasora. Los tonos negros-grises indican las áreas que reúnen las condiciones adecuadas para la presencia de la especie en la actualidad, mientras que tonos azules y rosados indican las áreas a reducirse y aumentar en el futuro respectivamente Los puntos indican localidades donde la especie se encuentra presente en la actualidad (Extraído de Roura et al. 2003).*

- Se ha puesto en evidencia que la temperatura tiene un importante impacto sobre las poblaciones de pulgones (Hemiptera Aphidinea), produciéndose una alteración de los periodos de vuelo. En estos momentos existe la red europea denominada EXAMINE (Exploitation of Aphid Monitoring in Europe) que ha realizado un seguimiento en 19 países durante 3 años de los periodos migratorios de los pulgones valiéndose de trampas de succión (Harrington *et al*. 2001, Hulé *et al*. 2003). Se han encontrado datos sólidos que indican que existe una clara relación entre las dinámicas poblacionales de los áfidos y las variables ambientales Las variables climáticas son un factor explicativo sólido en al menos el 50% de la variación de los periodos y escala de vuelo en áfidos, si bien existen otros factores que influyen a nivel local como son los cambios de usos del suelo y la fragmentación del hábitat.

- El proyecto EXAMINE ha puesto de manifiesto que existe una clara correlación entre el incremento de las temperaturas invernales y el descenso de pluviosidad con el adelanto de los periodos anuales de vuelo de pulgones áfidos. No obstante el factor más influyente en este adelanto de los periodos de vuelo parece ser el incremento de temperaturas (Harrington *et al*. 2003, Seco-Fernández *et al*. 2003).

6.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

No hay suficientes buenas series temporales con las que ilustrar debidamente lo que ha ocurrido en los últimos tiempos. Hay evidencias históricas de lo que viene ocurriendo en los últimos 10.000 años, como la retirada hacia el norte de los bosques húmedos y la ampliación

de las zonas de sequía mediterránea (y el Sahara, que ha expandido 7 grados de latitud en los últimos 15.000 años). Desde esta perspectiva temporal, lo que ahora se observa puede no ser sino la continuación, tal vez acentuada por las intervenciones humanas, de un proceso que en nuestro país puede tener consecuencias gravísimas en términos de biodiversidad. Si las predicciones de los modelos de circulación global para el siglo XXI son correctas, los aumentos de la sequía aumentarán el estrés hídrico de una vegetación arbórea y arbustiva que vive ya al límite de sus posibilidades por los prolongados procesos de cambio precedentes. Dado que España se encuentra en una región periférica y peninsular del continente (Ramírez y Tellería 2003), esto puede suponer la retracción de muchas especies de filiación atlántica (que serían la mayoría en vertebrados), el aumento de la insularidad de las especies relictas boreo-alpinas y la extinción de muchas poblaciones de estos organismos "norteños" que hoy presentan ya una notable fragmentación hacia el sur. Por otro lado, la barrera de Gibraltar puede impedir la colonización por especies africanas. Ello conllevaría un considerable empobrecimiento faunístico. Por otro lado, el estrecho de Gibraltar podría suponer una barrera para la expansión hacia el norte de especies africanas.

Recientemente el riesgo de extinción de 1103 especies de animales y plantas en regiones que cubren un 20% de la superficie terrestre ha sido modelado en base a predicciones de cambio climático hasta 2050 (Thomas *et al*. 2004). En un escenario conservador con aumentos de temperatura global de 0,8-1,7ºC se extinguirían según estos modelos un 18% de las especies, mientras en un escenario dramático de aumentos térmicos globales superiores a 2ºC se extinguirían hasta un 35% de las especies. Según este trabajo, el cambio climático puede convertirse en el principal factor de extinción de especies en el siglo XXI.

6.3.1. Escenarios futuros e incertidumbres según hipótesis

Existen dos escenarios futuros de efectos del cambio climático sobre la biodiversidad de vertebrados:

6.3.1.1. Hipótesis I: Los ecosistemas se desplazan en conjunto

El primero está basado en que los ecosistemas completos se desplacen hacia el norte o en altitud en función de los cambios en temperatura y precipitaciones. Este escenario es poco realista debido a la tremenda y creciente fragmentación de hábitat en Europa y a la complejidad de las respuestas de las distintas especies y de sus interacciones. Los impactos del cambio climático global han sido considerados en ocasiones como meros desplazamientos de áreas de distribución, pero existen evidencias de que los desplazamientos de distribuciones pueden aumentar los costes derivados de interacciones bióticas cuando las especies ocupan hábitat para los que no están adaptados, o en los que incurren en nuevas interacciones ecológicas (Martin 2001).

6.3.1.2. Hipótesis II: Los ecosistemas se adaptan y cambian

El segundo contempla la modificación de los ecosistemas actuales en cuanto a su composición y relaciones entre especies debido a la respuesta diferencial de las mismas a los cambios. La desaparición de ciertas especies o la inmigración de nuevas especies pueden llevar a reacciones en cascada sobre otros componentes de los ecosistemas. Este escenario no permite predicciones exactas en la mayoría de los casos con el nivel de conocimientos actual.

6.3.2. Cambios detectados que pueden afectar a la supervivencia de poblaciones

6.3.2.1. Cambios fenológicos

6.3.2.1.1. Cambios fenológicos en Vertebrados

Los adelantos o retrasos en procesos naturales motivados por rápidos cambios climáticos pueden llevar a respuestas en la fenología de las poblaciones de vertebrados. Muchos organismos presa de vertebrados pueden responder más rápidamente que ellos mismos a los cambios, produciéndose una perdida de sincronización entre consumidores y recursos. Muchas especies de vertebrados responden a variación estacional en ritmos circadianos para iniciar procesos reproductivos, migratorios o de hibernación, variación que no se ve afectada por cambios climáticos. Sin embargo, los recursos de los que dependen pueden responder a condiciones climáticas, lo que conlleva perdida de sincronización. Una de las consecuencias más probables de la perdida de sincronización entre especies en distintos niveles tróficos es el desajuste entre los requerimientos y la disponibilidad de alimento para las de niveles superiores, lo cual puede conllevar fracasos reproductivos o disminución de la supervivencia (hipótesis II).

Las especies de ciclo más corto pueden responder a la selección mediante cambios micro-evolutivos muy rápidos. Para especies de tiempos generacionales prolongados, la respuesta a cambios rápidos en la disponibilidad de recursos solo puede ser mediante plasticidad fenotípica. El grado de plasticidad está modulado por la variabilidad en las condiciones ambientales experimentadas por una especie en el tiempo evolutivo. La variabilidad genética también puede posibilitar la adaptación al cambio en especies de vida corta.

- Uno de los cambios más llamativos detectado en anfibios ha sido el adelanto de la reproducción en un buen número de especies en Europa y Norteamérica (Beebee 1995, Gibbs y Breisch 2001). Sin embargo ningún estudio a largo plazo capaz de detectar estos adelantos ha sido realizado en España. Se están recogiendo datos desde hace 5 años para poblaciones de Rana bermeja (*Rana temporaria*, ”especie de interés especial”) en zonas bajas (< 600 msnm) y altas (>1600 msnm) de la Cordillera Cantábrica (A. G. Nicieza, com. pers.). Durante ese tiempo, en zonas altas la reproducción se inicia cuando se retira la nieve de las charcas, pero hasta ahora nunca antes (aunque se retire la nieve de la zona) de la segunda o tercera semana de Marzo. Sería interesante obtener información sobre las componentes genética y ambiental del proceso que determina el inicio de la migración hacia los lugares de reproducción.

- Con respecto a cambios fenológicos en aves, podemos destacar los observados con respecto a la reproducción y migración. Con respecto a la reproducción, se ha estudiado si existen adelantos en el inicio de la reproducción achacables al reciente cambio climático en la península. En las tres especies estudiadas (Carbonero común *Parus major*, Herrerillo común *Parus caeruleus* y Papamoscas cerrojillo *Ficedula hypoleuca*, todas “de interés especial”) no se han observado cambios en fecha o tamaño de puesta durante las últimas décadas (Sanz 2002, 2003, Sanz *et al*. 2003). Esto contrasta con lo observado para el resto del Paleártico Occidental, en donde estos cambios sí han sido detectados y achacados al reciente cambio climático (Sanz 2002, Sanz 2003). Esto se puede explicar por el hecho de que en las poblaciones estudiadas en la Península, el aumento de temperatura detectado durante las últimas décadas se ha producido en los meses posteriores al inicio de la reproducción, por lo que sería esperable encontrar efectos sobre el éxito reproductor (Peñuelas *et al*. 2002, Sanz *et al*. 2003). En Canarias se han detectado casos esporádicos de reproducción en octubre y noviembre por parte del Herrerillo común.

- Existen evidencias que indican que la fenología reproductiva de varias especies de aves ibéricas está afectada por la temperatura o precipitación antes de iniciar la reproducción.

Así, Fargallo y Johnston (1997) han mostrado que el inicio de la reproducción en una población de Herrerillo común en el centro de la Península está afectado por la temperatura un mes antes del mismo. Al incrementarse la temperatura al inicio de la primavera, estás aves adelantan la fecha de puesta. En el Cernícalo primilla se ha detectado una relación entre la temperatura y la precipitación en primavera y la fecha de puesta (J. Bustamante, com. pers.). Falta por conocer con largas series de datos aún no disponibles, si el aumento de temperatura detectado durante las últimas décadas ha afectado a la fenología reproductiva de estas aves.

- Se ha observado un descenso del éxito reproductor, perdida de condición de los pollos al emanciparse y menor reclutamiento de individuos en el Papamoscas cerrojillo durante los últimos 18 años en poblaciones del Sistema Central (Sanz *et al*. 2003). Este estudio se realiza cerca del margen meridional de la distribución de la especie en Europa. Dado que la península Ibérica está en la zona más meridional de la distribución de bastantes especies de aves (Martí y del Moral 2003), y que como respuesta al cambio climático muchas especies pueden cambiar su distribución hacia el norte de Europa, es importante que esto se estudie precisamente en estas zonas. El proceso se puede realizar por colonización de nuevas áreas reproductivas o por extinción de poblaciones en el área meridional. Existen evidencias que nos indican que el éxito reproductor de bastantes especies que se reproducen en la península Ibérica se ve negativamente afectado por una menor precipitación durante la primavera (Carrascal *et al*. 1993, Zuberogoitia 2000, García y Arroyo 2001) o por un incremento de la temperatura (Lucio 1990). Sin embargo, no se ha estudiado si estos efectos, que son esperables en un escenario de cambio climático, se han podido producir en las últimas décadas en estas especies.

- Con respecto a la migración, se han detectado cambios hacia un retraso en 15 días de promedio en la llegada de 6 aves migrantes transaharianas durante los últimos 50 años (Abubilla *Upupa epos*, Golondrina común *Hirundo rustica*, Cuco *Cuculus canorus*, Ruiseñor común *Luscinia megarrhynchos*, Codorniz *Coturnix coturnix* y Vencejo común *Apus apus*, todas menos la codorniz “de interés especial”). En este estudio realizado en una localidad de Barcelona (Peñuelas y Filella 2002), se observa que 5 de las 6 especies muestran un retraso estadísticamente detectable, y que en 4 especies existe una relación con cambios temporales en temperatura, y en una especie existe una relación con cambios temporales en la precipitación. Este retraso en la llegada a las áreas de reproducción en la Península contrasta con el generalizado adelanto observado en el mismo periodo para la fenología de plantas e insectos (Peñuelas y Filella 2002). Esto parece sugerir que estas especies han de tener un peor éxito reproductor con el paso de los años por sufrir un desajuste entre su llegada y la disponibilidad de alimento (hipótesis II). Los depredadores especializados en aves migratorias en paso como el Halcón de Eleonor (*Falco eleonorae*, “de interés especial”) podrían sufrir un desajuste entre su ciclo reproductor y el paso migratorio.

- Se sabe que la temperatura media de marzo en la península Ibérica está relacionada con la fecha de llegada de la Golondrina común a Inglaterra (Huin y Sparks 1998). Cuanto mayor es el incremento de la temperatura en la ruta migratoria, mayor es el adelanto en la fenología de llegada a las áreas reproductivas. Por ello, al ser la península Ibérica una zona de paso migratorio muy importante a nivel continental, los cambios sufridos en la misma se podrán observar en cambios fenológicos en distintas especies de aves migratorias que escojan su área reproductiva en otras regiones del continente. Por otro lado, ciertas especies de aves, como es el caso de la Cigüeña Común o la Golondrina común, han cambiado su comportamiento migratorio. Muchos individuos de estas especies pasan los inviernos en el sur de la Península, evitando así el viaje migratorio trans-sahariano (noticiarios ornitológicos Ardeola). Este hecho constatado no se sabe muy bien si se debe al incremento de las temperaturas medias invernales en la Península o a otras causas. Es

probable que la presencia constante de alimento en los basureros tenga mayor efecto que la temperatura.

- Las condiciones de sequía retrasan la reproducción en el Ciervo *Cervus elaphus*, reducen la fertilidad de las hembras y aumentan la mortalidad de las crías, especialmente de los machos (Clutton-Brock *et al.* 1982, Carranza 1999).

6.3.2.1.2. Cambios fenológicos en Invertebrados

- Mediante manipulaciones climáticas, en hábitat herbáceos, sobre una comunidad de moluscos en el Reino Unido (Sternberg 2000) se ha demostrado que las distintas especies de la comunidad de caracoles y babosas presentaban respuestas diferentes, que se reflejan principalmente en cambios en su fenología y en sus preferencias alimenticias. En condiciones de sequía estival el incremento en la cobertura del suelo por hojarasca favoreció a las especies que se alimentan de ella (ej. *Monacha cantiana*) que aumentaron su actividad y su población, mientras que las especies que se alimentan de hojas verdes y brotes tiernos (ej. *Candidula intersecta, Deroceras reticulatum*) aumentaron sus efectivos con aporte suplementario de lluvia en verano. Se puede predecir que las especies con ciclo de vida anual (la mayoría de los Helicidae) serán más sensibles a los cambios durante su periodo de crecimiento. También experimentalmente se ha observado que en *Helix aspersa* un aumento simultáneo de CO_2 y temperatura conlleva un aumento en el reclutamiento de juveniles así como una aceleración en su emergencia (Bezemer y Knight 2001).

- En el noreste de España se ha observado que desde el año 1988 el periodo de inicio de vuelo en un elevado número de especies de lepidópteros ropalóceros empieza cada vez en fechas más tempranas, lo que supone para algunas especies un adelanto significativo de entre una y 7 semanas, pudiéndose cifrar en una media de 0,1 semanas/año (Stefanescu *et al* 2003). Este proceso es lógico si pensamos que existe una gran dependencia de los periodos de desarrollo de los estados inmaduros en los insectos de la temperatura (Ratte 1985), y que en la mayor parte de los ropalóceros coincide el final de la diapausa y final de su desarrollo con la llegada de la primavera (período en el que también se han detectado los mayores incrementos en la temperatura).

- Se tienen evidencias de que algunas especies de ropalóceros Satyridae y Lycaenidae muestran respuestas más acusadas frente al cambio climático, variando claramente sus picos de actividad anual y el número de semanas en las que presentan actividad de vuelo (Stefanescu *et al*. 2003).

- En algunas especies de Satyridae se ha puesto en evidencia un claro adelanto del periodo de vuelo, como es el caso de *Melanargia lachesis, Pyronia tithonus, Pyronia cecilia, Coenonympha pamphilus* y *Lasiommata megera*, todas ellas con régimen larvario ligado a gramíneas (Stefanescu *et al*. 2003).

- El incremento de temperaturas se espera que provoque un adelanto en el inicio de las migraciones anuales de pulgones. Muchas de estas especies constituyen plagas en cultivos, por lo que deberá tenerse en cuenta el factor de llegada temprana a muchas áreas. Se prevé un adelanto en la colonización de cultivos, en un estado temprano de desarrollo de los vegetales y por tanto con mayor sensibilidad al ataque de la plaga que podrá ocasionar bien daños directos o bien indirectos por transmisión de virus. Este hecho podría traer como consecuencia que en algunas zonas se incremente la aplicación de insecticidas químicos.

6.3.2.2. Cambios en morfología, fisiología y conducta

6.3.2.2.1. Cambios en morfología, fisiología y conducta de Vertebrados

Una de las consecuencias posibles de un aumento de temperaturas sería una selección direccional a favor de tamaños corporales menores. Según la regla de Bergmann, climas más cálidos favorecerían en vertebrados homeotermos un menor tamaño corporal, por su mayor capacidad para eliminar calor o su menor necesidad de reducir su capacidad para eliminarlo. En ciertas aves de Israel se han detectado disminuciones significativas del tamaño corporal a lo largo del pasado siglo (Yom-Tov 2001). No existe ningún estudio de este tipo en España, aunque existen colecciones de ejemplares colectados en distintas épocas que podrían servir para ello.

Se han propuesto ciertas repercusiones nocivas para vertebrados derivadas de los efectos de la temperatura sobre el desarrollo embrionario. En muchas especies de reptiles, el sexo está determinado por la temperatura en el nido. Un aumento de la misma podría llevar a sesgos exagerados en la razón de sexos, repercutiendo negativamente en la capacidad de los individuos para reproducirse (Dawson 1992). En mamíferos, los aumentos de temperatura podrían llevar a hipertermia en hembras gestantes y consiguiente estrés térmico para los embriones, lo que en algunas especies determina una elevada mortalidad embrionaria (McLean 1991). Estos efectos de la temperatura sobre la viabilidad de los embriones se han propuesto como una causa de la desaparición de muchos grandes mamíferos después de la última glaciación (McLean 1978).

En murciélagos, un modelo bioenergético predice una combinación bastante estrecha de temperaturas en el hibernáculo y duraciones del invierno para permitir una hibernación exitosa. Ello sugiere que la dependencia térmica de la energética de hibernación constriñe la biogeografía de estas especies (Humphries *et al*. 2002). El modelo predice una expansión pronunciada hacia el norte de murciélagos hibernantes en el próximo siglo. Ningún estudio de la bioenergética de la hibernación ha sido realizado en España. Por otro lado, la capacidad de regular la temperatura corporal e impedir la hipertermia en murciélagos en sus habitáculos diurnos puede ser limitada e implicar mortalidad directa (M. Delibes, com. pers.).

Una propuesta general que se ha realizado es que los vertebrados ectotérmicos serían más sensibles a bruscos cambios climáticos, dada su menor autonomía respecto al ambiente térmico. En general, la adaptación al cambio climático podría derivarse de cambios micro-evolutivos basados en variación genética subyacente o de plasticidad fenotípica (Dawson 1992). No existen actualmente estudios en España que exploren la viabilidad de ambas vías de adaptación en vertebrados.

- Las estructuras de edades de varias poblaciones de ciprínidos ibéricos muestran una mayor abundancia de clases de edad viejas en relación a jóvenes (Rincón y Lobón-Cerviá 1989, Velasco *et al*. 1990). Esto indica que son frecuentes las diferencias interanuales en éxito reproductor y reclutamiento. En España no se han examinado con rigor las correlaciones entre variables climáticas y éxito reproductor de ciprínidos, pero estudios en otros países de un ciprínido ampliamente extendido que también se caracteriza por estas fluctuaciones en el reclutamiento, sugieren que estas variaciones están moduladas por la temperatura, y en menor medida, por la precipitación, durante las primeras etapas del desarrollo (Lobón-Cerviá *et al*. 1996).

- En el Papamoscas cerrojillo se han detectado tendencias negativas en el gasto energético (esfuerzo reproductor) o en la tasa de cebas durante las últimas décadas en dos poblaciones estudiadas en el Sistema Central (Sanz *et al*. 2003, figura 6.4). Estas aves insectívoras forestales sufren el desajuste con sus principales presas (orugas), por causa

del cambio climático reciente, y han variado las presas que aportan a los pollos en el nido (hipótesis II). También se han observado cambios en la condición física de los machos y hembras (Sanz *et al*. 2003). El gasto energético diario, una medida integrada de esfuerzo reproductor de estas aves, se ha reducido con el paso de los años, principalmente debido a la relación negativa entre éste y la temperatura ambiente (Sanz *et al*. 2003). Estos cambios en la sincronización con las presas (orugas) debido al reciente cambio climático explicaría los cambios observados en metabolismo de adultos, esfuerzo reproductivo y éxito reproductor.

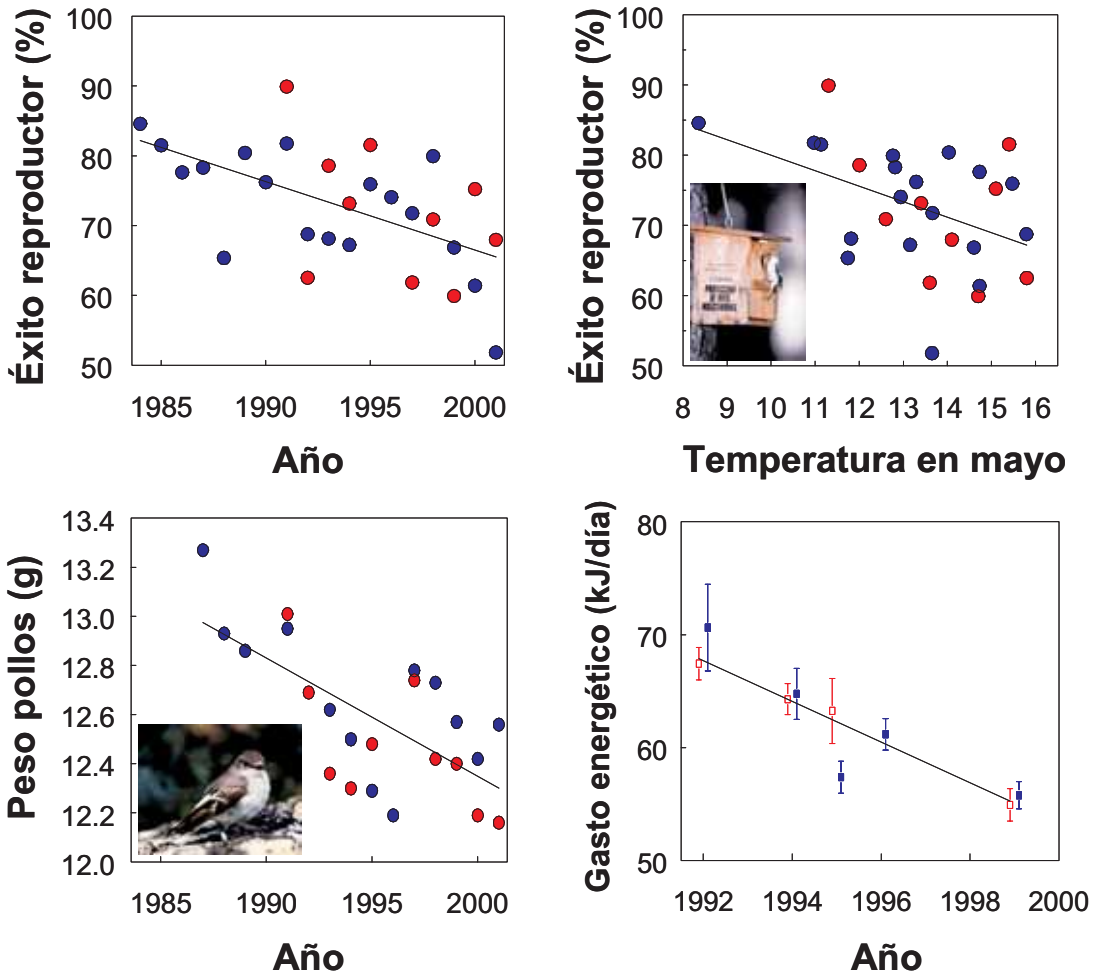


Fig. 6.4. *Cambios temporales a lo largo de más de una década en el éxito reproductor en dos poblaciones de Papamoscas cerrojillo del Sistema central (puntos azules: La Hiruela, Madrid; puntos rojos: Valsaín, Segovia) y en el gasto energético diario de los adultos durante la fase final de la crianza de los pollos (símbolos azules: hembras, símbolos rojos: machos) (de Sanz et al. 2003).*

- Por otro lado existen evidencias de que la precipitación durante la primavera afecta a la condición y crecimiento de los pollos de aves nidícolas (Carbonell *et al*. 2003). A menor precipitación la condición y crecimiento de los pollos de currucas capirotadas (*Sylvia atricapilla*, "de interés especial"), medido por medio de la asimetría fluctuante y crecimiento de las plumas, es peor (Carbonell *et al*. 2003). Esto indica que podemos predecir efectos sobre el crecimiento de estas aves en un escenario de cambio climático.

- En el Cernícalo primilla, un modelo bioclimático indica que el éxito reproductor se ve afectado positivamente por la precipitación. Sin embargo, a pesar de que las precipitaciones han disminuido significativamente desde 1966 en la zona de estudio, un análisis retrospectivo de la evolución del tamaño de varias colonias andaluzas indica que el efecto del cambio climático sobre el éxito reproductor no puede ser responsable del declive histórico de la población (Rodríguez y Bustamante 2003).

6.3.2.2.2. Cambios en morfología, fisiología y conducta de Invertebrados

- Un efecto similar al de la regla de Bergmann, enunciada para vertebrados, se ha observado también en moluscos. En el gasterópodo *Cepaea nemoralis* se ha descrito una correlación directa entre el diámetro de la concha (medida estándar del tamaño) y la altitud en cuatro valles del Pirineo español (Ramos 1981 y sin publicar). Es decir el tamaño aumenta en las poblaciones a mayores altitudes donde la temperatura es menor.

- En algunas ocasiones los resultados experimentales sobre gasterópodos terrestres resultan contradictorios. Así, el consumo de alimento en los juveniles de *Helix pomatia* aumentó en ambiente con elevado CO_2 (Ledergeber *et al*. 1998), mientras que en otro experimento con *Helix aspersa* el consumo no se vio afectado por la concentración de CO_2 (Díaz *et al*. 1998). Es posible que la respuesta diferente entre las dos especies pudiera deberse a diferencias fisiológicas intrínsecas. En todo caso, estos resultados sugieren que no se pueden hacer predicciones basadas en la variación de un único factor (temperatura, humedad o concentración de CO_2), y que es necesario el estudio combinado de los distintos factores ambientales que pueden variar sinérgicamente como consecuencia del cambio climático en condiciones naturales, y tener también en cuenta los factores microclimáticos, historia evolutiva del grupo animal y características fisiológicas de las especies, además de la influencia humana.

- Tanto en condiciones naturales (Potts 1975, Chevallier 1980, 1992) como experimentales (Iglesias *et al*. 1996) se ha observado un gradiente latitudinal en el ciclo de vida de *Helix aspersa*. La longitud del periodo de hibernación disminuye con la latitud, desde siete meses en Escocia a cuatro meses en el noroeste de España. En zonas atlánticas en Galicia la especie tiene hibernación larga sin periodo de estivación y se reproduce durante el verano, mientras que en otra localidad gallega con clima Mediterráneo existe tanto hibernación como estivación y la reproducción tiene lugar en primavera y otoño (Iglesias *et al*. 1996). La reproducción en otoño es típica en todos los gasterópodos Helicidae del área Mediterránea, aunque la supervivencia de los juveniles de otoño es mucho menor por el frío invernal que la de los de primavera. Por otra parte, tanto en *H. aspersa*, como en *H. pomatia* y en *H. texta* parece que el factor determinante de la actividad de la especie en áreas Mediterráneas es la pluviosidad (la salida de la hibernación está relacionada con los periodos lluviosos y la entrada en estivación con el inicio de los periodos secos), mientras que el fotoperíodo podría ser mas importante en altas latitudes. En cualquier caso, esta cline latitudinal está matizada por los factores microclimaticos en que vive la población, y que pueden hacer que se aparte del patrón general.

- La longevidad de los ejemplares de la especie *Margaritifera margaritifera* varía con la latitud. Así, mientras que el promedio de vida de los ejemplares en España es de unos 70 años, la longevidad en las poblaciones Escandinavas y de la península de Kola llega hasta los 200 años (Araujo, comunicación personal). La temperatura del agua puede ser, en este caso, un importante factor.

- La dinámica poblacional de las especies de artrópodos terrestres está en gran parte condicionada por las condiciones ambientales de temperatura y humedad. La expansión observada hacia el norte del límite septentrional de distribución de las especies de insectos debe ser interpretado como la respuesta al incremento de la temperatura media anual. Por otra parte el incremento de temperatura trae como consecuencia una mayor variabilidad en los periodos de precipitación, intensidad de las mismas y tasas de evapotranspiración (Piñol *et al*. 1998). Los cambios significativos que se están produciendo en la cuantía y momento de las precipitaciones pueden llegar a tener repercusiones negativas en la viabilidad de las poblaciones, incrementando el riesgo de extinción (McLaughlin *et al*. 2002). Para comprobar esta hipótesis será necesario llevar a cabo investigaciones que tomen en consideración a varios órdenes de insectos en los que se seleccionen especies cuya distribución y biología sea bien conocida.

- Por otra parte conocemos que existen grupos de insectos claramente heterotermos, capaces de regular su temperatura interna de vuelo, y que muestran actividad en los periodos menos calurosos del día como es el crepúsculo y primeras horas de la noche (Heinrich 1993). Estos grupos poseen una masa muscular muy desarrollada, elevada carga alar y su capacidad de vuelo depende del equilibrio que se establece entre la generación de calor corporal y su pérdida mediante difusión externa hacia la atmósfera circundante. Estos insectos se comportan como endotérmicos durante el vuelo, pudiendo tener capacidad de termorregulación, pero fuera de esta actividad de vuelo son poiquilotermos. Un incremento de temperaturas puede afectar gravemente a estas especies entre las que encontramos lepidópteros como los Sphingidae, e insectos polinizadores como muchos himenópteros Apoidea y coleópteros Scarabaeidae. Muchas de estas especies poseen una distribución muy restringida en Europa occidental o bien son endemismos ibéricos, y que además tienen una baja tasa reproductora (Verdú *et al.* 2004a).

- Los cambios observados en algunos lepidópteros en cuanto al adelanto de su aparición en periodo de vuelo, nos podrían indicar que algunos insectos podrían tener una respuesta de este tipo que les permitiría adaptarse a las nuevas condiciones climatológicas de calentamiento global. No obstante, esta respuesta no se produce de una forma generalizada, y por otra parte los datos de que disponemos son muy escasos y localizados geográficamente. Se necesitarían largas series anuales sobre la abundancia de las poblaciones afectadas y los registros históricos faunísticos que poseemos son escasos y pobres, debido en gran parte a la falta de apoyo que este tipo de estudios ha recibido por parte de la política científica española.

- Los cambios que se puedan producir en la fenología de aparición de adultos en los insectos y periodos de desarrollo larvario podrán tener en un futuro próximo importantes consecuencias en los cambios de abundancias poblacionales como consecuencia del posible desfase que llegue a producirse en la fenología de plantas alimenticias e insectos. En la cuenca mediterránea muchas especies de mariposas efectúan la puesta a finales de la primavera o comienzos del verano y las larvas emergen a principios o mediados del verano entrando en un estado de quietud o estivación que puede prolongarse a lo largo del invierno salvando de este modo los periodos ambientalmente más desfavorables. Un adelanto en el período de emergencia de los adultos provoca un adelanto en el período de puesta y de nacimiento de las larvas, lo cual puede representar un alargamiento crítico del período de estivación con repercusiones fatales sobre la supervivencia de los primeros estadios larvarios (Stefanescu *et al*. 2003).

6.3.2.3. Cambios en distribución geográfica

6.3.2.3.1. Cambios en distribución geográfica latitudinal o altitudinal en Vertebrados

La predicción de desplazamientos hacia el norte o en altitud de las distribuciones de especies afectadas por el cambio climático (hipótesis I) está basada en la capacidad de migración hacia hábitat favorables de los individuos (Root y Schneider 2002). Hay que señalar que esta capacidad difiere entre grupos de vertebrados. Mientras las aves pueden cruzar diversos tipos de barreras mediante el vuelo, los anfibios y reptiles muestran una peor capacidad migratoria, con los mamíferos en una posición intermedia. Además, varios factores humanos restringen esta capacidad, especialmente en Europa. El principal es sin duda la creciente fragmentación de hábitat. Los medios terrestres están interrumpidos por crecientes extensiones de infraestructuras y medios urbanos, mientras los medios fluviales están acotados de forma creciente por embalses. España ha dejado atrás su atraso en cuanto a infraestructuras de transporte y ha adoptado el modelo urbanístico de grandes extensiones de suburbios alejados de los centros urbanos. La fragmentación de hábitat es uno de los precios del desarrollo económico y la adopción de nuevos modelos urbanísticos. España es además el país del mundo con mayor número de embalses por habitante, lo que no parece implicar una disminución en los planes de construcción de nuevos embalses. La tremenda y creciente fragmentación de hábitat naturales resultante hace inviable no ya el desplazamiento geográfico de las distribuciones en función del clima (hipótesis I), sino probablemente tan siquiera el intercambio genético que garantice la viabilidad de muchas poblaciones fragmentadas en un escenario de ausencia de cambio climático (el ejemplo del lince ibérico *Lynx pardina* es paradigmático). En ecosistemas insulares de Canarias las especies no pueden responder de la misma forma que lo hacen muchas de ellas en el continente, moviéndose hacia el norte, sino que su capacidad de respuesta potencial quedaría restringida a cambios de distribución en altitud, y únicamente en aquellas islas elevadas (ejemplo, las islas centrales y occidentales de Canarias: Gran Canaria, Tenerife, La Gomera, La Palma y El Hierro). Este tipo de movimientos estaría mucho más limitado en el caso de las orientales, Lanzarote y Fuerteventura.

Hay ciertas especies que ven aún más mermadas sus posibilidades de reaccionar mediante cambios de distribución. Son las que ya habitan en zonas de alta montaña y las poblaciones insulares. Para ellas no hay literalmente a donde ir. Las barreras determinadas en España por varias cadenas montañosa que transcurren de oeste a este también pueden impedir desplazamientos hacia el norte de distribuciones. También serían más sensibles aquellas especies con fuerte especialización a determinadas condiciones climáticas.

El modelo simplista que predice que las plantas responderán al clima y los animales seguirán a las plantas (hipótesis I) no tiene en cuenta que los animales pueden responder directamente al clima para evitar limitaciones fisiológicas (Dawson 1992) y cambiar de hábitat independientemente de la vegetación. Ello puede implicar cambios en las interacciones bióticas con efectos sobre supervivencia y reproducción.

- A excepción de un río en el norte de Portugal, los ríos de la zona cantábrica constituyen el límite meridional del área de distribución del Salmón atlántico en Europa. La supervivencia durante la fase embrionaria y post-embrionaria (previa a la salida de las graveras) está estrechamente relacionada con la temperatura. Un aumento de 3-4 º C sobre el óptimo para supervivencia resulta en un aumento drástico de la tasa de mortalidad y proporción de individuos deformes no viables (A. G. Nicieza, com. pers.). Lo mismo es aplicable a la lamprea o a la trucha (Ojanguren 2000, Rodríguez-Muñoz 2000). Un aumento continuado o mantenido de la temperatura del agua durante los meses de invierno y primavera podría contribuir al declive de las poblaciones y al desplazamiento hacia el norte de los límites de distribución.

- En líneas generales, y pese a la ausencia de estudios sistemáticos para determinar el efecto del cambio climático sobre las poblaciones de anfibios, la impresión general es que las islas biogeográficas representadas por las montañas (y algunas zonas de pluviometría más alta) del centro y sur de la Península están dejando de ser refugios eficaces para la fauna de distribución más septentrional, y que los endemismos de estas zonas como el Sapo partero ibérico (*Alytes cisternasii*, "de interés especial") y las subespecies meridionales de Sapo partero común (*Alytes obstetricans,* "de interés especial") y Salamandra *Salamandra salamandra* están seriamente amenazados (R. Márquez, com. pers.). Así se han extinguido ya poblaciones locales de salamandra en Sierra de la Demanda y Neila (Burgos, aunque aquí la introducción de salmónidos puede ser un factor alternativo o adicional), Colomerá y El Padul (Sierra Nevada, Granada) y Puerto y Llanos de Zafarralla (Granada) y de Tritón alpino (*Triturus alpestris*, "de interés especial") en Carrales y Pantano del Ebro (Burgos) (Pleguezuelos *et al.* 2002). Se han detectado regresiones poblacionales de salamandra en Sierra de las Nieves (Málaga), Sierra Bermeja y Serranía de Ronda (Málaga) y en la Sierra de Córdoba, de Tritón alpino en Norte de Castilla-León, Cantabria y Álava y de Rana patilarga (*Rana iberica*, "de interés especial") en Peñalara (Sierra de Guadarrama, Madrid) y en Las Villuercas, Guadalupe, Valencia de Álcantara (Extremadura) (Pleguezuelos *et al.* 2002).

- Ha habido observaciones recientes de presencia de especies de baja altitud en hábitat de alta montaña del centro de la Península que previamente eran refugios exclusivos de especies de distribución más septentrional (hipótesis I). Así en la Laguna Grande de Gredos (Ávila) se ha citado Rana común *Rana perezi* solo en décadas recientes, y la Ranita de San Antón (*Hyla arborea*, "de interés especial") se encuentra actualmente en algunos de los lagos de altura del Parque Natural de Somiedo (Asturias) (R. Márquez, com. pers.).

- Entre los años 50 y 80 del siglo pasado se detectó un cambio en la distribución de la Lagartija colilarga (*Psammodromus algirus*, "de interés especial") en un valle del Pirineo (hipótesis I), detectándose su presencia 30 km río arriba del último punto en que se localizó inicialmente (Bauwens *et al.* 1986).

- Hay que mencionar en este contexto a reptiles típicos de hábitat de montaña con distribución muy ligada al clima. El cambio climático provocaría un ascenso en altitud y una desaparición en zonas bajas de estas especies (hipótesis I). Un ejemplo es el Lagarto Verdinegro, especie endémica ibérica que en la región mediterránea está ligada a montañas y en la mitad Sur se encuentra ya en los hábitat más húmedos y frescos disponibles (Marco y Pollo 1993, Brito *et al.* 1996). El cambio climático está amenazando a las poblaciones de Montes de Toledo, Sierra de Guadalupe, Sierra de Monchique, etc., pues ya no pueden subir más y están perdiendo hábitat idóneo a baja altitud, y es probable que ya se haya producido en las últimas décadas la extinción en Sierra Morena. Hay citas muy antiguas del lagarto en la Sierra de Andújar y alguna observación de los años 80, pero en los últimos intensos muestreos no ha vuelto a ser observado en estos lugares. En Andalucía está catalogado como en peligro crítico de extinción, precisamente por estas citas de los años 80 (Marco 2002). En situación similar estaría la Lagartija de Valverde (*Algyroides marchii*, "de interés especial"), la Lagartija de turbera (*Lacerta vivipara*, "de interés especial"), la Lagartija pirenaica (*Lacerta bonnali*, "vulnerable"), la Culebra lisa europea (*Coronella austriaca*, "de interés especial") y *Lacerta monticola*.

- Modelos de distribución GIS extrapolados a aumentos de 2-3ºC hasta 2080 predicen una reducción del área de distribución de la Salamandra rabilarga (*Chioglossa lusitanica*, "de interés especial") en un 20% (Teixeira y Arntzen 2002).

- En la península Ibérica pueden producirse cambios en las distribuciones de aves, dado que la distribución y abundancia de las aves actuales en la Península Ibérica se puede explicar,

junto a otros factores, por variables climáticas (Carrascal y Lobo 2003). Potenciales cambios en el régimen de temperaturas o precipitaciones deben afectar a la distribución de estas especies, pero ningún estudio temporal se ha realizado en la Península para contrastar esta hipótesis.

- En el caso de la Avutarda común (*Otis tarda*, "de interés especial"), el nicho ecológico se modelizó a partir de 23 puntos de ocurrencia en Europa y de doce coberturas climáticas y topográficas (Papes, comunicación personal). La predicción de la distribución actual se intersectó posteriormente con las coberturas SIG de usos del suelo, a fin de retener solamente aquellas áreas más convenientes para la avutarda común. Asimismo, el modelo del nicho ecológico también se proyectó en los dos escenarios de cambio climático y el promedio de los dos se intersectó con la distribución actual, suponiendo cero capacidad de la especie para dispersarse. La Figura 6.5 indica que la parte meridional de la distribución potencial actual de la avutarda desaparecerá con las futuras condiciones climáticas.

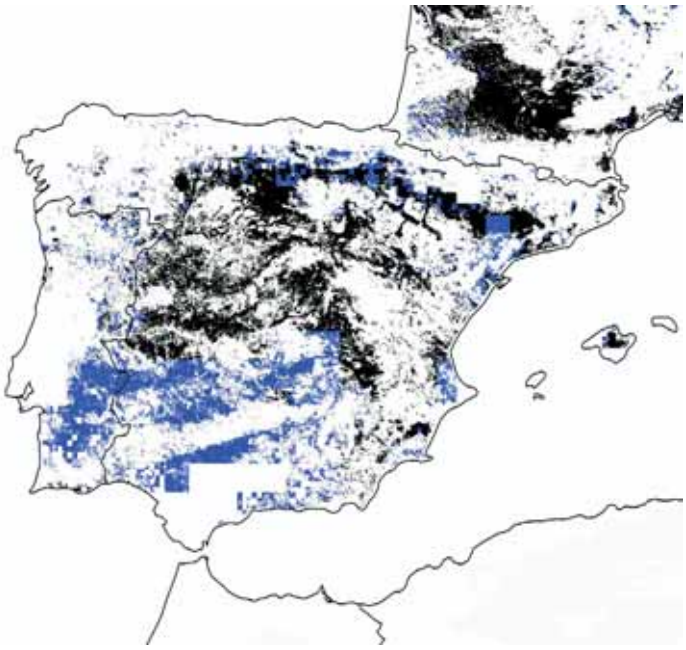


Fig. 6.5. *Modelización de los efectos del cambio climático en la distribución potencial de la Avutarda común (Otis tarda), una especie amenazada. Los tonos negros-grises indican las áreas que reúnen las condiciones adecuadas para la presencia de la especie en la actualidad, mientras que tonos azules indican las áreas a reducirse en el futuro respectivamente.*

- En el caso del Urogallo (*Tetrao urogallus cantabricus*, "vulnerable") en la Cordillera Cantábrica, los lugares de exhibición o cantaderos que se han desocupado recientemente están a menor altitud que los que siguen ocupados por los urogallos (Obeso y Bañuelos 2004).

6.3.2.3.2. Cambios en distribución geográfica latitudinal, altitudinal o zonación en Invertebrados

- Según lo ya mencionado en el apartado 6.2.2, no parece que las comunidades de moluscos terrestres, ni la mayoría de los invertebrados edáficos poco especializados (ej. los ácaros, nematodos, etc.), se vean seriamente afectadas por los efectos directos de los cambios climáticos. El factor más limitante es la humedad (Subías comunicación personal), mientras

que los cambios en temperatura podrían influir a muy largo plazo debido al efecto tampón de los suelos, siempre que la cobertura vegetal se mantenga. Sólo un alteración drástica del ecosistema como la erosión podría tener consecuencias importantes. Un desplazamiento latitudinal y/o altitudinal irreversible de las comunidades vegetales podrían provocar modificaciones en la composición de especies de la malacofauna, y otras comunidades edáficas, aunque está diferirá según se trate de hábitat herbáceos, xerófilos, o bosques de distinta naturaleza.

- En el caso de los ríos, la disminución del caudal y el calentamiento del agua, puede producir una introgresión de la fauna de los tramos medios en los tramos altos, así como fragmentación de los hábitat. En el primer caso, se producirá un desplazamiento de las biocenosis aguas arriba (Hipótesis I) (ver capítulo 3), siempre que otros factores tales como el tipo de sustrato o la velocidad de la corriente no resulten limitantes para la supervivencia de las especies termófilas, al tiempo que podría producir la reducción de las poblaciones de las especies de agua fría y, en algunos casos, su total desaparición. La fragmentación parece ser el caso de los ríos trucheros y salmoneros, en los que se acentuará la disminución, ya evidente, de estas especies de peces. Ello tendrá una repercusión muy negativa sobre las especies altamente amenazadas de grandes bivalvos.

- La altitud, la latitud y la profundidad parecen jugar el mismo papel en la distribución y diversidad de las malacocenosis (gasterópodos y bivalvos) en 43 lagos europeos (Mouthon 1990). Las estaciones con mayor riqueza de especies corresponden a las zonas litorales, sobre todo en lagos situados a baja altitud, y es mayor hacia el sur. Las zonas litorales de lagos de montaña y las zonas profundas de todos los lagos son las más pobres en especies. Esta distribución sugiere que la temperatura (y condiciones climáticas asociadas) es el principal factor asociado con la distribución y abundancia de especies. Es decir que, a menos que la elevación de temperatura, aumento de la sequía, eutrofización por contaminantes o desecación de los acuíferos no provoquen la desaparición de los lagos y lagunas permanentes, o su alteración irreversible, el cambio que se predice podría no afectar, o incluso podría producir un efecto positivo sobre las malacofaunas de agua dulce de los mismos. En última instancia, esto también influirá positivamente a los siguientes eslabones en la cadena trófica. Las especies de moluscos que habitan estos medios pertenecen, sin embargo, a grupos más generalistas y tolerantes, donde los endemismos son muy escasos.

Los datos que se poseen sobre insectos indican que pueden producirse alteraciones en los ecosistemas y la extensión de daños producidos por especies invasoras y de importancia medico-veterinaria y plagas de cultivos.

- El análisis de conjunto del área de distribución en Europa de 35 especies de lepidópteros ropalóceros, puso de manifiesto que el 63% de las mismas había sufrido una expansión hacia latitudes más al norte de su área de distribución, mientras el 6% de ellas se habían expandido hacia el sur y el 3% lo habían hecho en ambos sentidos (Parmesan *et al.* 1999).

- En la década de los 70 del pasado siglo, de un total de 38 especies de ropalóceros no migradores que viven en Gran Bretaña, se encontró que el 47% de las especies habían extendido el área de distribución hacia el norte, mientras que tan sólo el 8% había incrementado su área de distribución hacia el sur (Parmesan *et al.* 1999). La magnitud de ampliación hacia el norte de Europa del área de distribución de algunos ropalóceros se sitúa según las especies entre los 35 y los 240 km, un hecho no atribuible a un proceso simple de expansión de la especie ya que supera significativamente las distancias de los procesos naturales de colonización de cualquiera de los ropalóceros considerados en este estudio (Parmesan *et al.* 1999).

- Al analizar la distribución de 40 especies de ropalóceros (Francia, España, Marruecos, Túnez y Argelia), se observó una regresión en su límite sur de distribución en el 22% de las especies y una expansión de su distribución hacia el sur en el 5%, permaneciendo el resto invariable (Parmesan *et al.* 1999).

- Se ha observado que el límite sur de distribución bien queda estable en la mayoría de las especies estudiadas (aproximadamente el 65%) o bien se observa una pequeña regresión hacia el norte de este límite sur (aproximadamente en el 35%).

- *Heodes tytirus* (Lepidoptera Lycaenidae), una especie cuyo límite sur de distribución se encontraba en Cataluña, ha variado su rango de distribución. Fue una especie abundante en el Montseny (Barcelona) a lo largo del siglo XX, pero desapareció a finales de la década de los 90 por causas no atribuibles a alteración del hábitat. Al mimo tiempo se ha comprobado que en Estonia, donde las citas eran esporádicas a lo largo del pasado siglo, ha establecido áreas permanentes de cría (Parmesan *et al.* 1999).

- Para evaluar asimismo las consecuencias que el cambio climático puede tener en muchas especies endémicas de la península Ibérica, debemos considerar que nos encontramos en un periodo interglaciar que se inició hace unos 10.000 años, y durante el cual las bandas de vegetación y los insectos a ellas asociados se fueron desplazando hacia el norte. Es importante tener en cuenta este proceso para entender que en muchas especies de insectos, las poblaciones aisladas en cimas de montaña y por tanto sin intercambio genético, son el resultado de un proceso de colonización previo en periodos fríos, cuando existía continuidad poblacional, y hoy día constituyen auténticos relictos glaciares testigos de una historia pasada. En estos casos, si bien en ocasiones no han dado lugar a nuevas especies durante la historia reciente, sí han generado numerosas diferenciaciones subespecíficas, como ha ocurrido por ejemplo con la mariposa *Parnassius apollo* (Lepidoptera Papilionidae), cuyas poblaciones se encuentran localizadas en las cotas más elevadas de las cumbres de las diversas cadenas montañosas españolas. Especies como la mencionada no tienen posibilidad de experimentar migraciones latitudinales como consecuencia de la disposición transversal de las cadenas montañosas, viéndose constreñidas a áreas reducidas y con la única posibilidad de emigrar hacia cotas de mayor altitud en el supuesto de existir esta posibilidad.

- En otros casos, la consecuencia del periodo glaciar fue una drástica reducción de las áreas de distribución geográfica, de modo que muchas especies de insectos quedaron confinadas a auténticos refugios pleistocénicos ibéricos, no habiéndose producido posteriormente la recuperación de su área primitiva de distribución. De este modo, especies consideradas durante mucho tiempo como endemismos de un área determinada, son el último testigo de una población abundante y ampliamente distribuida en un periodo anterior a la última glaciación, constituyendo el área de distribución geográfica que actualmente ocupan su último refugio (Elias 1994). Así en España encontramos especies de insectos que son auténticos testigos de una historia pasada y que actualmente se encuentran confinadas a enclaves de países mediterráneos del sur de Europa como *Aphodius bonvouloiri* (Coleoptera Aphodiidae), especie coprófaga muy abundante en los pastizales de las montañas del Sistema Central y Cordillera Cantábrica y que sabemos que vivió en Gran Bretaña durante los periodos cálidos a mediados de la última glaciación, donde se encontraba asociada a otras especies de insectos propios de áreas más templadas (Coope y Agnus 1975). Asimismo durante el último periodo interglaciar, muchas especies de coleópteros escarabeidos coprófagos ahora consideradas como propias de las regiones mediterráneas del sur de Europa como *Onthophagus furcatus* o *Euoniticellus fulvus* (Coleoptera Sacarabaeinae) se encontraban en Gran Bretaña en el periodo preglaciar (Coope 1990). Otros muchos ejemplos se han encontrado entre los coleópteros como consecuencia de su mayor facilidad para dejar restos subfósiles, y de este modo sabemos que algunos géneros

de carábidos cuya área de distribución actual abarca parte de la Península Ibérica y del sur de Francia, como por ejemplo *Bembidion*, debieron estar presentes en gran parte de Europa antes del último periodo glaciar (Coope 1990). Es de esperar que todos estos grupos de insectos se vean gravemente afectados por el calentamiento global.

- Si bien las especies de insectos migradoras podrán responder en gran medida al cambio climático mediante la variación y adecuación de sus periodos anuales de desplazamiento de acuerdo con las nuevas condiciones ambientales, la mayor parte de los artrópodos son sedentarios, desplazándose en radios de pequeño rango geográfico, como mucho de algunos centenares de metros. Para las especies sedentarias la respuesta al cambio climático va a suponer una variación en los límites norte y sur de sus áreas de distribución. Este hecho conllevará inevitablemente cambios en sus niveles poblacionales, produciéndose variaciones en la razón entre extinciones y colonizaciones al sur y norte del rango de distribución de las especies.

6.3.2.4. Cambios en interacciones ecológicas

6.3.2.4.1. Cambios en interacciones ecológicas en Vertebrados

Hay dos posibles efectos del cambio climático sobre poblaciones de vertebrados que están preocupando cada vez más a los especialistas. Uno es la posibilidad de que condiciones climáticas más benignas favorezcan desplazamientos hacia nuestras latitudes de vectores de parásitos y de los propios parásitos (Rogers y Randolph 2000, Patz *et al.* 2000). La interacción entre los efectos de cambios en temperatura y precipitación es crucial en este sentido. Las condiciones de aumentos de temperatura acompañados de reducción en precipitaciones no necesariamente benefician a las parasitosis. Así p. ej. la incidencia de la epidemia hemorrágica vírica de los conejos parece ser menos virulenta, tanto a escala local como regional e ibérica, en las zonas secas que en las húmedas, tal vez por que hay más vectores en condiciones más húmedas (M. Delibes, com. pers.). En relación con este problema, es también posible que la virulencia de parásitos ya existentes se vea favorecida por inmunodepresión de los hospedadores motivada por cambios ambientales. El declive global de anfibios que se ha detectado de forma espectacular en las últimas décadas, parece estar asociado entre otros factores a infecciones de huevos, larvas o adultos por parásitos, especialmente hongos (Blaustein y Kiesecker 2002). En algunos casos, ello se puede deber a inmunodepresión en los hospedadores. Hasta que punto las condiciones climáticas favorecen la expansión de los parásitos (hipótesis II) está por ver.

El otro problema asociado a cambio climático puede ser la expansión de especies introducidas debida a condiciones climáticas más favorables. Por ejemplo, la introducción de especies de peces foráneos en nuestros ríos para la pesca deportiva es un problema para la conservación de nuestros peces autóctonos sin tener en cuenta el cambio climático (Doadrio 2001, Elvira y Almodóvar 2001). Si dicha expansión se viera además favorecida por dicho cambio, el problema sería agudo (Elvira 2001). Se podrían dar muchos ejemplos de los efectos dramáticos sobre la biodiversidad de la introducción de especies (galápagos, cotorras, etc.). Sin embargo, otras especies introducidas se podrían ver perjudicadas por previsibles cambios climáticos (p. ej. el visón americano). La introducción de especies o variedades exóticas favorecida por el cambio climático podría conducir a hibridación y pérdida de diversidad genética endémica de la Península. En Canarias este tipo de especies, sobre todo cotorras, se encuentra en plena expansión ayudado por el comercio de éstas y las prácticas irresponsables de los núcleos zoológicos ("escapes") para explotación turística, nada controladas por parte de las Instituciones públicas. Ello conlleva que la fauna de los núcleos urbanos haya sufrido una gran transformación en los últimos 20 años. No obstante, hay que considerar que en Canarias existe un bosque de gran interés científico, como es la laurisilva, de carácter subtropical, y que ocupó

la cuenca Mediterránea en el Terciario. Este carácter subtropical podría resultar óptimo para ciertas especies de cotorras que se están introduciendo, y no se ha de olvidar que en este bosque relíctico han evolucionado dos especies de palomas endémicas, como son la Turqué y la Rabiche (*Columba junoniae*, "sensible a la alteración del hábitat") (Martín *et al.* 2000).

- Se ha detectado un desplome de poblaciones de Sapo partero común por infecciones por hongos con posible implicación de cambios ambientales debidos al clima (Bosch *et al.* 2001).

- Sabemos que ante un aumento de la temperatura durante la primavera en la Sierra de Ayllón (Madrid), el número de nidos de Papamoscas cerrojillo que se ven atacados por ectoparásitos se ve incrementado (Merino y Potti 1996). Es decir, ante un escenario de incremento de temperatura y/o reducción de precipitación, es esperable que las aves nidícolas de nuestras latitudes sufran una reducción drástica de su éxito reproductor por la infestación de sus nidos por ectoparásitos.

6.3.2.4.2. Cambios en interacciones ecológicas en Invertebrados

Las fluctuaciones en temperatura, humedad y cambios en el uso del suelo afectan de forma directa a la fauna edáfica a largo plazo. Su suerte está, con frecuencia, más condicionada a cambios indirectos del clima y al incremento de CO_2 y su efecto sobre la vegetación (en las especies herbívoras), disponibilidad de nutrientes y sobre los propios suelos. Parece que estos efectos directos e indirectos podrían tener un efecto en cascada sobre los organismos herbívoros y descomponedores. La falta de una buena taxonomía dificulta la investigación de estos procesos por lo que las investigaciones se centran en modelos experimentales. Una hipótesis plantea que hay una considerable redundancia de especies dentro de cada grupo funcional, aunque los cambios en la diversidad de grupos funcionales pueden tener repercusiones importantes en los procesos de los ecosistemas. Dada la gran diversidad y adaptabilidad de los organismos del suelo, estos conceptos ecológicos sugieren que la redundancia y/o sustitución son frecuentes en los sistemas edáficos. Una posible consecuencia es que el impacto de los cambios ambientales puede ser menor que el esperado de la extrapolación de los resultados de estudios sobre organismos aislados. Por el contrario los impactos mayores, que modifican los umbrales de biodiversidad, con ganancia o pérdida de un grupo funcional, como las lombrices de tierra o termitas, pueden tener efectos significativos en los procesos edáficos. Mientras que estas alteraciones son más probables por cambios en el uso del suelo y contaminación, que dan como resultado desplazamientos de la vegetación, la capacidad diferencial de los organismos del suelo para migrar podría provocar cambios en la composición funcional de las comunidades edáficas (Ingram y Wall 1998, Swift *et al.* 1998).

- Los escenarios climáticos que, como el esperado para España, incluyen veranos más cálidos y secos seguidos por inviernos cálidos y con mayor precipitación crearían el ambiente ideal para una reducción en el carbono disponible en la parte más superficial de los suelos. Dada la relación directa entre el carbono orgánico y la estabilidad estructural del suelo, la probabilidad de erosión aumenta cuando el carbono orgánico disminuye produciendo el consiguiente impacto y empobrecimiento faunístico. Ello tendría mayor efecto sobre los ecosistemas mediterráneos.

- Por otra parte las alteraciones en el periodo anual de actividad no afectan a todos los grupos y especies de insectos por igual, por lo que se puede producir otro importante desfase en cuanto a la necesaria sincronización de periodos de actividad de insectos huésped e insectos parasitoides (Hassell *et al.* 1993).

- Asimismo el calentamiento global permite la expansión en altitud de especies de insectos fitófagos que constituyen plagas, pudiéndose ver afectadas nuevas especies vegetales y

formaciones forestales relictas en el sur peninsular ibérico. Un ejemplo lo encontramos en la penetración en altitud en Sierra Nevada de *Thaumetopoea pytiocampa*, lepidóptero que llega a producir cuantiosos daños en *Pinus nigra*, *P. halepensis* y que afecta gravemente a *P. sylvestris* en las poblaciones situadas a menor altitud. En Sierra Nevada y Sierra de Baza encontramos las poblaciones mas meridionales de *Pinus sylvestris* consideradas como la subespecie *P.* sylvestris *nevadensis*. El efecto del cambio climático global provoca que este endemismo ibérico pueda verse afectado muy gravemente como consecuencia de la expansión en altitud de *T.pytiocampa* dado que el incremento de los niveles de población de orugas de esta especie produce una elevada defoliación que reduce la tasa de crecimiento de *P. sylvestris* hasta un 50%, con la consiguiente reducción de producción de semillas y tasa de renovación (Hódar *et al.* 2003).

- Por otra parte en grupos como los pulgones áfidos, el incremento de la temperatura media anual puede provocar el adelanto de los periodos de emigración y la aparición temprana de plagas, en un momento en los que los cultivos son más vulnerables (EXAMINE, Victoria Seco com. pers.).

6.3.2.5. Cambios en extensión y calidad de hábitat potenciales (degradación, pérdida, fragmentación, colonización por especies invasoras)

6.3.2.5.1. Cambios en extensión y calidad de hábitat potenciales para Vertebrados

El cambio climático puede determinar cambios en la disponibilidad de hábitat favorables para muchas especies de vertebrados. Por ejemplo es previsible que las sequías y mayores duraciones de períodos de intenso calor determinen una más rápida desecación de charcas, humedales y cursos temporales de agua en la primavera. Para anfibios o peces, ello puede conllevar la extinción de poblaciones o un mayor aislamiento genético (Márquez y Lizana 2002). También algunos mamíferos con buena parte de su distribución en Iberia como los musgaños del género *Neomys*, la rata de agua *Arvicola sapidus* o el Topillo de Cabrera *Microtus cabrerae*, pueden verse seriamente perjudicados por este problema. El Topillo de Cabrera, endémico de la Península, depende de pequeñas masas o cursos de agua donde no compite tanto con la rata de agua, por lo que sus poblaciones están muy fragmentadas y son vulnerables a sequías prolongadas (M. Delibes, com. pers.).

Los incendios forestales también conllevan la perdida de hábitat forestales, así como la desecación y colmatación de charcas y puntos de agua. La fauna forestal de vertebrados puede ver aun más fragmentados sus hábitat y los anfibios y peces pueden ver todavía más disminuidos sus poblaciones debido a una mayor incidencia de incendios (ver capítulo 12) debida al cambio climático.

Las altas temperaturas pueden conllevar proliferaciones de plantas acuáticas como, por ejemplo, el helecho tropical del género *Azolla* recientemente detectado en Doñana (García Murillo, com. pers.), que impliquen anoxia en lagunas y cursos de agua, con efectos perniciosos para peces de agua dulce. Los impactos de estos cambios (hipótesis II) están por explorar en territorio español. Las altas temperaturas provocarían también en ecosistemas acuáticos un aumento de la concentración de nutrientes con mayor riesgo de eutrofización (hipoxia, proliferación de algas y bacterias tóxicas) y también aumento de concentración de mucho tipos de contaminantes poco volátiles (los muy volátiles podrían ser menos solubles a mayor temperatura).

El previsto aumento del nivel del mar puede afectar gravemente a hábitat costeros. En áreas sensibles para especies de vertebrados como el P.N. de Doñana p. ej., un aumento de la salinidad podría tener efectos graves para muchas especies.

- Se ha detectado una perdida de viabilidad de huevos de tres especies de anfibios (Sapo común *Bufo bufo*, Sapo de espuelas *Pelobates cultripes* y Rana común *Rana perezi*, las dos últimas "de interés especial") en España central debida a niveles naturales de radiación UVB (Lizana y Pedraza 1998, Marco y Lizana 2002, Marco *et al.* 2002). La incidencia de estas radiaciones puede estar relacionada con el clima si la disminución de precipitaciones en primavera reduce el nivel de agua en charcas y cursos de agua, suponiendo que los huevos de anfibios estarán más expuestos a niveles peligrosos de radiación UVB si el volumen de agua protector es menor. Este efecto sería menos importante para anfibios cuyas puestas en cualquier caso se encuentren en la superficie. Así en la Rana Bermeja las puestas suelen disponerse en las zonas de orilla, quizás para aprovechar la radiación térmica y beneficiarse de un desarrollo más rápido, de forma que aunque haya un volumen de agua importante, ponen en zonas muy someras. Aparentemente evitan charcas profundas o las zonas más profundas de éstas, y la mayor concentración de puestas siempre aparece en zonas someras, con grandes masas de huevos "aflorando" en superficie. El Sapo común, cuando cría en embalses, lagos de montaña o lagunas, suele hacerlo en orillas o en interior, pero en este caso las puestas suelen quedar en las capas más superficiales (A. G. Nicieza, com. pers.).

- En Canarias existe un grave problema con la población del Pinzón Azul que habita en Gran Canaria (*Fringilla teydea polatzeki*, "en peligro de extinción"), ya que únicamente está presente en los montes de Pajonales, Ojeda e Inagua, y cuya población se ha estimado en unos 200 ejemplares (Rodríguez y Moreno 1996). Estos pinares constituyen una unidad geográfica de *Pinus canariensis*, de unas 3.700 Ha, ubicada en el Oeste de la Isla. Un incendio de grandes dimensiones no acabaría con este pinar, ya que el pino canario resiste bastante bien el fuego, probablemente como resultado de su evolución en terrenos volcánicos, pero sin duda el hábitat se vería fuertemente empobrecido, lo cual redundaría negativamente en la supervivencia de esta rara subespecie endémica.

6.3.2.5.2. Cambios en extensión y calidad de hábitat potenciales para Invertebrados

La alteración del hábitat va a ser uno de los factores determinantes de la desaparición de especies o bien de su desplazamiento. Muchas especies de insectos con fases larvarias acuáticas como Odonatos, Tricópteros, Plecópteros, Efemerópteros, Coleópteros, Hemípteros entre otros, se verán afectados por la desaparición o reducción de charcas, zonas húmedas y cursos de agua provocada por el incremento de los periodos de sequía y de las temperaturas medias anuales.

Asimismo dada la relación directa entre muchas especies de invertebrados y la vegetación, la desaparición de especies de plantas o bien su cambio de área de distribución afectará gravemente a muchas especies de invertebrados.

- En la región del Alto Tajo, se ha descrito una área bioclimática diferenciada de las circundantes con elementos de flora y fauna de invertebrados (moluscos, carábidos, isópodos) de carácter centroeuropeo (Ramos 1985, Serrano 1984). Se trata de un área donde se dan condiciones de marginalidad, y los fenómenos evolutivos asociados correspondientes, en varias especies de moluscos (ej. *Cepaea nemoralis*, *C. hortensis*) (Ramos y Aparicio 1984). Esta área podría desaparecer, por la pérdida de la masa forestal de caducifolios asociada, o bien sufrir un desplazamiento hacia el norte. La última hipótesis parece menos probable por la influencia de los factores microclimáticos, que desaparecerían hacia la zona ya desertizada de la Depresión del Ebro.

Uno de los efectos del cambio climático, especialmente en el área mediterránea es el aumento del riesgo de incendios (ver capítulo 11). Los efectos del fuego se han estudiado en

comunidades de moluscos en la región mediterránea. Los resultados muestran que las comunidades parecen ser altamente resistentes al fuego, así como a otras alteraciones antrópicas, siempre que la alteración no se mantenga durante varios años y que haya tiempo suficiente entre dos alteraciones consecutivas para recuperarse (ver revisión en Kiss *et al.* 2004). Los patrones de respuesta ante el fuego parecen ser multifactoriales. La composición de las actuales comunidades de moluscos terrestres no es sólo el resultado de una larga historia de fuegos recurrentes desde el Neolítico, sino también de otras alteraciones antrópicas, de cambios en el paisaje durante siglos, de la estructura del hábitat anterior al incendio, así como de la influencia de un gradiente biogeográfico (Kiss *et al.* 2004). Hay que mencionar que la familia Helicidae (la más numerosa en especies) ha sufrido una especial diversificación en la cuenca Mediterránea. Es posible que el patrón de respuesta obtenido sea debido a la existencia de refugios crípticos en las áreas quemadas, lo que permitiría la supervivencia y conservación de la malacofauna tras sucesivos episodios de fuego. Esta hipótesis se vería reforzada por el hecho de que, tras los episodios de fuego, las malacofaunas se recuperan de tal forma que incluso se mantiene la proporción de sus elementos centroeuropeos en las poblaciones más distantes al mar Mediterráneo. Este patrón es similar al observado en otros componentes de la fauna edáfica, como es el caso de los ácaros Oribátidos (Subías, comunicación personal). Tras 15-20 años del incendio se observó una recuperación casi completa en la comunidad de oribátidos, probablemente debido a la existencia de microclimas o áreas refugio que han conservado los elementos faunísticos permitiéndoles la recolonización.

Un ecosistema, singular lo constituyen las fuentes, manantiales, surgencias, regatos y pequeños arroyos. Son hábitat con aguas frescas, bien oxigenadas, de corriente continua a lo largo de todo el año y de flujo no muy intenso. Debido al carácter montañoso de la península Ibérica**,** el número y diversidad de estos hábitat es muy elevado. Son ricos en fauna de invertebrados y en endemismos, ya que están con frecuencia aislados, o sólo comunicados por las aguas freáticas que los alimentan. Se trata, por tanto, de hábitat muy frágiles, fragmentados y sensibles, tanto a procesos de desecación naturales como a la actividad humana ya sea directa o indirecta. La acumulación de residuos, el vertido de elementos contaminantes y su alteración (por actividades que causan su desecación, o bajadas en el nivel freático) son la causa más común de extinción de las poblaciones de invertebrados que las habitan. La escasez de agua como consecuencia de largas sequías estivales y subida de las temperaturas medias anuales, que se prevén en el área Mediterránea española, agravará el problema, bien por actuaciones sobre los acuíferos, como por una mayor intervención humana con la consiguiente desaparición irreversible de estos hábitat.

- La fauna de estos ecosistemas está poco explorada. Los datos sobre la familia Hydrobiidae de moluscos de agua dulce indican que la mayoría de las especies europeas se encuentran en el área circunmediterránea, en torno a tres centros de evolución: penínsulas Balcánica, Itálica e Ibérica. En la península Ibérica se están describiendo numerosos géneros y especies nuevas (Ramos *et al*. 2000, Arconada y Ramos 2001, 2002, 2003). Aproximadamente un 90% de las especies son endémicas debido, probablemente, a procesos antiguos de aislamiento geográfico y a su bajo poder de dispersión. El estudio sistemático de los moluscos hidróbidos, que se lleva a cabo en los 10 últimos años, constata ya la desaparición de algunas poblaciones y especies por desecación de los hábitat, incluso antes de su descripción (Arconada y Ramos,2003, en prensa).

Las especies invasoras constituyen un elemento importante del cambio global y una gran amenaza para la biodiversidad. Se conocen tres especies de moluscos dulceacuícolas invasoras en España: el gasterópodo *Potamopyrgus antipodarum* (orgiginario de Australia), y los bivalvos Corbicula *fluminea* y *Dreissena polymorpha* oriundos de Asia y el Mar Caspio, respectivamente. Las dos últimas tienen un enorme potencial invasor (basado en estrategias reproductoras y elevada tolerancia ambiental), tanto en Europa como en América, con enorme impacto negativo, no sólo sobre la fauna nativa, sino también sobre los ecosistemas fluviales

que colonizan, y tienen severas repercusiones en distintos sectores económicos (construcción, tomas de agua de las centrales hidroeléctricas, térmicas y nucleares, etc). Estos bivalvos invasores provocan cambios rápidos en la comunidad bentónica: desplazan a las especies nativas de moluscos, producen un aumento en el recubrimiento orgánico del sustrato *(macrofouling*) y favorecen la presencia de oligoquetos y sanguijuelas (Darrigran 2002) *Corbicula fluminea* ha invadido ya los ríos de la vertiente atlántica peninsular (Araujo *et al.* 1993 y Jiménez *et al.* comunicación personal) y se ha citado recientemente en el Ebro (López y Altaba 1997), río que ha registrado recientemente la primera invasión de *Dreissena polymorpha* en España. Las consecuencias de esta última serán aún más graves al tratarse de un bivalvo con biso, lo que produce grandes aglomerados de ejemplares, y tener larvas planctónicas, lo que favorece la dispersión y la hace extremadamente agresiva. El trasvase de agua del Ebro a los ríos levantinos produciría, sin duda, una invasión de los mismos. De acuerdo con los resultados de Daufresne *et al.* (2004 y com. pers.) las tres especies serán favorecidas por un aumento en la temperatura del agua en los ríos, consecuencia del calentamiento global. De hecho, entre los moluscos, que es el grupo que resulta más beneficiado, las dos especies que han aumentado más sus densidades en el periodo 1979-1999 fueron las de *Potamopyrgus* y *Corbicula.*

6.3.2.6. Interacción entre cambio climático, vegetación, herbívoros, manejo humano, y biodiversidad en ecosistemas continentales

El mantenimiento de la biodiversidad pasa necesariamente por el mantenimiento de los hábitat. Los cambios en los hábitat derivados de la actividad humana se reconocen como la principal causa de extinción de especies. El cambio climático puede afectar directamente a los hábitat para la fauna al afectar a la vegetación, pero es importante destacar cómo la actividad de los herbívoros, agravada por el manejo humano, puede acelerar ciertos procesos.

- Dehesas y bosques mediterráneos: El uso principal de estas áreas ha sido la ganadería extensiva, para lo cual se ha tendido a eliminar el estrato arbustivo. Las dehesas sin matorral son insostenibles a largo plazo debido a la falta de regeneración natural del arbolado. Las principales causas de mortalidad de las plántulas son la sequía del verano y el impacto de los herbívoros (Pulido 1999). El aumento de la temperatura y/o la reducción de las precipitaciones produce un agostamiento temprano de la vegetación herbácea y lleva asociado mayor impacto de los herbívoros sobre las plantas leñosas (Rodríguez-Berrocal 1993). Si no se aumentan las áreas de bosque y matorral respecto a las dehesas, el cambio climático puede producir menor regeneración del arbolado y mayores impactos de los herbívoros sobre las áreas ocupadas por vegetación leñosa. Si no se interviene, el proceso puede auto-reforzarse hacia la desertización. El cambio de uso desde la ganadería doméstica hacia los ungulados salvajes de interés cinegético puede favorecer manejos hacia aumento de la superficie con leñosas, con efectos positivos en la biodiversidad (Carranza 1999, 2001).

La progresiva falta de agua superficial, por la disminución de las precipitaciones y aumento de las temperaturas, ha influido en el cambio en los usos tradicionales de los humedales y la sobreexplotación de los acuíferos. Como consecuencia se produce una disminución del nivel freático de las aguas que los alimentan, con la consiguiente salinización de las mismas. A esta alteración hay que añadir la desecación y contaminación de muchas de las zonas palustres españolas por el enriquecimiento en nutrientes y materia orgánica procedentes de cultivos próximos (por escorrentía), ganadería extensiva y vertidos industriales. Todo ello hace que el grado de eutrofia del humedal aumente, y que se produzca una reducción de la diversidad y una homogenización de la flora y fauna. Además de este tipo de agresiones, es preciso considerar otras que han surgido en tiempos recientes, tales como el uso de humedales costeros como balsas de cultivo de especies de interés económico, o la introducción de

especies exóticas como el cangrejo rojo americano *Procambarus clarki*. Esta especie, extremadamente voraz y agresiva, ha proliferado en la actualidad de tal manera, que constituye una verdadera plaga y una gran amenaza para un buen número de macrófitos. Además, junto con la afanomicosis que portaban los ejemplares introducidos, ha destruido y/o desplazado a las poblaciones de la única especie autóctona de cangrejo de río, *Austrapotamobius pallipes* que ha quedado refugiado en los cursos altos más fríos de las cuencas donde no puede penetrar *P. clarki*. Aunque las poblaciones de *A. pallipes* parecen estar recuperándose en la actualidad, un aumento en la temperatura del agua podría favorecer a la especie invasora permitiéndola la expansión de su distribución, lo que representaría un claro peligro para la especie nativa por competencia. *A. pallipes* está protegida por el Convenio de Berna (Anexo II), Directiva Hábitat (Anexo V), UICN (vulnerable). El cangrejo de río no esta incluida en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas, aunque si está protegido en varios catálogos autonómicos.

6.3.2.7. Conclusiones sobre cambios detectados

Ambas hipótesis planteadas sobre escenarios futuros se cumplen en algunos casos, mientras son poco realistas en otros. El desplazamiento de distribuciones afectaría principalmente a especies con buena capacidad de dispersión (aves, ciertos insectos) mientras parece poco viable en otras (anfibios, peces y la mayoría de los invertebrados). Los nuevos retos ecológicos a los que se enfrenten las primeras en sus nuevas áreas de distribución pueden impedir la colonización. La alteración de las interacciones ecológicas puede estar ya afectando a muchas poblaciones desincronizadas con respecto a sus recursos tróficos debidos a cambios fenológicos, aunque solo se han confirmado en algunos casos. Ni el desplazamiento de áreas de distribución (hipótesis I) ni la adaptación rápida a nuevas condiciones ecológicas (hipótesis II) parecen soluciones viables para la mayoría de las especies estudiadas.

En cuanto a proyecciones futuras, no se ha realizado ningún estudio serio sobre este tema en España. No es fácil modelizar las distribuciones de animales únicamente en base a datos climáticos dada la complejidad de sus interacciones ecológicas con la vegetación y con otras especies de animales y de sus patrones de uso del hábitat para protección y reproducción. Los trabajos realizados hasta la fecha fuera de España muestran un panorama preocupante sobre posibles impactos. En el estado actual de conocimiento sobre poblaciones españolas, se puede afirmar que una continuación de ciertos patrones detectados hasta la fecha daría al traste con una buena parte de nuestra biodiversidad animal durante el presente siglo.

6.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Entre las zonas más vulnerables a efectos del cambio climático podrían incluirse zonas costeras, humedales, cursos de agua permanentes que pasarán a estacionales y estacionales que tendrán un caudal más irregular o incluso desaparecerán, zonas de alta montaña y pastizales húmedos. La vulnerabilidad es máxima para hábitat específicos (sobre todo de montaña) totalmente aislados que albergan fauna endémica que no tiene capacidad de migrar o dónde no existe la posibilidad de crear corredores naturales o no hay lugares hacia donde migrar. Con el cambio climático podrían desaparecer a corto plazo poblaciones importantes y a medio plazo la totalidad de sus hábitat disponibles. En la Península tenemos varios ejemplos, especialmente en zonas de montaña del Sur y Centro. Como reptiles vulnerables hay que mencionar a *Algyroides marchii, Lacerta monticola cyreni*, *Podarcis carbonelli*, *Lacerta schreiberi*, *Salamandra salamandra longirostris* (subespecie de montañas del Sur de Andalucía). Entre los invertebrados, los moluscos hidróbidos, que habitan pozos, fuentes, manantiales y surgencias de agua son un claro ejemplo de la desaparición, ya real, de algunas poblaciones e incluso de especies, antes de su descripción (obs. pers).

6.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

Hay varios tipos de medidas de adaptación que se pueden tomar en caso de cambio climático para diluir o mitigar sus efectos en cuanto a la biodiversidad de vertebrados e invertebrados continentales.

6.5.1. Diseño de las reservas y parques naturales y conexión de hábitat

El diseño de reservas y parques naturales debería incorporar la posibilidad de migración y cambios de distribución mediante la inclusión de corredores biológicos entre ellas.

6.5.2. Gradientes latitudinales y altitudinales en la red de áreas protegidas

La red de áreas protegidas debería incorporar gradientes latitudinales y altitudinales que permitieran proteger a poblaciones con distribuciones geográficas en vías de desplazamiento geográfico debido al cambio climático. Deben considerarse las zonas de mayor altitud en los límites de distribución de las especies objeto de conservación (endemismos, especies raras, amenazadas y en peligro de extinción).

La conservación de la biodiversidad debe prestar atención no sólo a las áreas protegidas, sino de modo muy especial a la promoción con carácter general de usos del territorio compatibles con la conservación y con capacidad de contrarrestar efectos del cambio climático.

6.5.3. Diversidad genética y conservación

Otra consideración es que se debería primar al máximo la diversidad genética en poblaciones afectadas, pues solo ella puede asegurar adaptación al cambio climático. Es importante apoyar la investigación en este campo. La hibridación con especies foráneas favorecidas por cambios en el clima puede eliminar variedades genéticas endémicas de nuestro país.

6.5.4. Diversidad genética y uso de especies para fines deportivos y similares

Otras posibles medidas de adaptación al cambio climático tomadas sin fines conservacionistas pueden agravar aún más la situación de poblaciones de vertebrados y artrópodos. La pérdida de ciertas especies necesarias para fines de control de otras poblaciones o con fines deportivos puede determinar la introducción de especies foráneas, lo que puede tener efectos colaterales perniciosos derivados de la competencia con o depredación sobre especies amenazadas de vertebrados. Debe controlarse bien la introducción de agentes de control biológico en plagas de artrópodos. La prevención de plagas nuevas o más virulentas debidas al cambio climático puede determinar el uso de más plaguicidas con el consiguiente impacto sobre la fauna acompañante e incremento de tóxicos en el medio.

La fragmentación y ciertos manejos de las poblaciones de ciervos provocan reducción de diversidad alélica y aumento del grado de homocigosis (Martínez *et al.* 2002). Para estos casos se dispone de recomendaciones para paliar los efectos (Carranza y Martínez 2002).

6.5.5. Demandas hídricas, persistencia de especies y conflictos por el recurso

El aumento de la demanda de agua para usos humanos debido a aumentos de temperatura y en un contexto posible de sequías prolongadas, determinará posiblemente el aumento de las

soluciones tecnológicas que no tengan en cuenta los impactos sobre la biodiversidad de especies de vertebrados e invertebrados que dependen de cursos permanentes de agua (presas, canales, acueductos, etc.). La comunicación de cursos de agua con faunas diversas de peces mediante canalizaciones, ha afectado dramáticamente a poblaciones de especies autóctonas de peces fluviales (Torralba y Oliva 1997, Elvira 2001, Elvira y Almódovar 2001) y con toda seguridad a poblaciones de invertebrados acuáticos. La alteración de la estructura de los cauces fluviales (construcción de presas y embalses) produce una alteración de los regímenes térmicos e hidrográficos, que resulta por sí misma en cambios de comunidades enteras (Power *et al*. 1996). Estos efectos pueden verse amplificados o contrarrestados (por ejemplo, cuando se pasa de una comunidad de aguas templadas o cálidas a una de aguas frías como resultado de la construcción de un embalse aguas arriba) por tendencias de calentamiento global.

La sobreexplotación de los acuíferos por la escasez de recursos hídricos provocará desecación permanente de fuentes y manantiales, con la consiguiente pérdida de las especies y comunidades que en ellos viven. Asimismo, los humedales, en especial los ecosistemas palustres interiores de la región mediterránea, que ocupan principalmente las cuencas sedimentarias, pueden sufrir un serio impacto. Cabe pensar que se trate de abastecer un humedal con aguas procedentes de cuencas diferentes o de características físico-químicas distintas, con el fin de mantener más o menos estables sus niveles al servicio de la comunidad ornítica, o de su uso como recurso hidráulico. Estas actuaciones pueden causar alteraciones al ecosistema, en muchos casos irreversibles. El aporte artificial de aguas puede inducir cambios en el medio que impidan el normal desarrollo de la biota característica del humedal afectado, o incluso introducir especies que desplacen a las autóctonas, con los consiguientes cambios en la biocenosis original. Un claro ejemplo de ello es el P.N de Las Tablas de Daimiel, que tras su desecación reciben agua de otra cuenca (ver capítulo de “Ecosistemas acuícolas”). Tras este episodio, varios muestreos han constatado que las especies de moluscos allí citadas han desaparecido (Araujo y Ramos, com. Pers.), y sólo es posible encontrar conchas vacías. Lo mismo puede haber sucedido con otros grupos animales cuya desaparición no deja rastro visible.

El descenso acusadísimo del caudal de los ríos levantinos en el último siglo debido fundamentalmente al aumento de la demanda de agua, puede ser el responsable de la escasez o ausencia de nutrias *Lutra lutra* en dichos ríos (Jiménez y Delibes 1990, Jiménez y Lacomba 1991).

6.5.6. Ventajas e inconvenientes de medidas de mitigación del cambio climático para la forestación

Una de las principales medidas de mitigación planteadas en un contexto de cambio climático y en relación con el protocolo de Kioto es la creación de nuevas masas forestales que podrían funcionar como sumideros de carbono. Ello puede tener efectos positivos para la fauna dependiente de ecosistemas forestales. Sin embargo, puede también implicar problemas serios para la conservación de la biodiversidad terrestre. Uno de los principales es la posible reforestación con especies foráneas de crecimiento rápido o la creación de plantaciones con pocas especies. Hay que destacar la importancia de conservar las masas existentes de bosques maduros y de crecimiento lento frente a la alternativa de repoblar con especies de crecimiento rápido (si el objetivo prioritario es realmente el secuestro de carbono). Repoblaciones de crecimiento rápido captaran antes el carbono, pero este también se liberará primero (Körner 2001). Realmente puede parecer poco serio discutir que especie es más eficiente en captar CO_2 de la atmósfera cuando por otro lado se está liberando CO_2 al deforestar masivamente los bosques maduros que constituyen un almacén importante del mismo. La suplantación de masas forestales maduras con plantaciones no redundaría para

nada en beneficio de nuestra fauna autóctona, más bien al contrario serviría como exonerante para la destrucción de verdaderas masas forestales autóctonas y eliminaría hábitat de interés conservacionista como estepas cerealistas, pastizales de montaña o matorral mediterráneo. Por otra parte, la sustitución de los bosques maduros por especies foráneas puede producir un empobrecimiento de los suelos, y la biodiversidad asociada, por acidificación y pérdida de la materia orgánica vegetal indispensable para el equilibrio del ecosistema. Las subvenciones a la reforestación están teniendo unos efectos perniciosos en países tropicales, donde se destruyen bosques nativos para justificar que se están reforestando terrenos baldíos, sin decir que antes estaban cubiertos de bosque. La simplificación de hábitat que implican las plantaciones o monocultivos con una o pocas especies solo puede ser negativa para la biodiversidad. La plantación de especies que demandan agua en base a la rapidez de su crecimiento solo puede agravar la caída de los niveles freáticos y la destrucción de hábitat para vertebrados y invertebrados dependientes de hábitat acuáticos. En un escenario de cambio climático es importante conservar el monte mediterráneo dada su baja capacidad de evapotranspiración en relación con otros hábitat forestales que pierden más agua de la qua atraen (ver ecosistemas terrestres).

En los ecosistemas mediterráneos se hace necesario promover la regeneración natural del arbolado (especialmente *Quercus* spp), a base de permitir la sucesión ecológica del matorral mediterráneo en amplias extensiones intercaladas en las áreas adehesadas (Pulido 1999, Carranza 2001). No obstante, en relación con la políticas de reforestación debemos señalar que el medio mediterráneo ha sido modelado y transformado desde hace miles de años como consecuencia de una incesante actividad humana que ha dado como resultado un paisaje en mosaico formado por campos de cultivo, pastizales con sus márgenes de vegetación herbácea o arbustiva que conviven con formaciones vegetales originales, que son desde hace miles de años manejadas por el hombre (Díaz-Pineda *et al.* 1998). Este proceso histórico de transformación del medio indudablemente ha condicionado en gran parte la composición de la fauna y de la vegetación que actualmente encontramos en la cuenca del Mediterráneo (Blondel y Vigne 1984, Erhardt y Thomas 1991, Galante 1994, Mönkkönen y Welsh 1994, Samways 1994). Así la mayor diversidad entomológica y el más alto porcentaje de endemismos los encontramos en espacios abiertos (Galante 2002, Verdú y Galante 2002, Martín *et al.* 2000). Por todo ello una política de reforestación generalizada y el promover los cambios de uso del suelo, incentivando el abandono de las actividades agropecuarias tradicionales, puede convertirse en un factor muy negativo para la conservación de la biodiversidad iberobalear que producirá la desaparición rápida de numerosas especies de insectos y otros invertebrados.

6.5.7. Interacciones entre uso de energías renovables y fauna

Otras posibles medidas de mitigación planteadas son apostar por la energía hidráulica o eólica. La primera estaría basada en nuevas presas y más fragmentación de nuestros ríos, la segunda en la construcción de parques eólicos con infraestructuras anejas que pueden contribuir tanto a la fragmentación de poblaciones como a la mortandad de aves durante el paso migratorio, además de provocar graves alteraciones y daños en el medio circundante como consecuencia de las obras realizadas. Por territorio español discurren las principales vías migratorias de aves entre Europa y África (Bernis 1966).

Los escasos datos al respecto en los ríos (Daufresne *et al.* 2003) sugieren que los focos artificiales de calentamiento, como centrales térmicas e incluso nucleares, pueden afectar de forma puntual a las comunidades circundantes, aunque no parecen tener efecto significativo sobre la tendencia al desplazamiento aguas arriba en la zonación actual de peces e invertebrados en los ríos.

6.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

Las actividades agrarias y ganaderas pueden verse seriamente afectadas por el cambio climático. Las medidas contra sequías prolongadas (embalses, trasvases, sobreexplotación de acuíferos) tendrán efectos adversos sobre la biodiversidad animal (ver otros apartados). La posible mayor incidencia de plagas puede conllevar un aumento en la emisión de plaguicidas en el medio. Esto puede a su vez seleccionar a favor de plagas cada vez más virulentas. Aumentos presumibles en la incidencia de parasitosis en animales domésticos pueden conllevar incrementos en los tratamientos antiparasitarios, lo cual puede determinar una selección a favor de una mayor resistencia en los propios parásitos y un aumento en su virulencia.

La caza y pesca deportiva constituyen actualmente actividades económicas que conciernen a numerosas personas y mueven importantes capitales, además de afectar a crecientes territorios gestionados fundamentalmente para su práctica. Las especies afectadas por caza y pesca se van a ver afectadas igual que las demás especies por los cambios potenciales antes indicados. La introducción de variedades o razas poco adaptadas al clima mediterráneo puede presentar problemas añadidos.

La sequía del verano en la mitad sur de España provoca que se suplemente con alimento a los animales de caza. Los efectos de la suplementación suelen ser poco deseables (Carranza *et al.,* 1995, Sanchez-Prieto *et al.*, en prensa) y pueden agravarse con el cambio climático. Un aumento de las áreas de bosque y matorral, junto con su adecuada intercalación en mosaico, puede contribuir a paliar la necesidad de alimento suplementario en verano (Carranza 1999; 2001).

Las prácticas de gestión poco compatibles con la conservación de las especies cinegéticas y piscícolas y sus hábitat deben ser controladas (Carranza y Martínez 2002), pero el uso del territorio para la práctica cinegética puede ser más compatible con la conservación de la biodiversidad que otros usos tradicionales como la agricultura y ganadería extensivas (Carranza 2001), además de poder utilizarse para prevenir los efectos del cambio climático con más facilidad que el uso agroganadero.

6.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

Ninguno de los estudios aquí revisados puede demostrar fehacientemente que el cambio climático por sí solo ha causado las tendencias detectadas en especies y comunidades (Hughes 2000, McCarty 2001). La destrucción, degradación, fragmentación y contaminación de hábitat derivados de cambios en los modelos de desarrollo económico están ocurriendo simultáneamente con el cambio climático, y separar las señales de ambos procesos sinérgicos requeriría unos estudios mucho más detallados y costosos que los que la comunidad científica española ha podido emprender hasta la fecha. Ello no significa que no podamos proponer posibles efectos del cambio climático, siempre que los supuestos en que se basa el modelo climático y las predicciones sobre efectos sobre poblaciones queden claros.

En relación a los invertebrados también existen numerosos factores que deberán ser estudiados para evaluar cual puede ser el posible impacto del cambio climático sobre sus poblaciones. Una de las cuestiones clave que deberán ser investigadas, es la relación entre los cambios en el área de distribución de las especies y el cambio climático analizando la influencia que en dicho proceso ejercen los actuales cambios de uso del suelo y de los recursos hídricos y fragmentación del hábitat. A esto debemos añadir los cambios en fenología que se están produciendo como consecuencia del cambio climático y que deberán ser analizados conjuntamente con los cambios de distribución. Los cambios en las interacciones ecológicas entre las especies y la de estas con el medio deberán ser objeto de estudios más profundos.

6.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

La detección del cambio se puede obtener de cualquier estudio a largo plazo de poblaciones animales que sea capaz de eliminar fuentes de variación debidas a otros impactos humanos sobre los hábitat (cambios en política agraria, infraestructuras, urbanismo, contaminación, introducción de especies exóticas, etc.). Ello es sin duda más fácil en poblaciones que habitan en zonas poco humanizadas como áreas protegidas. Además existen grupos de especies que han mostrado ser extremadamente vulnerables a cambios ambientales, detectándose desplomes de poblaciones en regiones remotas o protegidas. Entre éstos destacan los anfibios entre los vertebrados debido a su morfología y fisiología. Además existe una red global de observación de cambios en poblaciones de anfibios, lo que facilita la transferencia de información a nivel internacional. Las aves migratorias, debido al carácter discreto de las fases de su ciclo anual, ofrecen buenas posibilidades de detectar cambios fenológicos y de conducta. Los animales que habitan en zonas de alta montaña pueden en general ser buenos indicadores de cambios al constituir estas zonas verdaderas islas ecológicas cuya superficie debería ir encogiendo con los cambios climáticos.

6.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

6.9.1. Política científica

El Ministerio de Educación y Ciencia debería incentivar la investigación de los efectos del cambio climático sobre los procesos que afectan a la biodiversidad de organismos terrestres. La mayoría de los proyectos aprobados hasta ahora sólo contemplan cambios en el pasado. Apenas se han aprobado proyectos de prospectiva ni de detección de los efectos del cambio climático en la actualidad. Estas investigaciones deberán valorar el efecto del cambio climático y su relación con los profundos cambios de usos del suelo y fragmentación del hábitat. La cooperación científica internacional, en especial en el marco de la UE, es la única vía para avanzar en la investigación sobre temas tan complejos y no limitados al marco geográfico estricto de nuestro país. Esta cooperación debe ser fomentada a través de programas como el de “Cambio Global” dentro de los programas marco de la UE.

6.9.2. Política ambiental

Competencia del Ministerio del Medio Ambiente (DGB, OA Parques Nacionales) y de las CCAA (Consejerías de Medio Ambiente). Deberá pronunciarse sobre la conservación de la red de espacios naturales protegidos. Dicha política deberá realizarse a nivel supraautonómico, dada la escala geográfica de los problemas.

Zonas en las que habitan especies especialmente afectadas por el cambio climático podrían ser objeto de una protección especial que reduzca al máximo el efecto del cambio climático (protección de recursos hidrológicos y forestales, control de todo tipo de usos como exceso de ganado o turismo o urbanismo). Sería interesante valorar la catalogación o creación de “zonas o áreas especialmente sensibles al cambio climático" para aquellas áreas con ecosistemas originales únicos o especies amenazadas o endémicas que no tengan opción para desplazar su hábitat y puedan sufrir extinción. Son ejemplos de estas zonas los territorios de alta montaña, los cursos de agua con presencia de especies vulnerables así como humedales y otros ecosistemas acuáticos como surgencias, fuentes y manantiales, sobre los que no existe ninguna figura legal de protección.

6.9.3. Política de turismo regional y local

A ejecutar por las CCAA (Conserjerías de Turismo) y los Ayuntamientos (Concejalías de Turismo) enclavados en el entorno de espacios naturales protegidos. La alteración por presión turística de enclaves vulnerables de alta montaña o lacustre-fluviales debe ser limitada al máximo.

6.9.4. Política de caza y pesca continental

Se verán implicadas las CCAA (Conserjerías de Agricultura y Pesca o de Medio Ambiente). La introducción de especies foráneas de peces para la pesca deportiva debe ser controlada o impedida si se quiere conservar la rica diversidad de endemismos de peces que todavía persiste en nuestro país. La introducción de variedades o especies cinegéticas propias de otras regiones debe ser asimismo controlada para no afectar negativamente mediante hibridación a las variedades autóctonas mejor adaptadas al clima mediterráneo.

Las actividades de pesca deportiva, incluso el uso de embarcaciones deportivas en lagos y embalses a tal fin, pueden producir translocación accidental de especies invasoras (ej. de las larvas de *Dreissena polymorpha*). La circulación de embarcaciones de pesca aguas arriba del río Miño ha extendido hacia la cabecera a la especie *Corbicula fluminea*. Han de establecerse las medidas adecuadas para controlar los agentes portadores de las especies invasoras (renovación de los aparejos de pesca, limpieza de embarcaciones al trasladarse de cuenca, etc.) y un seguimiento drástico de las mismas. La concienciación de la población es esencial para que estas medidas sean eficaces.

6.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

6.10.1. Creación y mantenimiento de series temporales largas

Como se deduce de la información incorporada, existen muy pocas series temporales largas en España que puedan utilizarse para explorar la posibilidad de cambios en fenología o dinámica de poblaciones. Debieran establecerse y dotarse económicamente estudios a largo plazo sobre poblaciones animales enclavadas en hábitat que no sufran (o lo hagan escasamente) efectos humanos distintos a los del cambio climático. Las series temporales cortas impiden desligar los efectos posibles del cambio climático de las variaciones demográficas naturales. Las series temporales largas permiten además explorar la importancia de eventos climáticos extremos como el verano de 2003 y en general de la varianza en condiciones climáticas en relación con aumentos en la temperatura media.

En la actualidad, existe una base fenológica de plantas y animales (aves e insectos) que se inició en 1940 por el Servicio de Meteorología Agrícola del Instituto Nacional de Meteorología (INM). Desde su inicio, se registraron distintas fases fenológicas (por ejemplo, floración y salida de las hojas en plantas, o llegada y partida de aves migratorias) en unas 100 a 200 estaciones a lo largo de la península, Baleares y Canarias. Los datos han sido tomados por observadores que bajo unas instrucciones concretas enviaban la información en fichas mensuales. Estos datos están siendo informatizados por J.J. Sanz en el marco de un convenio de colaboración entre el INM y el MNCN-CSIC. El número de observaciones ha ido cayendo paulatinamente desde 1940 y si no se revitaliza esta base, su futuro es bastante incierto. Por ejemplo, en los años 50 se tienen unas 300 observaciones de llegadas de golondrina en sendas localidades, este número se redujo a 150 en los años 50 y en los últimos 5 años ha disminuido a menos de 100 localidades por año. El principal problema de esta base de datos fenológica a largo plazo es la escasa entrada de datos provenientes de nuevos observadores. Sería deseable potenciar este tipo de base de datos fenológicas con el apoyo de Internet como medio de comunicación

entre los observadores. Sería conveniente contar con la guardería forestal como observadores fenológicos, dada su apropiada formación biológica para esta actividad. Con el uso de Internet se pueden reducir los costes al máximo y se incentivaría a los observadores a poder contrastar sus datos con los ya existentes. Tras la base de datos debería existir una persona encargada de validar las observaciones para poder facilitar la información a la Administración. El fin de esta información sería el aportar bioindicadores de posibles cambios climáticos en el presente o futuro cercano. Por otro lado, se puede potenciar esta actividad entre ONGs conservacionistas especializadas en ciertos organismos, como es SEO/BirdLife para las aves. Esta ONG tiene un potencial grande de observadores bien repartidos por la Península e islas que podrían aportar datos valiosos. De hecho, ya tienen programas en marcha (SACRE), cuyos resultados futuros pueden ser utilizados como bioindicadores de cambio global.

6.10.2. Establecimiento de programas de investigación sobre gradientes latitudinales y altitudinales y límites de distribución

España ofrece unas posibilidades únicas para la investigación a lo largo de gradientes latitudinales y altitudinales dada su situación geográfica y su complicada orografía en comparación con otros países europeos. La investigación sobre la dinámica y adaptaciones de poblaciones animales a lo largo de estos gradientes puede ofrecer resultados muy importantes para evaluar la posible adaptación de especies animales a cambios climáticos rápidos. Algunas poblaciones pueden mostrar diversificación microevolutiva altitudinal en historias de vida como resultado de adaptación a gradientes altitudinales. Esta diversificación podría ser más importante que a nivel latitudinal y merece ser estudiada y conservada. Esta biodiversidad altitudinal podría verse seriamente afectada por cambios climáticos. Igualmente nuestro país ostenta una posición geográfica única para estudiar los factores ecológicos que determinan los límites de distribución de especies animales y sus posibles cambios. Este tipo de investigaciones debe se apoyado si queremos tener alguna capacidad predictiva sobre el futuro de nuestras poblaciones animales.

6.10.3. Estudios básicos sobre la ecología o ecofisiología de especies silvestres que permitan plantear predicciones de modelos bioenergéticos con un mínimo de fiabilidad

Tampoco existen suficientes estudios de ecología o ecofisiología de especies silvestres que permitan plantear predicciones de modelos bioenergéticos con un mínimo de fiabilidad. Es muy importante evaluar la interacción del cambio climático con otros estresantes ambientales, al poder magnificar el efecto sobre especies silvestres de cada factor actuando de forma aislada.

6.10.4. Sistemas de vigilancia ante posibles desplomes de poblaciones

Una carencia importante es la falta de sistemas de vigilancia dentro y fuera de reservas para detectar desplomes poblacionales y cambios climáticos locales. Así la extinción del lince ibérico casi sorprende a la Administración y a las ONGs conservacionistas. Muchas especies endémicas pero menos carismáticas que el lince, como el desmán pirenaico, están desapareciendo de amplias zonas del país sin reacción aparente entre los profesionales o gestores de fauna. ¿Se deben estas extinciones locales al cambio climático?

6.10.5. Evaluación de la eficiencia de las posibles medidas mitigadoras

También se echan en falta evaluaciones de las repercusiones de posibles medidas de adaptación y mitigación propuestas.

6.10.6. Estudios taxonómicos en invertebrados

Los modelos predictivos sobre posibles cambios en el funcionamiento de los ecosistemas, como resultado del cambio climático (sustitución de especies, interacción entre los elementos de las comunidades, etcétera), se ven seriamente obstaculizados por el escaso conocimiento taxonómico de las especies que las integran y de cual es su papel en el ecosistema.

Es prioritario, por lo tanto: 1) incrementar los estudios taxonómicos, en especial de los grupos animales peor conocidos, así como los que son bioindicadores, y 2) desarrollar herramientas que pongan al alcance de los ecólogos de sistemas, de gestores del medioambiente, y de la sociedad en su conjunto, la posibilidad de fácil acceso a la información disponible.

6.10.7. Biología de la conservación en el largo plazo

La investigación en biología de la conservación y el desarrollo de proyectos a largo plazo debe ser una prioridad de la Administración para que futuros informes puedan ofrecer más datos y menos especulación que el presente. El estudio de la dinámica de poblaciones animales debe ser el eje de de estudios en biología de la conservación relacionados con el cambio climático. Las interacciones con depredadores y parásitos pueden verse afectadas por la duración de la temporada reproductiva y su efecto sobre tamaño y densidad poblacional.

Es necesario fomentar el estudio de los ciclos de vida, estrategias reproductoras, dinámica poblacional en relación con la altitud y latitud, etcétera, de las especies clave en el funcionamiento de los ecosistemas, así como de las especies invasoras para tomar las medidas más adecuadas de protección y control.

En relación a los Artrópodos en general se deberán desarrollar programas de investigación sobre el efecto del cambio climático en:

- Grupos de insectos endémicos ligados a ecosistemas de las cadenas montañosas transversales ibéricas, cuya distribución es de origen anterior a las glaciaciones pleistocénicas, como es el caso de *Parnassius apollo*. Podemos considerar que están atrapados en sus límites sin posibilidad de emigrar hacia norte, y que por tanto la única respuesta que sus poblaciones podrán tener es el desplazamiento vertical hacia partes mas elevadas.

- Grupos de insectos endémicos, en muchas ocasiones no voladores (ápteros) o con poco potencial de desplazamiento, y ligados a ecosistemas áridos con unas condiciones de humedad y temperatura extremas, ya que el calentamiento global pueden hacer inviable la supervivencia de sus poblaciones.

- Grupos de insectos depredadores y parasitoides en relación a su biología y la de sus presas y huéspedes. La falta de sincronización de sus ciclos puede tener graves consecuencias en el incremento de los índices de plaga de cultivos.

- Grupos de insectos migradores en cuanto a sus periodos de adelanto de las fases de desplazamiento. Las consecuencias pueden ser diversas: no estar sincronizados sus llegadas a los ecosistemas con la fenología de las plantas nutricias, no poder llevar a cabo sus procesos polinizadores tan importantes en el mantenimiento de plantas endémica mediterráneas (Pérez Bañón *et al.* 2003), aparición temprana de plagas (proyecto EXAMINE, V, Seco com. pers.), etc.

- Estudios predictivos de dispersión de insectos en relación al potencial cambio de distribución de plantas nutricias.

6.11. BIBLIOGRAFÍA

Alba-Tercedor J. 2002. Ephemeroptera. En: El Reino animal en la Península Ibérica e islas Baleares (- The animal Kingdom of the Iberian Peninsula and Balearic Islands-).Página web del Proyecto Fauna Ibérica. CSIC: Madrid. http://www.fauna-iberica.mncn.csic.es/htmlfauna/faunibe/zoolist/ insecta/ephemeroptera/epheme.html.

Alba-Tercedor J. y Jáimez-Cuéllar P. 2003. Checklist and historical evolution of the knowledge of Ephemeroptera in the Iberian Peninsula Balearic and Canary Islands. In: Gaino E ed., Research Uodate on Ephemeroptera y Plecoptera. Perugia Servicio Stampa di Ateneo dell,Università degli Studi di Perugia: 91-97.

Araujo R., Bragado D. y Ramos M.A. 2001. Identification of the River Blenny, *Salaria fluviatilis* as a host to the glochidia of *Margaritifera auricularia*. Journal of Molluscan Studies 67: 128-129.

Araujo R., Moreno D. y Ramos M.A. 1993. The Asiatic clam Corbicula fluminea (Müller, 1774) (Bivalvia Corbiculidae) in Europe. American Malacological Bulletin 10: 39-49.

Arconada B. y Ramos M.A. 2001. New data on Hydrobiidae systematics: two new genera from the Iberian Peninsula. Journal of Natural History 35: 949-984.

Arconada B. y Ramos M.A. 2002. Spathogyna, a new genus for *Valvata* (? *Tropidina*) *fezi* Altimira 1960 from eastern Spain: a second case of natural pseudohermaphroditism in a Hydrobiidae species (Mollusca Prosobranchia). Journal of Molluscan Studies 68: 319-327.

Arconada B. y M.A. Ramos 2003 The Ibero-Balearic region: one of the areas of highest Hydrobiidae (Gastropoda Prosobranchia Rissooidea) diversity in Europe. Graellsia 59(2-3): 91-104.

Arconada B. y Ramos M.A. The genus *Islamia* (Gastropoda Hydrobiidae) revised in the Iberian peninsula and description of two new genera Malacologia (en prensa).

Baixeras J. 2002. Investigación aplicada a la conservación de las mariposas de Penyagolosa. Informe inédito elaborado para la Consejería de Medio Ambiente de la Generalitat Valenciana. Valencia.

Balleto E. y Casale A. 1991. Mediterranean Insect Conservation. En: Collins N.M. y Thomas J.A. (eds.). The Conservation of Insects and their Habitats. Academic Press London.

Bauwens D., Hordies F., Van Damme R. y Van Hecke A. 1986. Notes on distribution and expansion of the range of the lizard *Psammodromus algirus* in Northern Spain. Amphibia-Reptilia 7: 389-392.

Baylis M. y Rawling P. 1998. Modelling the distribution and abundance of *Culicoides imicola* in Morocco and Iberia uinf climatic data and satellite imagery. Archives of Virology Suppl. 14: 127-136.

Beebee T.J.C. 1995. Amphibian breeding and climate. Nature 374: 219-220.

Bernis F. 1966. Migración en Aves: Tratado teórico y práctico. Publicaciones de la Sociedad Española de Ornitología.

Bezemer T.M. y Knight K.J. 2001. Unpredictable responses of garden snail (*Helix aspersa*) populations to climate change. Acta Oecologica, 22: 201-208.

Bisdom E.B.A., Dekker L.W. y Schoute J.F.Th. 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soils structure. Geoderma 56: 105-118.

Blaustein A.R. y Kiesecker J.M. 2002. Complexity in conservation: lessons from the global decline of amphibian populations. Ecology Letters 5: 597-608.

Blondel J. y Vigne J.D. 1984. Space time and man as determinants of diversity of birds and mammals in the Mediterranean Region. En: Ricklefs R.E y Schluter D. (eds.). Species diversity in ecological communities. The University of Chicago Press.

Bosch J., Martínez-Solano I. y García-París M. 2001. Evidence of a chytrid fungus infection involved in the decline of the common midwife toad (*Alytes obstetricans*) in protected areas of central Spain. Biological Conservation 97: 331-337.

Brito J.C., Abreu F., Paulo O.S., Da Rosa H.D. y Crespo E.G. 1996. Distribution of Schreiber's green lizard (*Lacerta schreiberi*) in Portugal: a predictive model. Herpetological Journal 6: 43-47.

Brommer J.E. y Fred M.S. 1999. Movement of the Apollo butterfly related to host plant and nectar plant patches. Ecological Entomology 24(2): 125-132.

Bustamante J. 1997. Predictive models for lesser kestrel *Falco naumanni* distribution, abundance and extinction in southern Spain. Biological Conservation 80: 153-160.

Carbonell R., Pérez-Tris E. y Tellería J.L. 2003. Effects of habitat heterogeneity and local adaptation on the body condition of a forest passerine at the edge of its distributional range. Biological Journal of the Linnean Society 78:479-488.

Carranza J. 1999. Aplicaciones de la Etología al manejo de las poblaciones de ciervo en el suroeste de la Península Ibérica: producción y conservación. Etología 7: 5-18.

Carranza J. 2001. INFORME PROYECTO FEDER I+D, MCYT, Ref: 1FD1997-1504.

Carranza J. y Martínez J.G. 2002. Consideraciones evolutivas en la gestión de especies cinegéticas. En: Soler M. (ed.). Evolución, la base de la Biología Proyecto Sur Ediciones Granada. pgs. 373-387.

Carrascal L.M. y Lobo J.M. 2003. Respuestas a viejas preguntas con nuevos datos: estudio de los patrones de distribución de la avifauna española y consecuencias para su conservación. En: Martí R. y del Moral J.C. (eds.) Atlas de las Aves Reproductoras de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-Sociedad Española de Ornitología. Madrid. Pgs. 651-668.

Carrascal L.M., Bautista L.M. y Lázaro E. 1993. Geographical variation in the density of the White Stork *Ciconia ciconia* in Spain: influence of habitat structure and climate. Biological Conservation 65: 83-87.

Cartagena M.A. 2001. Biología y Ecología de los Tenebriónios (Coleoptera Tenebrionidae) en ecosistemas iberolevantinos. Tesis doctoral, Universidad de Alicante.

Cartagena M.A., Viñolas A y Galante E. 2002. Biodiversidad de Tenebriónidos (Coleoptera Tenebrionidae) en saladares ibéricos. Butlletí Institució Catalana Historia Natural 70: 91-104.

Chevallier H. 1980. Les escargots de genre *Helix* commercialisée en France. Haliotis 10. 11-23.

Chevallier H. 1992. L'Élevage des Escargots. Editions du Point Vétérinaire Maisons-Alfort, France.

Clutton-Brock T.H., Guinness F.E. y Albon S.D. 1982. Red deer. Behaviour and Ecology of two sexes. Edinburg: Edinburg Univ. Press.

Coope G.R. y Angus R.B. 1975. An ecological study of a temperate interlude in the middle of the last glaciation, based on fossil Coleoptera from Isleworht, Middlesex. Journal Animal. Ecology 44: 365-391.

Coope G.R. 1990. The invasion of Northern Europe during the Plesitocene by Mediterranean speccies of Coleoptera. En: Di Castri F., Hansen A.J. y Debussche M. (eds.). Biological invasions in Europe and Mediterranean Basin. Kluwer Academic Publishers London. Pgs. 203-215.

Darrigran G. 2002. Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland freshwater environments. Biological Invasions 4: 145-156.

Daufresne M., Roger M.C., Capra H. y Lamouroux N. 2003. Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. Global Change Biology 10: 124-140.

Dawson W.R. 1992. Physiological responses of animals to higher temperatures. En: Peters R.L. y Lovejoy T.E. (eds.) Global Warming and Biological Diversity. Yale University Press. Yale CT. Pgs. 158-170.

Díaz S., Fraser L.H., Grime J.P. y Falczuk V. 1998. The impact of elevated CO_2 on plant-herbivore interactions: experimental evidence of moderating effects at the community level. Oecologia 117: 177-186.

Díaz-Paniagua C., Cuadrado M., Blázquez M.C. y Mateo J.A. 2002. Reproduction of *Chamaleo chamaleon* under contrasting environmental conditions. Herpetological Journal 12: 99-104.

Díaz-Pineda F., de Miguel J.M. y Casado M.A. (coordinadores). 1998. Diversidad biológica y cultura rural en la gestión ambiental del desarrollo. Mundi-Prensa Madrid.

Doadrio I. 2001. Atlas y Libro Rojo de los Peces Continentales de España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Elias S.A. 1994. Quaternary insects and their environments. Smithsonian Institution Press Washington.

Elvira B. 2001. El Plan Hidrológico Nacional, los ecosistemas fluviales y los peces de río. En: El Plan Hidrológico Nacional a debate P. Arrojo (ed.), Colección Nueva Cultura del Agua Bakeaz Bilbao pp. 139-146.

Elvira B. y Almodóvar A. 2001. Freshwater fish introductions in Spain: facts and figures at the beginning of the 21st century. Journal of Fish Biology 59 (suppl. A): 323-331.

Erahrdt A y Thomas J.A. 1991. Lepidoptera as indicators of change in the seminatural grasslands of lowland an upland Europe. En: Collins N.M. y Thomas J.A. (eds.). The conservation of insects and their habitats. Academic Press London. Pgs. 231-236.

Erhlich P.R. y Erhlich A.H. 1992. The value of biodiversity. Ambio 21: 219-226.

Escós J. y Alados C.L. 1991. Influence of weather and population characteristics of free-ranging Spanish ibex in the Sierra de Cazorla y Segura and in the eastern Sierra Nevada. Mammalia 55: 67-78.

Esteban M. y Sanchíz B. 1997. Descripción de nuevas especies animales de la península Ibérica e islas Baleares (1978-1994): Tendencias taxonómicas y listado sistemático. Graellsia 53: 111-175.

Fargallo J.A. y Johnston R.D. 1997. Breeding biology of the Blue Tit *Parus caeruleus* in a montane mediterranean forest: the interaction of latitude and altitude. Journal Fur Ornitologie 138, 83-92.

Fernández J. 1996. Nuevos táxones animales descritos en la península Ibérica y Macaronesia entre 1994 y 1997. Graellsia 52: 163-215.

Fernández J. 1998. Nuevos táxones animales descritos en la península Ibérica y Macaronesia desde 1994 (3ª parte). Graellsia 54: 143-168.

Fernández J. 2000. Nuevos táxones animales descritos en la península Ibérica y Macaronesia desde 1994 (4ª parte). Graellsia 56: 119-150.

Fernández J. 2001. Nuevos táxones animales descritos en la península Ibérica y Macaronesia desde 1994 (5ª parte). Graellsia 57: 153-163.

Fernández J. 2002. Nuevos táxones animales descritos en la península Ibérica y Macaronesia desde 1994 (6ª parte). Graellsia 58: 97-124.

Fernández J. 2003. Nuevos táxones animales descritos en la península Ibérica y Macaronesia desde 1994 (7ª parte). Graellsia 59: 101-130.

Fernández-Llario P. y Carranza J. 2000. Reproductive performance of the wild boar in a Mediterranean ecosystem under drought conditions. Ethology, Ecology and Evolution 12: 335-343.

Galante E. 1992. Escarabeidos coprófagos. En: Gómez Gutierrez J.M. (ed.). Las Dehesas Salmantinas. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Castilla y León. Pgs. 905-927.

Galante E. y Verdú J.R. 2000. Los Artrópodos de la “Directiva Hábitat” en España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Galante E. 2002. Insectos. En: Reyero J.M. (ed.) La Naturaleza de España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pgs. 208-215.

Galante E., García-Román M., Barrera I. y Galindo P. 1991. Comparison of spatial distribution patterns of dung-feeding Scarabs (Coleoptera: Scarabaeidae Geotrupidae) in wooded and open pastureland in the Mediterranean Dehesa area of the Iberian Peninsula. Environmental Entomology 20(1): 90-97.

Galante E. y Marcos-García M.A. 1997. Detritívoros Coprófagos y Necrófagos. En: Melic A. (ed.). Los Artrópodos y el Hombre. Sociedad Aragonesa de Entomología. Zaragoza.

Galante E. 1994. Los Artrópodos los grandes desconocidos en los programas de protección ambiental. En: Jiménez-Peydró R. y Marcos-García M.A. (eds.). Environmental Management and Arthropod Conservation. Asociación española de Entomología. Valencia. Pgs. 75-87.

García J.T. y Arroyo B. 2001. Effect of abiotic factors on reproduction in the centre and periphery ranges: a comparative analysis in sympatric harriers. Ecography 24:393-402.

García-Barros E. 1988. Delayed ovarian maturation in the butterfly *Hiparchia semele* as a possible response to summer drought. Ecological Entomology 13: 391-398.

Gibbs J.P. y Breisch A.R. 2001. Climate warning and calling phenology of frogs near Ithaca New York, 1900-1999. Conservation Biology 15: 1175-1178.

Gurrea Sanz P. y Sanz Benito M.J. 2000. Endemismos de Curculionoidea (Coleoptera) de la Peínsula Ibérica Islas Baleares y Canarias. Publicaciones de la Universidad Autónoma de Madrid. 384 pgs.

Harrington R., Barbagallo S., Basky Z., Bell N., Coceano P.G., Cocu N., Denholm C., Derron J., Hullé M., Katis N., Knight, J., Lukášová H., Marrkula I., Maurice D., Mohar J., Pickup J., Rolot J.L., Rounsevell M., Ruszkowska M., Schliephake E., Seco-Fernandez M.V., Sigvald R., Tsitsipis J., Ulber B. y Verrier P. 2001. EXAMINE (EXploitation of Aphid Monitoring IN Europe): an EU Thematic Network for the study of global change impacts on aphids. Detecting Environmental Change: Science and Society. London, UK, 17-20 July 2001, pgs 93-94.

Harrington R., Denholm C., Verrier P., Clark S., Welham S., Hullé M., Maurice D., Rounsevell M., Cocu N., Knight J., Bell N., Barbagallo S., Basky Z., Coceano P.G., Derron J., Katis N., Lukášová H., Marrkula I., Mohar J., Pickup J., Rolot J.-L., Ruszkowska M., Schliephake E., Seco-Fernández M.-V., Sigvald R., Tsitsipis J. y Ulber B. 2003. Impacts of environmental change on aphids throughout Europe. Integrated Biological Systems Conference San Antonio Texas USA 14-16 April 2003.

Hassell M.P., Godfray H.C.J. y Comins H.N. 1993. Effects of insecf global change on the dynamics of insect host-parasitoid interactions. En: Kareiva P.M., Kingsolver J.G. y Huey R.B. (eds.). Biotic Interactions and Global Chang. Sinauer, Surderland, MA. Pgs. 402-423.

Heinrich B. 1993. The Hot-Blooded Insects. Strategies and Mechanisms of Thermoregulation. Springer-Verlag. 601 pgs.

Hidalgo R. 2002. Red Natura 2000. En: Reyero J.M. (ed.) La Naturaleza de España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pgs. 272- 283.

Hódar J.A., Castro J. y Zamora R. 2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forest under climatic warming. Biological Conservation 11: 123-129.

Houghton *et al.* (eds.) 1996. Climate Change 1995. Report of Working Group I. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press.

Hughes L. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? Trends Ecological Evolution 15: 56-61.

Huin N. y Sparks T.H. 1998. Arrival and progression of the Swallow *Hirundo rustica* through Britain. Bird Study 45: 361-170.

Hullé M., Harrington R., Cocu N., Denholm C., Verrier P., Maurice D., Rounsevell M., Knight J., Bell N., Barbagallo S., Basky Z., Coceano P.G., Derron J., Katis N., Lukášová H., Marrkula I., Mohar J., Pickup J., Rolot J.-L., Ruszkowska M., Schliephake E., Seco-Fernández M.-V., Sigvald R., Tsitsipis J. y Ulber B. 2003. EXAMINE: an EU thematic network to evaluate impacts of environmental changes on aphids at a regional scale. Proceedings IOBC/WPRS meeting `Landscape Management for Functional Biodiversity', Bologna Italy, May 2003. IOBC/WPRS Bulletin (Bulletin OILB SROP) 26(4). 71-75.

Humphries M.M., Thomas D.W. y Speakman J.R. 2002. Climate-mediated energetic constraints on the distribution of hibernating mammals. Nature 418: 313-316.

Iglesias J., Santos M. y Castillejo J. 1996. Annual activity cycles of the land snail *Helix aspersa* Müller in natural populations of North-Western Spain. Journal of Molluscan studies 62: 495-505.

Jiménez J. y Delibes M.1990. Causas de la rarificación. En: M. Delibes (ed.). La nutria (*Lutra lutra*) en España. ICONA Serie Técnica Madrid. Pgs. 169-177.

Jiménez J. y Lacomba J.I. 1991. The influence of water demands on otter distribution in Mediterranean Spain. Habitat 6: 249-254 (Proceedings V International Otter Colloquium, C. Reuther and R. Rochert, eds.).

Jones J.G. 2001. Fraeshwater ecosystems. Structure and responses. Ecotoxicology and Environmental Safety 50: 107-113.

Kiss L., Magnin F. y Torre F., 2004. The role of landscape history and persistent biogeographical patterns in shaping the responses of Mediterranean land snail communities to recent fire disturbances. Journal of Biogeography 31: 145-157.

Körner C. 2001. Experimental plant ecology: some lessons from global change research. En: Press Huntly y Levin 8eds.). Ecology: Achievement and challenge: Blackwell, Oxford.

Ledergeber S., Leadley P.W., Stöcklin J. y Baur B. 1998. Feeding behaviour of juvenile snails (*Helix pomatia*) to four plant species grown at elevated CO_2. Acta Oecologica 19: 89-95.

Lizana M. y Pedraza E.M. 1998. Different mortality of toad embryos (*Bufo bufo* and *Bufo calamita*) caused by UV-B radiation in high mountain areas of the Spanish Central System. Conservation Biology 12: 703-707.

Lobón-Cerviá J., Dgebuadze Y., Utrilla C.G., Rincón P.A. y Granado-Lorencio C. 1996. The reproductive tactics of dace in central Siberia: evidence for temperature regulation of the spatio-temporal variability of its life history. Journal of Fish Biology 48: 1074-1087.

López M.A. y Altaba C.R. 1997. Présencia de *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) (Bivalvia Corbiculidae) al Delta de L'Ebre. Bulletí del Parc Natural Delta l'Ebre10: 20-22.

Lucio A.J. 1990. Influencia de las condiciones climáticas en la producción de la Perdiz Roja (*Alectoris rufa*). Ardeola 37:207-218.

Lumbreras C., Galante E. y Mena J. 1990. Seguimiento de una población de *Bubas bubalus* (Olivier, 1811) a través del estudio combinado de diversos caracteres indicativos de edad (Col. Scarabaeidae). Boletín Asociación española de Entomología 14: 243-249.

Lumbreras C., Galante E. y Mena J. 1991. Ovarian Condition as an Indicator of the phenology of *Bubas bubalus* (Coleoptera: Scarabaeidae). Annnals of the Entomological Society of America 84(2): 190-194.

Machado A. 2002. La biodiversidad de las Islas Canarias. En: Pineda F.D., de Miguel J.M., Casado M.A. y Montalvo J. (eds) La Diversidad Biológica de España. Prentice Hall, Madrid. pgs. 89-99.

Marco A. 2002. *Lacerta schreiberi*. En: Pleguezuelos J.M., Márquez R. y Lizana M. (eds.). Atlas y Libro Rojo de los Anfibios y Reptiles de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza Madrid. Pgs. 232-234.

Marco A. y Pollo C. 1993. Análisis biogeográfico de la distribución del lagarto verdinegro (*Lacerta schreiberi* Bedriaga 1878). Ecologia 7: 457-466.

Marco A. y Lizana M. 2002. Efectos de la radiación ultravioleta sobre los anfibios en áreas de montaña. Actas de las III Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Paular. Biodiversidad: investigación conservación y seguimiento. Comunidad de Madrid. Pgs. 73-80.

Marco A., Lizana M., Suárez C. y Nascimento F. 2002. Radiación ultravioleta y declive de anfibios. Quercus 192: 30-37.

Márquez R. y Lizana M. 2002. Conservación de los Anfibios y Reptiles de España. En: Pleguezuelos J.M., Márquez R. y Lizana M. Atlas y Libro Rojo de los Anfibios y Reptiles de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-Asociación Herpetológica Española. Madrid. Pgs. 417-453.

Martí R. y del Moral J.C. (Eds.) Atlas de las Aves Reproductoras de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-Sociedad Española de Ornitología. Madrid.

Martín J., García-Barros E., Gurrea P., Luciañez M.J., Munguira M.L., Sanz M.J y Simón J.C. 2000. High endemism areas in the Iberian Peninsula. Belgian Journal Entomologie 2: 47-57.

Martín Piera F. y Lobo J.M. 2000. Diagnóstico sobre el conocimiento sistemático y biogeográfico de tres órdenes de insectos hiperdiversos en España: Coleoptera Hymenoptera y Lepidoptera. En. Martin Piera F, Morrone J.J. y Melic A. (eds.). Hacia un

proyecto CYTED para el Inventario y Estimación de la Diversidad Entomológica en Iberoamérica. Pribes 2000. Monografías Tercer Milenio 1, Sociedad Entomológica Aragonesa. Zaragoza.

Martin T.E. 2001. Abiotic vs. biotic influences on habitat selection of coexisting species: climate change impacts? Ecology 82: 175-188.

Martínez J.G., Carranza J., Fernández J.L. y Sánchez-Prieto C.B. 2002. Genetic variation of red deer populations under hunting exploitation in South-Western Spain. Journal of Wildland Management 66(4): 1273-1282.

McCarty J.P. 2001. Ecological consequences of recent climate change. Conservation Biology 15: 320-331.

McLaughlin J.F., Hellmann J.J., Boggs C.L. y Ehrlich P.R., 2002. Climate change hastens population extinctions. Proceeding National Academy Sciences USA 99: 6070-6074.

McLean D.M. 1991. A climate change mammalian population collapse mechanism. En: Kainlauri E., Johansson A., Kurki-Suonio I. y Geshwiler, M. (eds.) Energy and Environment. ASHRAE. Atlanta Georgia. Pgs. 93-100.

McLean D.M.1978. A terminal Mesozoic “greenhouse”: lessons from the past. Science 201 401-406.

Mena J., Galante E. y Lumbreras C.J. 1989. Daily flight activity of Scarabaeidae and Geotrupidae (Col.) and analysis of the factors determining this activity. Ecologia Mediterranea 15(1-2): 69-80.

Merino S. y Potti J. 1996. Weather dependent effects of nest ectoparasites on their bird hosts. Ecography 19:107-113.

Mico E. y Galante E. 2002. Atlas fotográfico de los escarabeidos florícolas ibero-baleares. Arganda Editions Barcelona.

Mönkkönen M. y Welsh D.A. 1994. A biogeographical hypothesis on the effects of human caused landscape changes on the forest bird communities of Europe and North America. Annales Zoologici Fennici 31: 61-70.

Moore K.M.S. y Gregory S.V. 1988a. Response of young-of-the-year cutthroat trout to manipulation of habitat structure in a small stream. Transactions of the American Fisheries Society 117: 162-170.

Moore K.M.S. y Gregory S.V. 1988b. Summer habitat utilization and ecology of cutthroat trout fry (*Salmo clarki*) in Cascade Mountain streams. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 45: 1921-1930.

Mouthon J. 1990. Importance des conditions climatiques dans la différentiation des peuplements malacologiques de lacs européens. Archiv für Hydrobiologie 118: 353-370.

Myers N., Mittermeler R.A., Mittermeler C.G., Da Fonseca G.A.B y Kent J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature 103: 853-858.

Obeso J.R. y Bañuelos M.J. 2004 El urogallo (*Tetrao urogallus cantabricus*) en la Cordillera Cantábrica. Serie Técnica. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente.

Ojanguren A.F. 2000. Efectos de factores ambientales y del tamaño de huevo sobre eficacia biologica en trucha común (*Salmo trutta* L.). Universidad de Oviedo. 146 pgs.

Palomares F. 2003. The negative impact of heavy rains on the abundance of a Mediterranean population of European rabbits. Mammalian Biology 68: 224-234.

Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C., Hill J.K., Thomas C.D., Descimon H., Huntley B., Kaila L., Kullberg J., Tammaru T., Tennent W.J., Thomas J.A y Warren M. 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. Nature 399: 579-583.

Patz J.A., Graczyk T.K., Geller N. y Vittor A.Y. 2000. Effects of environmental change on emerging parasitic diseases. International Journal of Parasitology 30: 1395-1405.

Peñuelas J., Filella I. y Comas P. 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. Global Change Biology 8: 531-544.

Perez Bañón C., Juán A., Petanidou T., Marcos-García M-A. y Crespo M.B., 2003. The reproductive ecology of *Mendicago citrina* (Font Quer) Greuter (Leguminosae): a bee-

pollinated plant in Mediterranean island where bees are absent. Plant Systematics and Evolution 241: 29-46.
Peters H.A., Baur B., Bazzaz F. y Körner, C. 2000. Consumption rates and food preferences of slugs in a calcareous grassland under current and future CO_2 conditions. Oecologia 125: 72-81.
Piñol J., Teradas J. y Lloret F. 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence on coastal eastern Spain. Climatic Change 38: 345-357.
Porazinska D.L. y Wall D.H. 2002. Population age structure of nematodes in the Antarctic dry valleys: perspectives on time space and habitat suitability. Arctic, Antarctic and Alpine Research 34: 159-168.
Potts D.C. 1975. Persistence and extinction of local populations of the garden snail *Helis aspersa* in unfavourable environments. Oecologia 21: 313-334.
Power M.E., Parker M.S. y Wootton J.T. 1996. Disturbance and food chain length in rivers. En: Polis G.A. y Winemiller K.O. (eds.). Food webs: integration of patterns and dynamics. Chapman y Hall, London. Pgs. 286-297.
Pujante Mora A.M. 1997. Los Artrópodos como bioindicadores de la calidad de la aguas. En: Melic A. (ed.). Los Artrópodos y el Hombre. Bol. S.E.A. 20: 277-284. Sociedad Aragonesa de Entomología.
Pulido F.J. 1999. Herbivorismo y regeneración de la encina (*Quercus ilex* L.) en bosques y dehesas. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura.
Ramírez Á. 2003. Efectos geográficos y ambientales sobre la distribución de las aves forestales ibéricas. Graellsia 59: 219-231.
Ramos M.A. 1980. Estudio del tamaño de la concha de *Cepaea nemoralis* (L.) en tres valles del Pirineo español. Comunicaciones del I Congreso Nacional de Malacología SEM, Madrid: Pgs. 47-49.
Ramos M.A. 1985. Shell polymorphism in a southern peripheral population of *Cepaea nemoralis* (L.) in Spain. Biological Journal of the Linnean Society of London 25: 197-208.
Ramos M.A. 1998. Implementing the Hábitat Directive for mollusc species in Spain. Journal of Conchology, special publication 2: 125-132.
Ramos M.A. y Aparicio 1984. La variabilidad de *Cepaea nemoralis* (L.) y *Cepaea hortensis* (Müll.) en poblaciones mixtas de la Región Central de España. Iberus 4: 105-123.
Ramos M.A., Lobo J.M. y Esteban M. 2001. Ten years inventoring the Iberian fauna: results and perspectives. Biodiversity and Conservation 10: 19-28.
Ramos M.A., Lobo J.M. y Esteban M. 2002. Riqueza faunística de la península Ibérica e islas Baleares. El proyecto 'Fauna ibérica'. En: Pineda F.D., de Miguel J.M., Casado M.A. y Montalvo J. (eds). La Diversidad Biológica de España. Prentice Hall, Madrid. Pgs. 197-207.
Ramos M.A. y Templado J. 2002. Invertebrados no insectos. En: Reyero J.M. (ed.). La Naturaleza de España. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pgs. 190-207.
Ratte H.T. 1985. Temperature and insect development. En: Hoffman K.H. (ed.). Environmental Physiology and Biochemistry of Insects. Springer-Verlag, Berlín: 33-66.
Rawling P., Pro M.J., Pena I., Ortega M.D. y Capela R. 1997. Spatial and seasonal distribution of *Culicoides imicola* in Iberia in relation to the transmission of African horse sickness virus. Medical and Veterinary Entomology 11(1): 49-57.
Rincón P.A. y Lobón-Cerviá J. 1989. Reproductive and growth strategies of the red roach, *Rutilus arcasii* (Steindachner, 1866), in two contrasting tributaries of the River Duero Spain. Journal of Fish Biology 34: 687-705.
Rodríguez Muñoz R. 2000. Reproduccion y desarrollo larvario en una población anadroma de lamprea marina (*Petromyzon marinus* L.). Universidad de Oviedo. 155 pgs.
Rodríguez C. y Bustamante J. 2003. The effect of weather on lesser kestrel breeding success: can climate change explain historical population declines? Journal of Animal Ecology 72: 793-810.
Rodríguez-Berrocal J. 1993. Utilización de los recursos alimenticios naturales. Nutrición y alimentación de rumiantes silvestres. Córdoba: Publ. Fac. Veterinaria UCO.

Rogers D.J. y Randolph S.E. 2000. The global spread of malaria in a future warmer world. Science 289: 1763-1766.

Root T.L. y Schneider S.H. 2002. Climate Change: Overview and Implications for Wildlife. En: Schneider S.H. y Root T.L. (eds.). Wildlife Responses to Climate Change. Island Press Washington. Pgs. 1-56.

Roura N., Suarez A.V., Gómez C., Touyama Y. y Peterson T. 2003. Predicting Argentine ant (*Linepithema humile* Mayr) invasive potential in the face of global climate change. (comunicación en Congreso). Land Open Sciences .Conference: Integrated Research on Coupled Human Environmental Systems. Morelia. México.

Samways M. J. 1994. Insect Conservation Biology. Chapman y Hall, London.

Santos T. y Tellería J. 1995. Global environmental change to and the future of Mediterranean forest avifauna. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (eds.). Global change and Mediterranean type ecosystems. Springer-Verlag, New York. pgs.457-470.

Sanz J.J. 2002. Climate change and breeding parameters of great and blue tits throughout the western Palearctic. Global Change Biology 8: 409-422.

Sanz J.J. 2003. Large scale effect of climate change on breeding parameters of pied flyactchers in Western Europe. Ecography 26: 45-50.

Sanz J.J., Potti J., Moreno J., Merino S. y Frías O. 2003. Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region. Global Change Biology 9: 461-472.

Sarto I., Monteys V. y Saiz Ardanaz M., 2003. Culicoides midges in Catalonia (Spain) with special reference to likely bluetongue virus vectors. Medical and Veterinary Entomology 17: 288-293.

Schöne B.R., Dunca E., Mutvei H. y Norlund, U. 2004. A 217-year record of summer air temperature reconstructed from Freshwater pearl mussels (M. Margaritifera Sweden). Quaternary Science Reviews 23: 1803-1816.

Seco-Fernández M.V., Fereres Castiel A., Denholm C., Barbagallo S., Basky Z., Bell N., Clark S., Coceano P.-G., Cocu N., Colucci R., Derron J., Ferrara V., Gotlin Euljak T., Harrington R., Hatala Zseller I., Hullé M., Katis N., Knight J., Limonta L., Lukášová H., Marrkula I., Maurice D., Mohar J., Pickup J., Rolot J.L., Rounsevell M., Ruszkowska M., Schliephake E., Sigvald R., Stolte T., Tsitsipis J., Ulber B., Verrier P. y Welham, S. 2003. Aprovechamiento de los sistemas de control de áfidos en Europa -EXAMINE (EXploitation of Aphid Monitoring systems IN Europe). XX Jornadas de la Asociación Española de Entomología – AeE.

Seoane J., Viñuela J., Díaz-Delgado R. y Bustamante J. 2003. The effects of land use and climate on red kite distribution in the Iberian peninsula. Biological Conservation 111: 401-414.

Serrano J. 1984. Estudio Faunístico de los Caraboidea del Alto Tajo (Coleoptera Adephaga). Graellsia. 39: 3-30.

Smith B. R. y Tibbles J.J. 1980. Sea lamprey (*Petromyzon marinus*) in Lakes Huron, Michigan and Superior: history of invasion and control, 1936-78. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 37: 1780-1801.

Stefanescu C., Peñuelas J. y Filella 2003. Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediteranean Basin. Global Change Biology 9: 1494-1506.

Stefanescu C., Herrando S. y Páramo F. 2002. Butterfly species richness in the north-west Mediterranean Basin: the role of natural and human-induced factors. Journal of Biogeography 31: 905-915.

Sternberg M., 2000. Terrestrial gastropods and experimental climate change: A field study in acalcareous grassland. Ecological Research, 15: 73-81.

Swift M.J., Andrén O., Brussaard L., Briones M., Couteaux M.-M., Ekschmitt K., Kjoller A., Loiseau P. y Smith P. 1998. Global change soil biodiversity, and nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: three case studies. Global Change Biology 4: 729-743.

Teixeira J. y Arntzen J.W. 2002. Potential impact of climate warming on the distribution of the Golden-striped salamander, *Chioglossa lusitanica* on the Iberian Peninsula. Biodiversity and Conservation 11: 2167-2176.

Tejedo M. 2003. El declive de los anfibios. La dificultad de separar las variaciones naturales del cambio global. En: Rubio X. (ed.). La conservación de los anfibios en Europa. Munibe Suplemento16: 20- 43.

Tellería J. y Santos T. 1994. Factors involved in the distribution of forest birds in the Iberian Peninsula. Bird Study 41:161-169.

Tepedino V.J. y Grsiwold T.L., 1990. Protecting endangered plants. Agricultura Research 38: 16-18.

Templado J., Villena M. y Fernández J. 1995. New invertebrate taxa (insect excluded) described in the Iberian Peninsula and Macaronesia between 1994 and 1996. Graellsia 51: 171-189.

Thomas C.D., Cameron A., Green R.E. y otros 16 autores. 2004. Extinction risk from climate change. Nature 427: 145-148.

Tierno de Figueroa J.M., Sánchez Ortega A., Membiela Iglesias P. y Luzón Ortega J.M., 2003. Plecoptera. En: Ramos M.A. *et al.* (eds.) Fauna Ibérica vol 22.. Museo Nacional de Ciencias Naturales CSIC., Madrid.

Torralba M.M. y Oliva F.V. 1997. Primera cita de *Chondrostoma polylepis* Steindachter 1865 (Ostariophysi Cyprinidae) en la cuenca del río Segura. Limnetica 13: 1-3.

Veiga J.P. 1986. Interannual fluctuations of three microtine populations in Mediterranean environments: the effect of the rainfall. Mammalia 50: 114-116.

Velasco J.C., Rincón P.A. y Lobón-Cerviá J. 1990. Age growth and reproduction of the cyprinid *Rutilus lemmingii* (Steindachner, 1866) in the River Huebra, central Spain. Journal of Fish Biology 36: 469-480.

Verdú J.R. y Galante E. 2002. Climatic stress food availability and human activity as determinants of endemicity patterns in the Mediterranean Region: the case of dung beetles (Coleoptera: Scarabaeoidea) in the Iberian Peninsula. Diversity and Distributions 8: 259-274.

Verdú J.R. y Galante E. 2004a. Thermoregulatory strategies in two closely-related sympatric *Scarabaeus* species (Coleoptera Sacarabaeinae), Physiological Entomology 29: 32-38.

Verdú J.R. y Galante E. 2004b. Behavioural and morphological adaptations for a low quality resource in semi-arid environments: dung beetles (Coleoptera Scarabaeoidea) associated with the European rabbit (*Oryctolagus cuniculus* L Journal of Natural History 38: 708-715.

Villafuerte R. 2002. *Oryctolagus cuniculus* Linnaeus 1758. En: Palomo L.J. y Gisbert J. (eds). Atlas de los mamíferos terrestres de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-SECEM- SECEMU, Madrid. Pgs. 464-467.

Vives E. 2000. Insecta Coleoptera Cerambycidae. En: Ramos M.A. *et al.* (eds.). Fauna Ibérica vol 12. Museo Nacional de Ciencias Naturales CSIC., Madrid.

Wittmann E.J., Melor P.S. y Baylis M. 2001. Using climate data to map the potential distribution of Culicoides imicola (Diptera: Ceratopogonidae) in Europe. Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Épizooties 20 (3): 731-740.

Yom-Tov Y. 2001. Global warming and body mass decline in Israeli passerine birds. Proceedings of the Royal Society London Series B 268: 947-952.

Young I.M., Blanchart E., Chenu C., Dangerfield M., Fragoso C., Grimaldi M., Ingram J. y Jocteur Monrozier L. 1998. The interaction of soil biota and soil structure under global change. Global Change Biology 4: 703-712.

Zuberogoitia I. 2000. La influencia de los factores meteorológicos sobre el éxito reproductor de la Lechuza Común. Ardeola 47:49-56.

7. IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Alfredo Iglesias, Teodoro Estrela y Francesc Gallart

Contribuyentes

J. Andreu Alvarez, L. Hernández Barrios, M. A. Pérez Martín

Revisores

E. Custodio Gimena, F. Ayala Carcedo, V. Fabregat Ventura, O. Llorens García

RESUMEN

El cambio climático con aumento de la temperatura, y en España, disminución de la precipitación, causará una disminución de aportaciones hídricas y un aumento de la demanda de los sistemas de regadío.

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, no solo dependen de las aportaciones que ceda el ciclo hidrológico, condicionadas por el uso y cubierta del suelo, la temperatura y la estructura temporal de la precipitación, sino que es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo, un factor determinante de la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades humanas globales.

La sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de temperatura y disminución de la precipitación es muy alta, precisamente en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas. Las zonas más críticas son las semiáridas, en las que las disminuciones de aportación pueden llegar a ser del 50% de los recursos potenciales de la zona.

La temporalidad en la distribución de precipitaciones y temperaturas incide en la generación de recursos hídricos con mayor entidad, en muchas ocasiones, que los mismos valores medios de estos dos parámetros climáticos.

Para el horizonte de 2030, considerando dos escenarios, uno con aumento de 1ºC en la temperatura media anual y otro con disminución de un 5% en la precipitación media anual y aumento de 1ºC en la temperatura, son esperables disminuciones medias de aportaciones hídricas en España, en régimen natural, entre un 5 y un 14%. Las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares son aquellas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestaría más severamente.

Para el horizonte de 2060 y con un escenario de 2,5 ºC de elevación de las temperaturas y un 8% de disminución de las precipitaciones se prevé una reducción global de los recursos hídricos del 17% como media de la Península junto a un aumento de la variabilidad interanual de los mismos. Estos cambios serán mayores en la mitad sur de España.

Con un escenario extremo (poco probable) en el que se suponga una disminución del 15% de la precipitación media anual y un aumento de 4ºC de la temperatura, la aportación total variaría entre un 5% en Galicia Costa, un 22% en Guadiana II 20% en la cuenca del Júcar, y un 20% en las C.I. Cataluña.

Las principales opciones paliativas van encaminadas a la optimización del uso del agua (gestión de la demanda), la mejora del sistema de recursos hidráulicos y su gestión, en particular del agua subterránea, y al aumento de los recursos no convencionales, cosecha de agua de lluvia o rocío, trasvases entre cuencas, desalación y reutilización.

La variación de los recursos hídricos a consecuencia del cambio climático está condicionada por la influencia de otros sectores también afectados por el cambio climático. A su vez los cambios que se producen en los recursos hídricos afectan a muchos otros sectores de una forma importante, siendo clara y notable en los ecosistemas acuáticos y continentales, en la biodiversidad animal y vegetal, en los sectores agrícola, forestal, energético y turístico, en la salud humana y en los riesgos naturales de origen climático.

En la estimación de recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático existen incertidumbres inherentes tanto a los datos de base, como al proceso de generación de

recursos, siendo los primeros de mayor importancia relativa. Se destacan entre estas incertidumbres los escenarios previsibles, la distribución espacial y temporal de la precipitación, el comportamiento del uso y cubierta del suelo y la recarga de acuíferos y las limitaciones de los modelos de simulación.

El cambio que experimentan los recursos hídricos es detectable con el hábito de medidas establecido en España mediante los sistemas de control, que en unos casos están bien implantados o en vía de mejora y en otros se recomienda su implantación más generalizada. Entre estos últimos se debe mencionar la conveniencia de diseñar e implantar, o mejorar claramente la implantación, de las redes de control de usos del agua, superficiales y subterráneas, y de la red de medidas de caudales en fuentes y surgencias.

La disminución de recursos hídricos incide en un gran número de sectores, cuya regulación se lleva a cabo mediante la definición de políticas concretas. El cambio implicará necesariamente la remodelación y redefinición de nuevas políticas como la científica tecnológica, hidráulica, energética, agrícola, medioambiental y planificación del territorio.

Ante el cambio climático se perfilan como importantes y necesarias las investigaciones tendentes a mejorar las previsiones de precipitaciones y temperaturas y su distribución espacial y temporal, las tendentes a definir métodos de generación de series de datos climáticos basadas en los escenarios, las que propicien mejores y mas fiables métodos de evaluación de evaporaciones y evapotranspiraciones, juego de agua en el suelo, interceptación y reserva de agua utilizable por las plantas, las destinadas a conocer con mas fiabilidad la recarga de acuíferos y el desarrollo de modelos para automatización de calculo de aportaciones y modelos de gestión en cuencas.

7.1. INTRODUCCIÓN

7.1.1. Planteamiento general de los impactos del CC sobre los recursos hídricos

Los recursos hídricos disponibles por la humanidad provienen de un desequilibrio en los continentes, entre el agua de precipitación y la que se evapora o evapotranspira, claramente favorable a la primera que los hace excedentarios. En los océanos el fenómeno es inverso, son deficitarios y la evaporación es aproximadamente un 10% superior a la precipitación. El excedente de los continentes discurre al mar por los ríos y restituye el déficit de los océanos. (Figura 7.1.)

Los recursos hídricos potenciales de que dispone la humanidad para cubrir sus necesidades de todo tipo, depende precisamente de esos excedentes en los continentes, entre el agua de precipitación y el agua que vuelve a la atmósfera.

El agua existente en la naturaleza es constante, por el principio de conservación de la masa, constituyendo un ciclo donde pasa continuamente de estado líquido o sólido a vapor y viceversa. El clima gobierna este ciclo y por tanto los cambios climáticos arrojan necesariamente cambios en el tiempo y en el espacio de los recursos hídricos disponibles.

Cambios en la precipitación condicionan directamente el agua que cae sobre los continentes y cambios en las temperaturas modifican los valores de evaporación y evapotranspiración quedando alterada la cantidad y característica de las escorrentías.

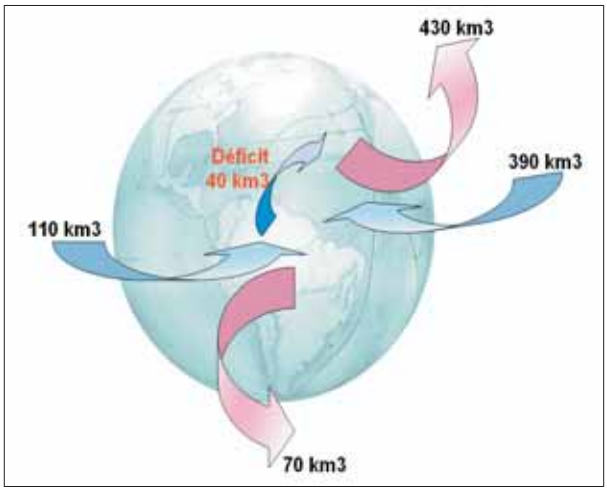


Fig. 7.1. *Balance hídrico global (en miles de km^3).*

En el fenómeno de generación de la escorrentía, el suelo juega un papel de primera importancia mientras que el subsuelo condiciona la parte de esta escorrentía que será subterránea al infiltrarse en los acuíferos.

Habida cuenta de que solo se produce escorrentía cuando el suelo tiene excedentes, o bien la intensidad de precipitación es superior a la capacidad de infiltración, hay que admitir que la distribución temporal y el régimen de las precipitaciones incide sobre la generación de escorrentía tanto o más que el volumen de precipitación en si mismo.

El Cambio Climático tiene, en consecuencia, una influencia directa y de suma importancia sobre los Recursos Hídricos. Los impactos sobre estos recursos se manifestarán no solo en la

variación de la cantidad sino también en la alteración de la calidad y en su distribución temporal.

Un volumen menor de agua disponible, provocaría el empeoramiento de la calidad de las aguas (Programa Nacional del Clima, MOPTMA 1995) y fenómenos como el aumento del nivel del mar asociados al calentamiento global y el descenso de niveles piezométricos en acuíferos conectados hidráulicamente con el mar favorecería los fenómenos de contaminación por intrusión marina.

Las aportaciones hídricas, entendidas como el volumen total de agua contabilizable anualmente en un punto de una cuenca hidrográfica en régimen natural, están inicialmente condicionadas, por la precipitación, la temperatura, el uso y cubierta del suelo y las características del suelo y subsuelo.

Los recursos hídricos, propiamente dichos, entendidos como los volúmenes de agua capaces de dejar satisfechas las necesidades hídricas en cantidad y calidad, en tiempo y en espacio están a su vez condicionados por la explotación, la estructura temporal de la demanda, el sistema de recursos hidráulicos (superficial y subterráneo) disponible y las reglas operativas definidas para el sistema o reglas de gestión del sistema.

Es en definitiva la labor de regulación, suministro, transporte, distribución y protección de la calidad de los Sistemas de Recursos Hidráulicos, tanto superficial como subterráneo, y la manera de manejarlo, lo que constituye el último paso, o grupo de factores, condicionantes de los recursos hídricos realmente aprovechables

Esto trae como consecuencia que existan dos grupos de factores que inciden directamente en la cantidad y calidad de recursos hídricos disponibles los endógenos y los exógenos. (Figura 7.2).

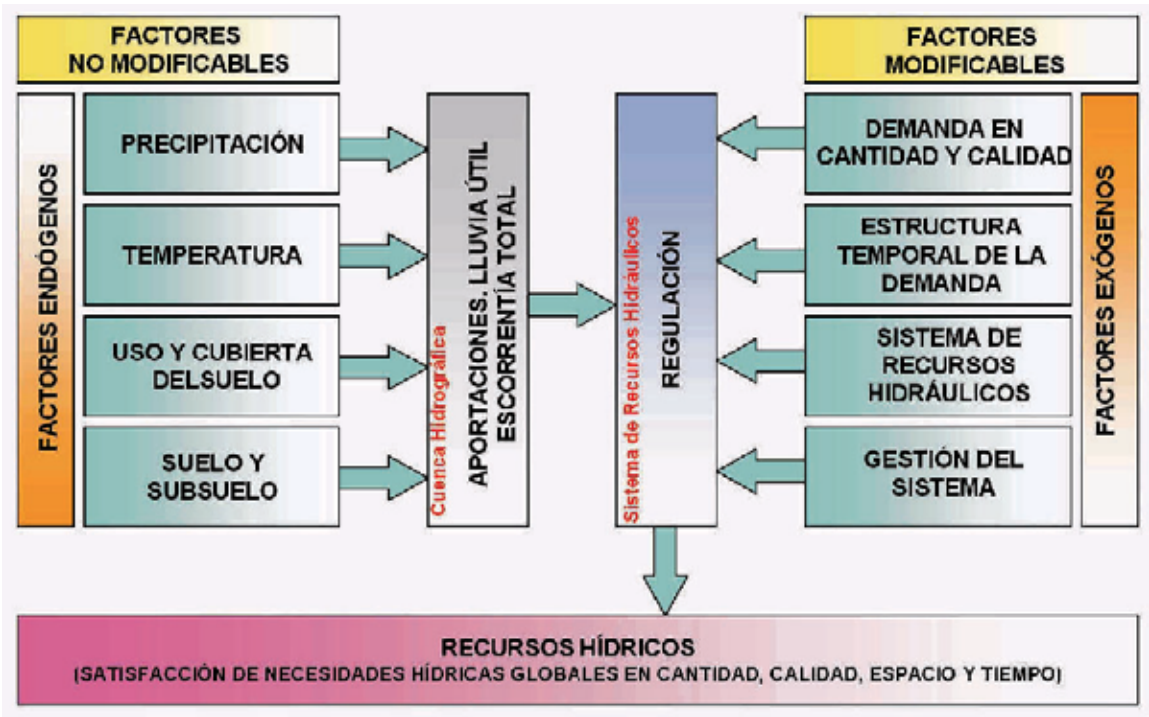


Fig. 7.2. *Cuadro de factores que intervienen en la generación de recursos hídricos.*
** Factores condicionados a la gestión del territorio, usualmente no integrada en la gestión de los recursos hídricos.*

Los primeros tienen la característica de no ser modificables por la acción del hombre y en consecuencia son responsables directos de la variación de las aportaciones en el ciclo hídrico. Solamente hay que exceptuar el uso y cubierta del suelo, factores que condicionan apreciablemente las aportaciones (Bosch y Hewlett 1982) pero cuya gestión se suele llevar a cabo independientemente de la gestión de los recursos hídricos. Estas aportaciones se adecuan a la demanda y su estructura haciendo uso de los sistemas de recursos hidráulicos (superficiales y subterráneos), que son manejados de una manera adecuada mediante las normas de gestión que con frecuencia son diseñadas con el apoyo de los modelos de gestión.

En esencia el cambio climático con aumento de temperatura, y en España, disminución de la precipitación, causará una disminución de las aportaciones hídricas y un aumento de la demanda de los sistemas de regadío. Sin embargo el impacto real dependerá del sistema de recursos hidráulicos disponible y de la manera de manejar el sistema.

Demanda y su estructura, sistema y su manejo son los factores exógenos y modificables que pueden permitir la corrección o adecuación del impacto causado.

Sobre la demanda y su estructura caben acciones de optimización del uso del agua.

Sobre el sistema y su manejo caben opciones de modificación o ampliación del sistema, o bien de mejora de su manejo mediante las operaciones apoyadas por las herramientas de la gestión. (Figura 7.3).

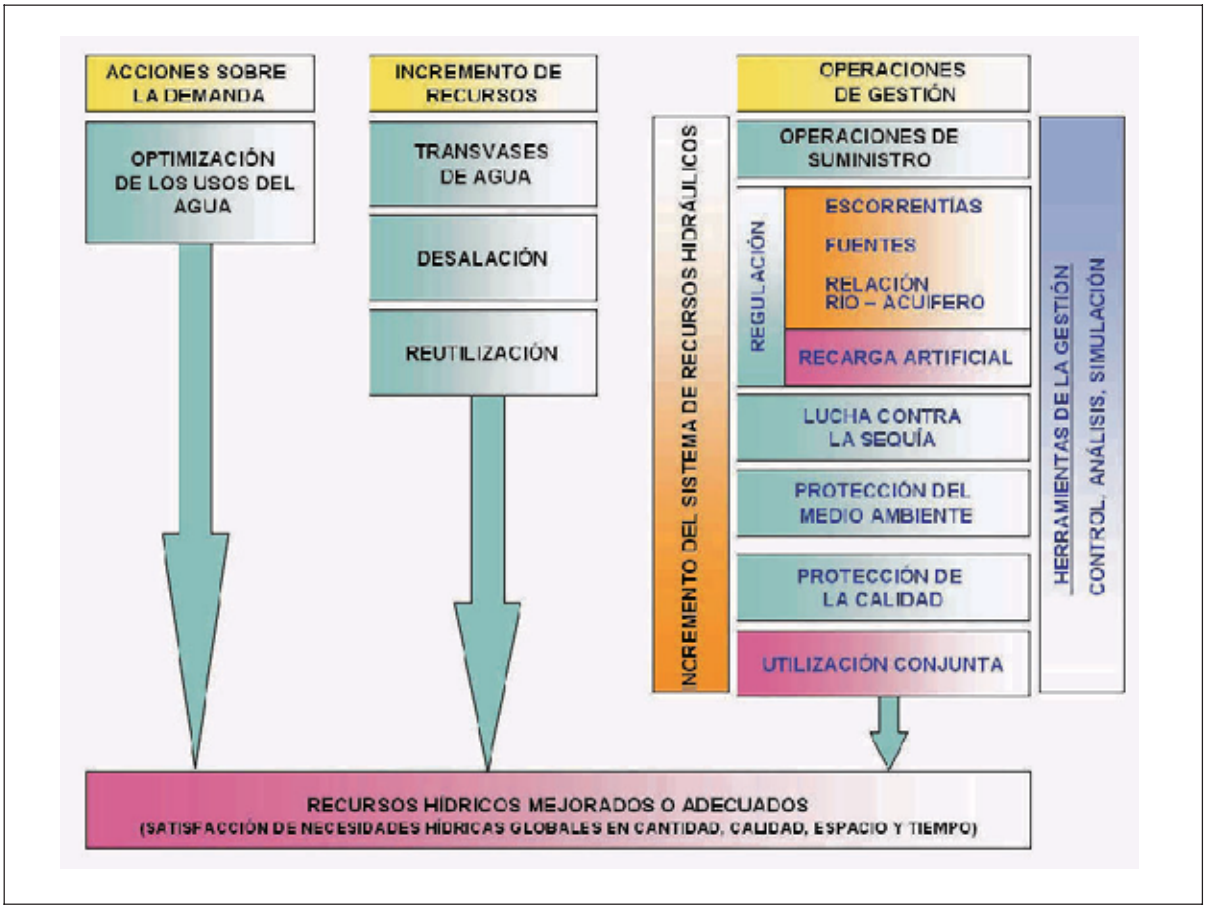


Fig. 7.3. *Cuadro de posibles acciones correctoras en base a la gestión.*

Además de esto siempre cabe la opción, con frecuencia más costosa, de incrementar los recursos disponibles con acciones de trasvase entre cuencas, desalación de aguas salobres o de mar y reutilización de recursos con todos los cuidados y precauciones que ello conlleva.

Una conclusión clara respecto a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, es que se trata de un sistema con un elevado grado de incertidumbre. Los recursos no solo dependen de las aportaciones que ceda el ciclo hidrológico, condicionadas por la cantidad y estructura temporal de la precipitación, la temperatura y el uso y cubierta del suelo, mientras que la demanda depende no solamente del clima sino también de los cambios técnicos y socio-económicos que vayan a producirse en el futuro. Por último, es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo quien, en última instancia, condiciona la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades.

Las conclusiones del proyecto ACACIA en Europa (Parry 2000) respecto a la gestión del agua no son precisamente alentadoras*: "In the water sector, the major policy implication of climate change is that it is no longer possible to assume that the future hydrological resource base will be similar to that of the present. This is important in the context of sustainable water management. Water managers, at all levels, therefore need to (a) develop methodological procedures for adopting a scenario-based approach to strategy or scheme assessment, and (b) develop adaptive techniques that allow incremental adjustments over time. A second major implication is that the amount of climate change might make it more difficult to move to more sustainable management of water resources, particularly in the south of Europe".*

Una conclusión clara respecto a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, es que estos no solo dependen de las aportaciones que ceda el ciclo hidrológico, condicionadas por el suelo, la temperatura y la estructura temporal de la precipitación, sino que es el sistema de recursos hidráulicos disponible y la forma de manejarlo, es el conjunto de factores que en última instancia condicionan la suficiencia o escasez de agua frente a las necesidades humanas globales.

7.1.2. Recursos hídricos en España. Aguas superficiales y subterráneas

Las aportaciones de los ríos al mar en España, han tenido una buena contabilidad a lo largo del tiempo, debido al alto grado de desarrollo del Sistema de Recursos Hidráulicos y a la importancia de disponibilidad de agua en la economía nacional. Sin embargo, la red foronómica no está diseñada para conocer la respuesta hidrológica de los sistemas naturales, sino que está claramente orientada a la gestión operativa de la parte superficial de los recursos.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el alto uso del agua en España, no resulta fácil calcular las aportaciones de los ríos en régimen natural, dado que los caudales que se miden en ellos estarán alterados por las sustracciones para los diversos usos y aplicaciones del agua. Las evaluaciones en régimen natural no se realizan a partir de datos foronómicos sino mediante la utilización de modelos precipitación-escorrentía.

El Libro Blanco del Agua, MIMAM 1998, recoge los datos de las evaluaciones realizadas desde 1967 (Tabla 7.1) donde pueden apreciarse las escasas diferencias entre las realizadas para cada año, hecho que las hace fiables y consistentes.

Estas cifras representan las escorrentías totales, que incluyen aguas superficiales y subterráneas, debiendo entenderse que de las cifras dadas, una parte será escorrentía estrictamente superficial y la otra subterránea.

Sin embargo, hay varios estudios que señalan un descenso significativo de los aportes de los ríos principales durante la segunda mitad del siglo XX (figura 7.4), algunos de los cuales no

pueden justificarse por aumento de los usos consuntivos (Prieto 1996; Flores-Montoya *et al.* 2003; García-Vera *et al.* 2003).

Tabla 7.1. *Estimación de las aportaciones totales en régimen natural.*

Ámbito de Planificación	1967 (a)	1980 (b)	1993 (c)	1998 (d)	1998 (e)
Norte	37.500	38.700	42.088	42.258	44.157
Duero	13.200	15.900	15.168	15.168	13.660
Tajo	8.920	10.250	12.858	12.230	10.883
Guadiana	4.895	5.100	6.155	6.168	5.475
Guadalquivir	7.300	9.400	7.771	7.978	8.601
Sur	2.150	2.690	2.418	2.483	2.351
Segura	884	960	1.000	1.000	803
Júcar	2.950	5.100	4.142	4.142	3.432
Ebro	17.396	18.950	18.198	18.217	17.967
C.I. Cataluña	1.700	3.250	2.780	2.780	2.787
Total Península	**96.895**	**110.300**	**112.588**	**112.424**	**110.116**
Baleares	-	690	745	562	661
Canarias	-	965	965	826	409
Total España	**-**	**111.955**	**114.298**	**113.812**	**111.186**

(a) PG (1967). Recursos Hidráulicos. II Plan de Desarrollo Económico y Social. Presidencia de Gobierno.
(b) MOPU (1980). El agua en España.. CEH. DGOH. También en Heras (1977).
(c) MOPTMA (1993b) Memoria del anteproyecto de Ley del PHN.
(d) 1998 Datos de los Planes Hidrológicos de cuenca.
(e) 1998 Datos de la evaluación realizada en el Libro Blanco del Agua.
Nota: La cifra del Plan de cuenca (columna d) del Ebro no incluye los recursos del Garona y Gallocanta.

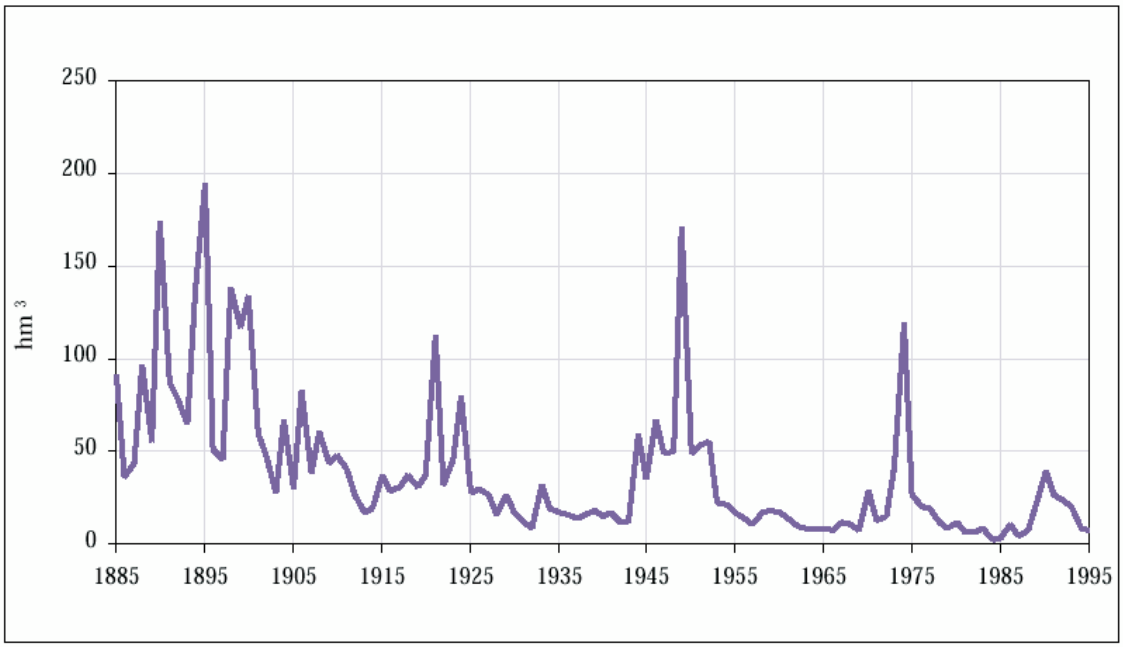


Fig. 7.4. *Serie de aportaciones anuales del río Guadalentín en la presa de Puentes desde 1885 (MMA 1998).*

Los valores de escorrentía subterránea también han sido evaluados en múltiples ocasiones con suficiente rigor, principalmente en los estudios regionales del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas, IGME. Se adjunta en la tabla 7.2, los valores de aportaciones subterráneas para las cuencas hidrográficas de los grandes ríos españoles, sintetizados en el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MOPTMA- MINER 1994).

Tabla 7.2. *Estimación de las aportaciones subterráneas. Fuente: Planes de cuenca y Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MOPTMA-MINER 1994).*

Ámbito de planificación	Superficie permeable aflorante (km2)	Recarga por lluvia y cauces (hm3/año)	Recarga por riegos (hm3/año)
Norte	5.618	2.997	0
Duero	52.799	1.840	1
Tajo	17.475	1.565	0
Guadiana	14.754	787	20
Guadalquivir	15.140	2.573	16
Sur	5.305	865	69
Segura	6.958	674	83
Júcar	23.781	3.011	480
Ebro	17.057	4.433	586
C.I. Cataluña	6.616	938	45
Total Península	**165.503**	**19.683**	**1.300**
Baleares	3.674	517	69
Canarias	7.384	681	0
Total España	**176.561**	**20.881**	**1.369**

En definitiva los ríos españoles aportan al mar en régimen natural unos 110.000 hm^3/año de los que unos 90.000 hm^3 son escorrentía estrictamente superficial y los otros 20.000 hm^3 han transcurrido por los acuíferos y son de origen subterráneo, aunque la estabilidad temporal de estos aportes no ha sido suficientemente estudiada.

7.1.3. Heterogeneidad espacial y temporal de los recursos hídricos en España

La heterogénea distribución espacial y temporal de la precipitación en España, mucho más acusada que en otros países de nuestro entorno, trae como consecuencia una extraordinaria variabilidad de las aportaciones a lo largo del tiempo y también una gran variación de aportaciones en las diversas cuencas hidrográficas.

	ESCORRENTÍA TOTAL	USOS TOTALES
CUENCA NORTE	39.000 hm^3/año	930 hm^3/año
CUENCA SEGURA	900 hm^3/año	1.300 hm^3/año

Fig. 7.5. *Comparaciones entre aportaciones y usos del agua entre cuencas de la España "seca" y "húmeda".*

En la Figura 7.5, se plasman las necesidades y las escorrentías de dos cuencas españolas; Norte y Segura, donde se pone de manifiesto la diferencia en las situaciones para hacer frente a las demandas hídricas. Estas diferencias han sido las responsables de la existencia de las España "seca" y "húmeda".

Tomando como referencia los cuadros del Libro Blanco del Agua, MMA 1998, Figura 7.6 y Figura 7.7, pueden verse las extraordinarias diferencias entre las escorrentías de una y otra cuenca y la variabilidad de la aportación en el tiempo.

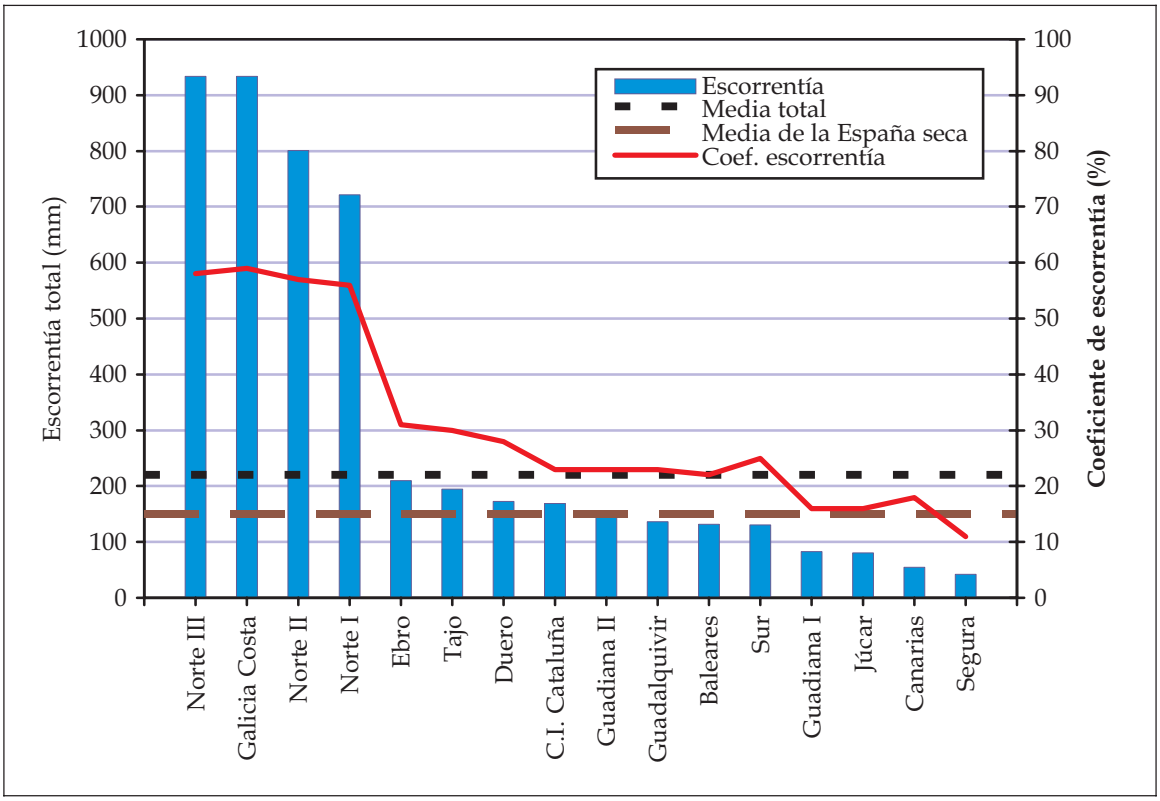


Fig. 7.6. *Escorrentías medias totales anuales (mm) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos. Según Libro Blanco del Agua. MMA 1998.*

Las cuencas del Norte tienen excelentes valores de escorrentía frente a las demás y principalmente las del Segura, Júcar, Canarias y Guadiana I. Pero es precisamente en estas últimas cuencas, donde los usos consuntivos del agua, principalmente en regadío son más elevados.

La Figura 7.7. muestra los valores de la escorrentía en España, simulada en régimen natural para la serie 1940/41-1995/96, donde pueden verse mínimos de 50.000 hm^3/año y máximos de 220.000 hm^3/año, para una media de 110.000. Esto, la heterogeneidad temporal es otro de los grandes problemas de los recursos hídricos en España; la certeza de lo que aportará el ciclo hidrológico cada año es un factor de incertidumbre de muy alta incidencia. A estos problemas de base solo se les puede hacer frente gracias a un sistema de recursos hidráulicos de envergadura y además convenientemente manejado.

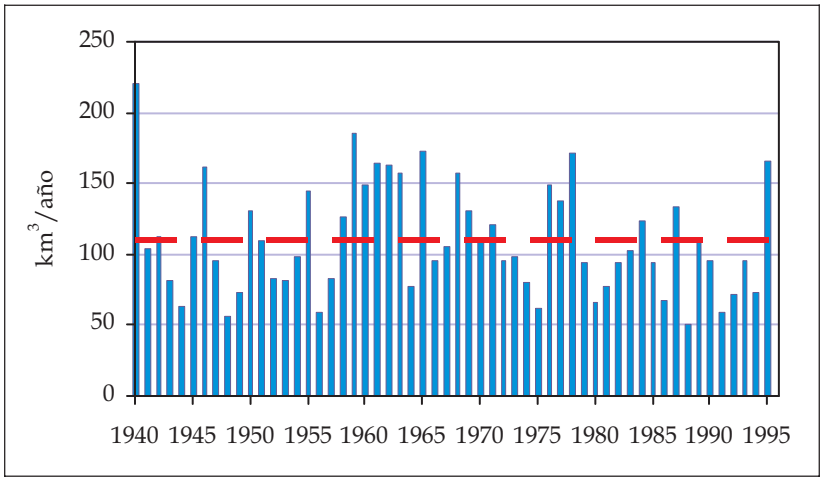


Fig. 7.7. *Serie de aportaciones totales anuales en régimen natural en la España peninsular (periodo 1940/41-1995/96).*

7.1.4. Usos y aplicaciones del agua en España

España es un país con una enorme tradición en materia de usos del agua. Principalmente su desarrollada agricultura y alto potencial hidroeléctrico han condicionado la construcción de una gran cantidad de embalses y captaciones de aguas subterráneas.

En muchos regadíos existen vestigios romanos y seguramente se iniciaron en tiempos anteriores, pero fueron los aprovechamientos hidráulicos de los árabes los que dieron origen a las ricas y fecundas vegas de Granada, Valencia, Murcia y Aragón.

El origen del espectacular desarrollo actual hay que buscarlo seguramente en algunos hombres públicos del último tercio del siglo XIX, singularmente Joaquín Costa y Macías Picavea, que propugnaron una decidida acción de gobierno en el sentido de regular las aportaciones hídricas y ampliar las zonas regadas como meta preferente de la política económica general.

En el cuadro de la Figura 7.8, se sintetizan algunos de los problemas seculares del uso del agua en España.

EL CLIMA:	Factor de desarrollo y factor de agresión
PRECIPITACIONES:	Bajas y anárquicas en tiempo y espacio
ESTRUCTURA ECONÓMICA:	Fuerte participación agrícola y turística
DOTACIONES DE LOS CULTIVOS:	Altas
ESCORRENTÍAS DE ESTÍO:	Bajas
EL DESARROLLO ECONÓMICO:	Rápido
EL PODER:	Caos, freno, confusión y "sobreexplotación"

Fig 7.8. *Cuadro de problemas seculares del uso del agua en España*.

Sin embargo el uso del agua en España ha tenido siempre unos problemas muy conocidos principalmente debidos a su clima, en gran parte semiárido, a la heterogeneidad espacial y temporal de la precipitación y, desde luego a su estructura económica con fuerte participación

agrícola, que demanda grandes volúmenes de agua justo en las épocas de estío, cuando no la hay.

Algunos ejemplos muy significativos permiten comprender las dificultades y complejidades del uso del agua en España, y sobre todo el extraordinario volumen de agua que se precisa con carácter anual.

En la Figura 7.9 se exponen estos ejemplos; en el primero se puede ver (Moreno Torres 1982) como en España la parte de superficie regable que es efectivamente regada, dobla a la media mundial. Un uso consuntivo como es el regadío está tan extendido en nuestro país que los afanes por esta actividad son el doble que la media de los demás países.

En el segundo caso se hacen algunas comparaciones globales, muy generales, entre los usos del agua y las aportaciones de España y Francia.

Francia, un país más grande en extensión y con un desarrollo superior al español, tiene unos usos totales del agua muy inferiores y sin embargo las aportaciones de los ríos franceses son sustancialmente superiores a la de los españoles.

En este contexto Francia, consume en regadíos el 25% que España, siendo el uso para regadíos el más difícil de dejar satisfecho, dado que las demandas de agua son en estío mientras las aportaciones se generan en épocas húmedas.

	MUNDO	ESPAÑA
SUPERFICIE CULTIVADA	4.000 M ha	21 M ha
SUPERFICIE REGABLE	1.000 M ha	5 M ha
SUPERFICIE REGADA	250 M ha (25%)	2.5 M ha (55%)

	FRANCIA	ESPAÑA
USOS TOTALES (1975)	15 km^3	25 km^3
USOS AGRÍCOLAS	5.2 km^3	21.5 km^3
ESCORRENTÍA TOTAL	180 km^3	110 km^3
CAPACIDAD DE EMBALSE	7 km^3	40 km^3

Fig 7.9. *Comparaciones de los usos del agua en España y en Francia y la frecuencia de regadíos españoles con algunas cifras a nivel mundial.*

Esto hace que mientras el sistema español de recursos hidráulicos sea algunos años insuficiente con más de 40 km^3 de capacidad de embalse, el sistema francés sea muy suficiente con solo 7 km^3.

En la tabla 7.3 se detallan los aportes totales anuales, los consumos netos una vez descontados los retornos, y la relación entre consumos netos y aportes totales.

Tabla 7.3. *Aportes y consumos anuales. Fuente: Libro Blanco del Agua en España, MMA (1998).*

ámbito	aportes hm^3	consumo hm^3	relación %
Norte III	5.614	98	2
Galicia Costa	12.245	479	4
Norte II	14.405	145	1
Norte I	13.147	403	3
Ebro	18.647	5.361	29
Tajo	11.371	(1) 2.328	20
Duero	14.175	2.929	21
C.I. Cataluña	2.728	493	18
Guadiana II	1.053	121	11
Guadalquivir	9.09	2.636	29
Baleares	696	171	25
Sur	2.359	912	39
Guadiana I	4.624	1.756	38
Júcar	3.335	1.958	59
Canarias	394	244	62
Segura	(1) 1.411	1.350	96
España	113.998	20.613	18

(1) Se ha tomado el valor nominal de 600 hm^3 del ATS

El consumo del 20% de los recursos hidráulicos renovables totales se considera como el límite de la sobreexplotación de un sistema (Falkenmark y Lindh 1976). Según este criterio, y tomando los aportes medios anuales como recursos totales, la mayor parte de las cuencas sobrepasan el límite de la sobreexplotación.

En resumen, puede indicarse que en España, los recursos de agua están sobreutilizados en la mayor parte de las cuencas y que principalmente la agricultura es un uso prioritario que no solo demanda volúmenes muy grandes sino que los demanda en las épocas que no los proporciona el ciclo hidrológico, requiriéndose un bien desarrollado sistema de recursos hidráulicos, para poder hacer frente a las necesidades planteadas.

Un país de estas características se hace muy sensible a las disminuciones que puedan presentar los recursos hídricos inherentes al cambio climático.

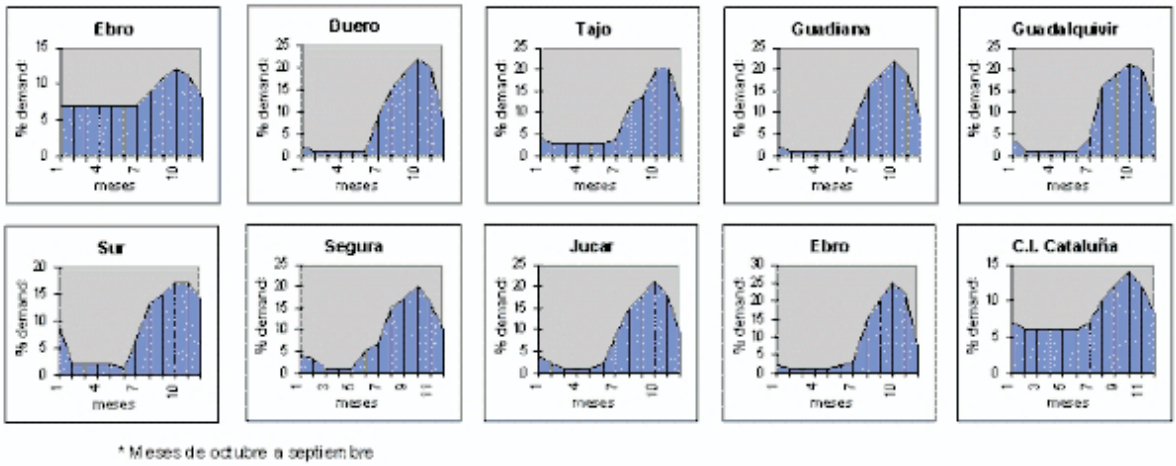
7.1.5. El binomio recursos- demandas, regulación y sistemas de recursos hidráulicos

Dejar satisfechas las necesidades hídricas en cantidad, calidad, espacio y tiempo implica disponer de un sistema de recursos hidráulicos, que permita adecuar las aportaciones a la estructura de la demanda. Aportaciones cuya estructura temporal está condicionada por el ciclo hidrológico y demandas, cuya estructura viene fijada por los diversos usos y aplicaciones del agua.

Los recursos hídricos en España, se presentan generalmente bajos para las épocas en que se precisan. Baste indicar que de los 110.000 hm^3 que suponen la escorrentía total anual, solo unos 10.000 discurren por los ríos en los meses de estío, donde los usos agrícolas demandan más de 24.000 hm^3.

En la Figura 7.10 se representa la distribución porcentual de la demanda en las diversas cuencas españolas, donde puede verse su heterogeneidad y falta de regularidad.

Cuenca	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	
Norte	7	7	7	7	7	7	7	9	11	12	11	8	100
Duero	2	1	1	1	1	1	9	15	19	22	20	8	100
Tajo	4	3	3	3	3	3	4	12	14	20	20	11	100
Guadiana	2	1	1	1	1	1	8	16	19	22	19	9	100
Guadalquivir	4	1	1	1	1	1	4	16	19	21	20	11	100
Sur	9	2	2	2	2	1	6	13	15	17	17	14	100
Segura	4	3	1	1	1	5	7	15	17	20	16	10	100
Jucar	4	2	1	1	1	2	8	15	16	21	18	9	100
Ebro	2	1	1	1	1	2	3	15	20	25	22	7	100
C.I. Cataluña	7	6	6	6	6	6	7	10	12	14	12	8	100



* Meses de octubre a septiembre

Fig. 7.10. *Distribución porcentual de la demanda en las diversas cuencas españolas.*

Existen cuencas como Ebro, Guadalquivir y Guadiana que prácticamente el 90% de sus necesidades se centran en los meses de mayo a septiembre. Este cuadro de heterogeneidad temporal, no parece que pueda hacer otra cosa que agravarse ante las perspectivas de heterogénea distribución de la precipitación que se presenta con el cambio climático. En síntesis, la regulación en España, para dejar satisfechas las necesidades hídricas, es una regulación dura y difícil, siendo previsible que el cambio climático empeore la situación.

7.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

7.2.1. Relaciones entre clima, suelo, usos del suelo y aportación. Índices de escorrentía

Tal y como se ha indicado, la generación de aportaciones esta fundamentada en el juego entre el binomio clima y superficie (suelo y cubierta). La capacidad de retener agua por parte del suelo, y de ser utilizada por las plantas, trae como consecuencia que el agua de precipitación, o una parte de ella quede retenida a expensas de que las plantas la evapotranspiren. La reserva de agua utilizable por las plantas, que es función de la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y profundidad radicular media, incorpora agua de precipitación y devuelve agua a la atmósfera por evapotranspiración de un modo continuo llenándose o vaciándose, según sean superiores las entradas o las salidas, hasta que se llega a un punto en que el suelo no admite mas agua, se llena la reserva y se genera la escorrentía o la recarga de los acuíferos con los excedentes. Las características de la vegetación también determinan los intercambios de agua y energía, no sólo por la profundidad de las raíces sino también por la biomasa aérea y la rugosidad aerodinámica.

El índice de escorrentía de una cuenca, entendido como la relación entre la aportación o escorrentía medida en una cuenca y el volumen de precipitación total caída sobre ella, varía en consecuencia siendo menor cuanto menor es la precipitación y mayor la evapotranspiración potencial inherente a la elevación de temperaturas. El índice de escorrentía también aumenta, a iguales condiciones climáticas, con las características de los suelos o de la vegetación que

disminuyen los retornos a la atmósfera, como el menor espesor de suelo, la menor capacidad de campo, o también la menor profundidad radicular media, biomasa aérea o rugosidad aerodinámica.

7.2.2. Estudio de la sensibilidad unitaria. Influencia sobre la aportación de las variaciones unitarias de la temperatura media y la precipitación anual.

Siempre a efectos de orientación teórica, pueden buscarse procedimientos para la estimación de cual puede ser la sensibilidad de la aportación a variaciones unitarias en los parámetros del cambio climático, precipitación y temperatura.

Con esta óptica, se han efectuado los cálculos de escorrentía, por el método de Turc, para valores de precipitación anual entre 200 y 900 mm anuales y de temperatura diaria media anual diaria entre 10º C y 30º C.

En los cuadros de la figura 7.11, se representan las disminuciones porcentuales de la aportación entre los citados rangos de valores de precipitación y temperatura, para las siguientes hipótesis:
- Aumento de la temperatura 1º C
- Aumento de la temperatura 2,5º C
- Disminución de la precipitación un 10%
- Aumento de la temperatura 1º C y disminución de la precipitación un 10%

El simple análisis de los cuadros, pone de manifiesto que la sensibilidad es muy alta, precisamente en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas. Es decir; en las zonas de España con precipitaciones más altas y temperaturas medias las disminuciones de aportación bajo los escenarios propuestos alcanzan valores casi siempre inferiores al 4% o 5%.

Sin embargo en las zonas más críticas, que pueden ser calificadas de semiáridas, con precipitaciones entre 200 y 400 mm y temperaturas medias diarias anuales sobre 18 o 20 ºC, las disminuciones de aportación pueden ser tan graves que pueden dejar en la mitad los recursos potenciales de la zona.

En España un elevado número de sitios con escasez de precipitaciones y temperaturas altas lo que condiciona una sensibilidad alta, en términos generales, a los cambios del clima que se estudian.

Este tipo de cálculos son simples orientadores, que tienen valor como análisis de sensibilidad, pero que pueden ser de utilidad para plantear los distintos escenarios.

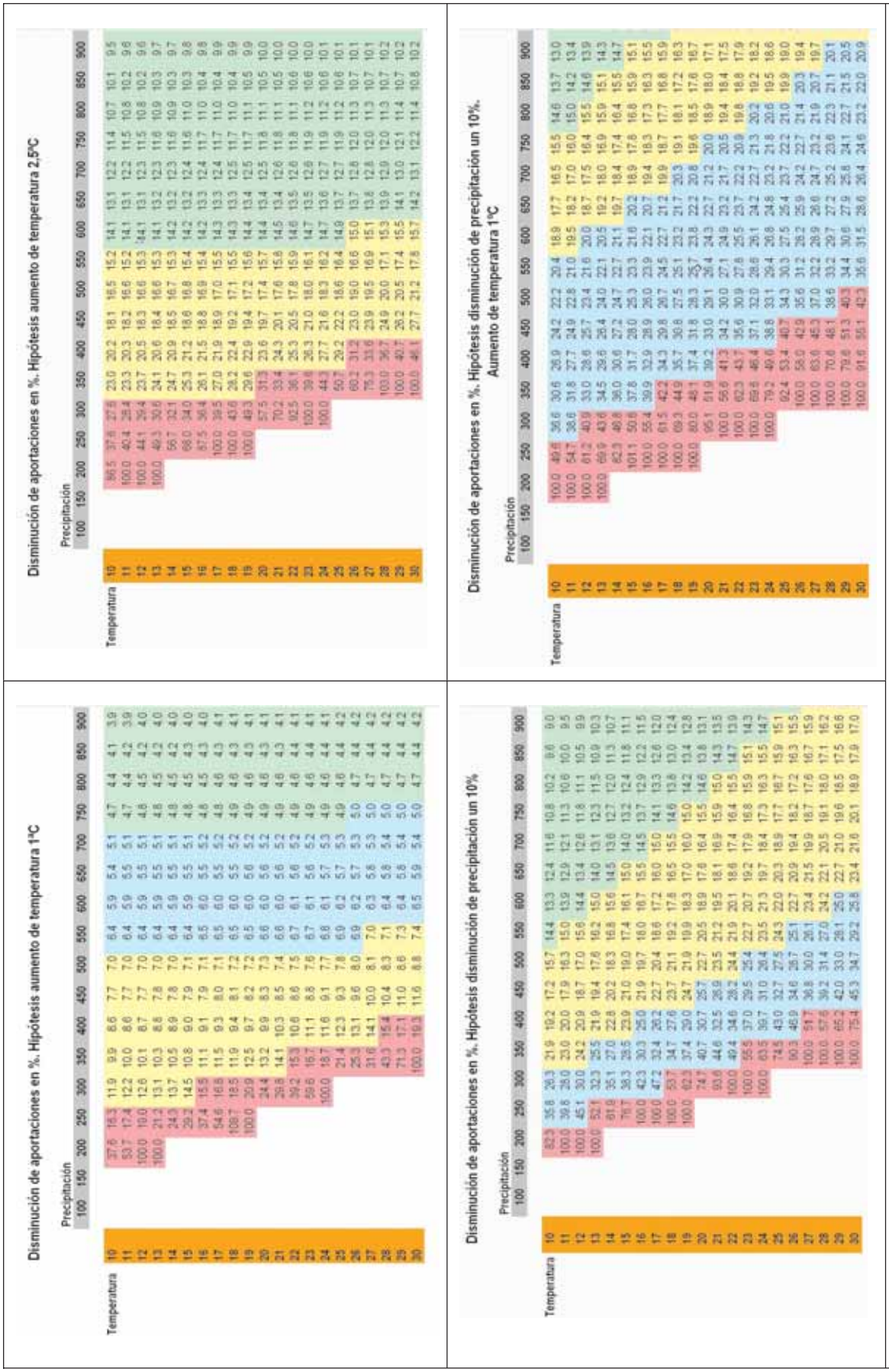


Fig. 7.11. Disminución de aportaciones con hipótesis diversas de aumento de temperatura y disminuciones de precipitación.

7.2.3 Sensibilidad a las variaciones estacionales de precipitación y temperatura

Los recursos hídricos no se generan en un momento instantáneo concreto del tiempo, ni tampoco de una forma regular a lo largo del año. Tienen periodos en los que su generación es posible, en función de las temperaturas y precipitaciones de este periodo y del estado de saturación del suelo entre otros factores.

Ello hace que la temporalidad en la distribución de precipitaciones y temperaturas incida en la generación de recursos hídricos con mayor entidad, en muchas ocasiones, que los mismos valores medios de estos dos parámetros climáticos.

En términos generales y pensando en la mayor parte de la superficie de España, los recursos hídricos se generan en los meses más fríos o con mayor precipitación siempre que no hayan ascendido excesivamente las temperaturas. Es decir; en verano con temperaturas y evapotranspiraciones altas, la mayor parte del agua que es capaz de retener el suelo es utilizada por las plantas. El suelo está seco o en bajo estado de saturación y no se producen recarga ni escorrentías significativas. En los meses más fríos la evapotranspiración es muy baja y por tanto la demanda de agua de las plantas es también baja mientras que el exceso de aportación satura el suelo y se producen los excedentes.

Si las temperaturas aumentan solo en verano muy probablemente el volumen de escorrentía no disminuiría apreciablemente, dado que no se produciría escorrentía ni antes ni después del posible cambio climático. El mismo razonamiento cabe si se asumen disminuciones de la precipitación pero solo para los meses de verano; daría igual a nivel de generación de escorrentía, salvo en que el déficit de agua de los regadíos sería mas acusado.

La falta de conocimiento en la estimación de la distribución mensual de la precipitación y la temperatura, condiciona que no se puedan hacer cálculos orientativos. Sin embargo a nivel conceptual puede indicarse que la generación de recursos hídricos es cualitativamente muy sensible al modo en que se distribuyan precipitaciones y temperaturas a lo largo del año.

7.2.4. Sensibilidad a sucesos extremos; sequías y avenidas

Suponiendo que los cambios de precipitación y temperatura fueran aproximadamente lineales, un aumento de la temperatura y una reducción de la precipitación se combinarían en un aumento de la frecuencia y severidad de las sequías hidrológicas. El aumento de la demanda evapotranspirativa relacionado con el calentamiento representará un aumento de los retornos a la atmósfera, así como unas condiciones antecedentes más secas de los suelos durante los eventos lluviosos, de modo que cabe esperar una reducción de la escorrentía y de la recarga de los acuíferos, al mismo tiempo que un empeoramiento de la calidad del recurso, debido a una menor dilución. Un aumento de la frecuencia y severidad de las sequías en el último decenio ha sido ya observado en algunas zonas del Globo, especialmente en África y Asia. Por otra parte los modelos climáticos predicen un aumento de la frecuencia de las situaciones de sequía pluviométrica para el próximo futuro, sobre todo en zonas continentales de altitud media (IPCC 2001).

Sin embargo, las crecidas y avenidas no siguen este patrón relativamente sencillo. Un calentamiento de las temperaturas y un ligero descenso de las precipitaciones tendría poca influencia en la frecuencia y magnitud de las crecidas. Sin embargo, hay evidencias de que las precipitaciones extremas han aumentado ligeramente durante las últimas décadas en diversas áreas del Globo (IPCC 2001) y en particular en algunos sectores del Pirineo (Beguería 2003). Las predicciones de los modelos climáticos no son adecuadas para la predicción de avenidas, ya que no son capaces de simular los eventos a la escala temporal adecuada; sin embargo, se señala como muy probable un aumento de las precipitaciones extremas como resultado de una

actividad climática más acelerada. Por otra parte, en las áreas donde una parte significativa de la precipitación es en forma de nieve, cabe esperar un adelanto de la estación de fusión como consecuencia del calentamiento global, lo que puede causar cambios en la magnitud de las crecidas si coincide el período de fusión con un periodo de precipitaciones más copiosas.

Por último, cabe señalar algunos posibles efectos indirectos del cambio climático sobre la generación de crecidas y la erosión de los suelos. En un escenario de calentamiento global y de aumento de la sequía estival, cabe esperar una degradación de la cubierta vegetal y un aumento de la frecuencia de los incendios forestales. Estas condiciones pueden representar un aumento de la frecuencia y severidad de las crecidas y de los fenómenos de erosión de los suelos en cuencas de pequeño tamaño.

7.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

7.3.1. Introducción a las relaciones Clima – Hidrología

Una modificación de la temperatura o de la precipitación debida a un cambio climático repercutiría sobre los recursos hídricos de un territorio, pues, a largo plazo, sus recursos renovables son igual a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

Si, de acuerdo con los escenarios climáticos disponibles para España, las precipitaciones anuales disminuyen ligeramente y las temperaturas aumentan, se producirá en el futuro una disminución de los recursos hídricos.
Por otra parte, las tendencias que se apuntan para España son de una mayor irregularidad temporal de las precipitaciones, lo que repercutiría negativamente en el régimen de las crecidas y en la regulación de los ríos.

No solo los aspectos cuantitativos del agua son afectados por un cambio en el clima, los aspectos relacionados con la disminución de la calidad de la misma pueden verse acentuados si se produce un descenso en cantidad del recurso. Un menor volumen de agua disponible provocaría el empeoramiento de la calidad de las aguas y el descenso de los niveles piezométricos en los acuíferos, lo que en zonas costeras, facilitaría la intrusión marina, hecho además favorecido por el aumento del nivel del mar.

Algunos procesos físico-químicos y biológicos en el agua dependen de la temperatura, como por ejemplo, el desarrollo de las algas, que aumentaría con la temperatura, produciendo un mayor consumo de oxigeno en su descomposición. Todo ello puede afectar a la calidad del agua en embalses que se vería afectada por la reducción de las concentraciones de oxigeno y por la disminución de aportaciones a los mismos.

7.3.2. Definición de escenarios para evaluar el impacto sobre los recursos hídricos

7.3.2.1. Introducción

Un escenario se define como una representación plausible de una variable o conjunto de variables en el futuro (población mundial, actividad industrial, emisión de CO_2, nivel medio del mar, temperatura, precipitación, etc…), que puede ser construida sobre la base de diferentes supuestos o de evoluciones históricas en el pasado. De esta forma un escenario climático se define como una representación plausible del clima futuro (fundamentalmente en cuanto a las variables de temperatura y precipitación), que puede ser construido sobre la base de otros escenarios.

Debido a que existen numerosas incertidumbres relacionadas con múltiples factores que regulan el comportamiento del sistema climático, no es recomendable utilizar un escenario

climático como si fuera una predicción meteorológica a corto plazo. Ante esta situación, es aconsejable representar el clima futuro utilizando una gama de proyecciones que cubran un amplio espectro de incertidumbres.

7.3.2.2. Tipos de escenarios

Los escenarios climáticos utilizados para evaluar el impacto de un cambio climático sobre los recursos hídricos se construyen teniendo en cuenta escenarios socioeconómicos, de uso del suelo, ambientales o de emisión y ofrecen como resultado los cambios previsibles en las variables que intervienen en el ciclo hidrológico. Las más estudiadas son la temperatura y la precipitación, aunque también otras variables, como la radiación solar, la velocidad del viento o la humedad relativa pueden ser de gran interés.

Para las evaluaciones de los impactos en los recursos hídricos se emplean tres tipos distintos de metodologías para la definición de escenarios climáticos.

- *Los escenarios incrementales o sintéticos* son simples ajustes del clima de referencia (clima actual) con arreglo a cambios futuros previstos (aumento de 1º o 5º de la temperatura, disminución de un 5% o 10% de la precipitación, etc…). Estos escenarios están basados en algunas ocasiones en los resultados de los escenarios de los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA).

- *Los escenarios analógicos* son la representación analógica de un clima que ha cambiado a partir de registros anteriores o registros de otras regiones.

- *Los escenarios de los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA).* Son los más utilizados en la actualidad y los que presentan mayor fiabilidad. Generan escenarios climáticos indicando las variaciones respecto a un clima de referencia, inicialmente basado en las observaciones regionales del clima realizadas por la Unidad de Investigación del Clima (Climate Research Unit, CRU) de la Universidad de East Anglia en el Reino Unido durante el período 1961-1990. Actualmente estos estudios para definir el clima de referencia se han extendido al periodo comprendido entre 1900 y 1990.

7.3.2.3. Escenarios de Cambio Climático para España

En las figuras 7.12 y 7.13, se muestran las variaciones estacionales en la temperatura y la precipitación obtenidas para España con 7 modelos MCGA-OA procedentes de distintos institutos de investigación de diferentes países. Estos modelos proyectan, para mediados del siglo XXI, un calentamiento para España comprendido entre 1.0 y 5.0 °C y una disminución de las precipitaciones hasta 40 mm en los meses de verano.

Los resultados sobre temperaturas en la península ibérica, a partir de estos modelos globales, representan variaciones siempre positivas mientras que en el caso de las precipitaciones estas variaciones son moderadas y se mueven en ambos sentidos.

Uno de los modelos MCGA-OA más conocido es el modelo UKMO (United Kindom Meteorological Model del Hadley Centre for Climate Research de Bracknell, Reino Unido), que es un modelo que utiliza celdas con una resolución horizontal de 2.5ºC x 3.75ºC en latitud-longitud (en la Península Ibérica corresponde a celdas de 280 km de ancho por 320 km de altura, ver figura adjunta).

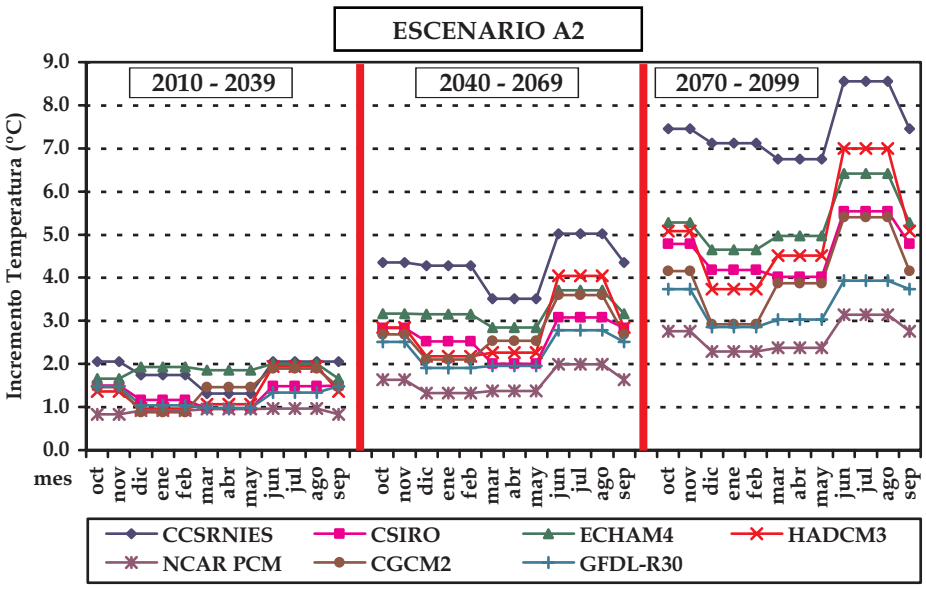


Fig. 7.12. *Incremento de temperaturas escenario A2 (IPPC).*

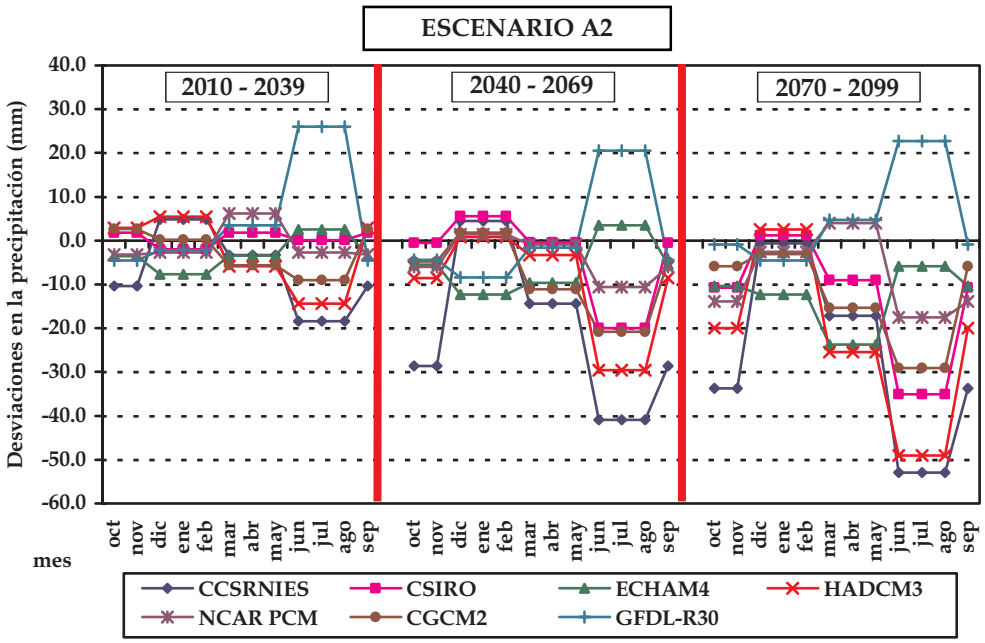


Fig. 7.13. *Variación de las precipitaciones escenarios A2 (IPPC).*

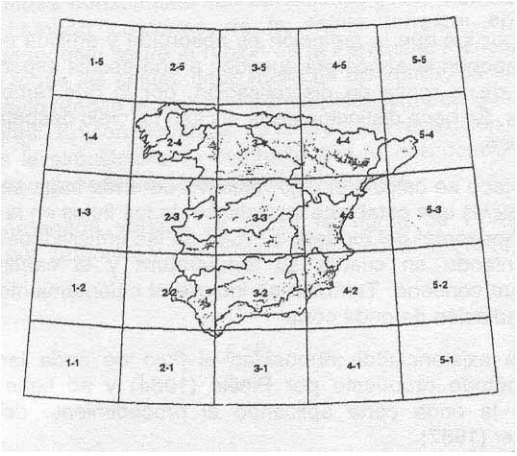


Fig. 7.14. *Esquema de las celdas del modelo UKMO para España.*

Los datos utilizados por este modelo proceden de dos escenarios de clima futuro: el clima con las condiciones de CO_2 actuales ($1xCO_2$) y el clima con condiciones de doble CO_2 equivalente ($2xCO_2$). En ambos casos pertenecen al mismo intervalo de tiempo, del año 2040 al 2049, que corresponden a los diez años a partir de los cuales se dobla el CO_2 en el segundo escenario.

Las salidas del modelo UKMO consisten en las medias mensuales de cada año de la temperatura máxima (ºC), la temperatura mínima (ºC), la precipitación (mm), la velocidad del viento (m s^{-1}) y la humedad relativa (%).

Estos escenarios climáticos se caracterizan en España por un aumento de la temperatura al duplicarse la concentración de CO_2 atmosférico. La precipitación, sin embargo, aumenta en unos casos y disminuye en otros, con diferencia entre estaciones, dándose en general una reducción de la precipitación durante los meses de verano y un aumento en el resto del año (ver tabla 7.4).

CELDA	TMAX		TMIN (ºC)		TMED (ºC)		PRECIP (mm)		SRAD(MJ/m2)	
	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2	1xCO2	2xCO2
2-2	22,6	26,5	11,5	15,1	17,0	20,8	347,1	402,9	7360,6	7079,1
2-3	18,8	22,6	8,7	12,1	13,8	17,4	749,7	853,8	6198,5	6170,5
2-4	14,1	17,4	7,0	9,8	10,6	13,6	1502,1	1502,7	4254,2	4492,9
3-2	19,2	23,6	8,3	12,1	13,8	17,8	594,0	528,0	6638,2	6684,6
3-3	14,8	19,2	5,5	9,0	10,1	14,1	950,7	860,4	5205,0	5702,4
3-4	12,7	16,1	5,5	8,5	9,1	12,3	833,4	662,1	4356,0	4843,6
4-2	19,5	22,7	17,0	20,1	18,2	21,4	118,8	94,5	8872,0	8472,6
4-3	17,7	21,4	8,1	11,7	12,9	16,6	345,0	345,3	6665,4	6478,6
4-4	12,9	17,0	5,6	8,9	9,2	12,9	1043,7	892,2	4200,1	4786,0

Valores medios del período 2040-2049

CELDA	TMAX		TMIN (ºC)		TMED (ºC)		PRECIP (mm)		SRAD(MJ/m2)	
	F-A	F/A	F-A	F/A	F-A	F/A	F-A	F/A	F-A	F/A
2-2	3,9	117,3	3,6	131,3	3,8	122,4	55,8	116,1	-281,5	96,2
2-3	3,8	120,2	3,4	139,1	3,6	126,1	104,1	113,9	-28,0	99,5
2-4	3,3	123,4	2,8	140,0	3,0	128,3	0,6	100,0	238,7	105,6
3-2	4,4	122,9	3,8	145,8	4,0	129,0	-66,0	88,9	46,4	100,7
3-3	4,4	129,7	3,5	163,6	4,0	139,6	-90,3	90,5	497,4	109,6
3-4	3,4	126,8	3,0	154,5	3,2	135,2	-171,3	79,4	487,6	111,2
4-2	3,2	116,4	3,1	118,2	3,2	117,6	-24,3	79,5	-399,4	95,5
4-3	3,7	120,9	3,6	144,4	3,7	128,7	0,3	100,1	-186,8	97,2
4-4	4,1	131,8	3,3	158,9	3,7	140,2	-151,5	85,5	585,9	113,9

Diferencia (F-A) y relación (F/A) entre clima con doble (F) y simple (A) CO2

Resumen de los resultados del modelo de circulación general UKMO.

Tabla 7.4. *Resultados del modelo UKMO para España.*

Aunque en su estado de conocimiento actual los MCGA-OA no proporcionan una respuesta suficientemente precisa de los cambios en el sistema climático debidos a una variación en las concentraciones en la atmósfera del CO_2 y otros GEI, no obstante, son las únicas herramientas de que se dispone para obtener patrones de respuesta climática ante diversas acciones exógenas y por esta razón se sigue trabajando en el desarrollo de métodos y procesos cada vez más precisos que puedan incorporarse en ellos. La mayoría de estos modelos resuelven ecuaciones similares, pero entre ellos existen diferencias en cuanto a la resolución temporal, la física de las interconexiones, el tratamiento de las nubes, la representación del océano, etc., lo que explica algunas de las discrepancias en sus resultados.

Para responder a las preguntas sobre el impacto de un posible cambio climático sobre los recursos hídricos de un territorio se requieren resoluciones temporales y espaciales cada vez mayores, así como información sobre un mayor número de variables (evapotranspiración, temperaturas máximas y mínimas, escorrentías, etc.), requerimientos que no parece razonable exigir a los MCGA-OA. Por esta razón se están desarrollando modelos climáticos regionales.

El modelo PROMES (Pronóstico a Mesoescala) es un modelo regional de ecuaciones primitivas, hidrostático y completamente comprensible. PROMES parte de los campos de salida del MCG del Hadley Centre for Climate Prediction and Research conocido como HadCM2.

El objetivo básico del modelo regional de clima PROMES es generar los campos atmosféricos necesarios que sirvan como entrada para los diferentes modelos de simulación de recursos hídricos o en otra área específica. Tanto para las condiciones de clima actual ($1xCO_2$) como para un escenario climático en el que se considere una concentración de dióxido de carbono en la atmósfera del doble de la existente en la actualidad ($2xCO_2$).

La simulación $1xCO_2$ ha tenido una duración de 10 años, lo que es un compromiso entre la conveniencia de simulaciones de 30 años (período temporal considerado idóneo para caracterizar un clima) y los recursos de cálculo disponibles.
La resolución horizontal utilizada es uniforme, teniendo todas las celdas unas dimensiones horizontales de $\Delta_x = \Delta_y = 50$ km. La región de simulación para España se compone de 45x39 celdas, incluyendo las de frontera (figura 7.15).

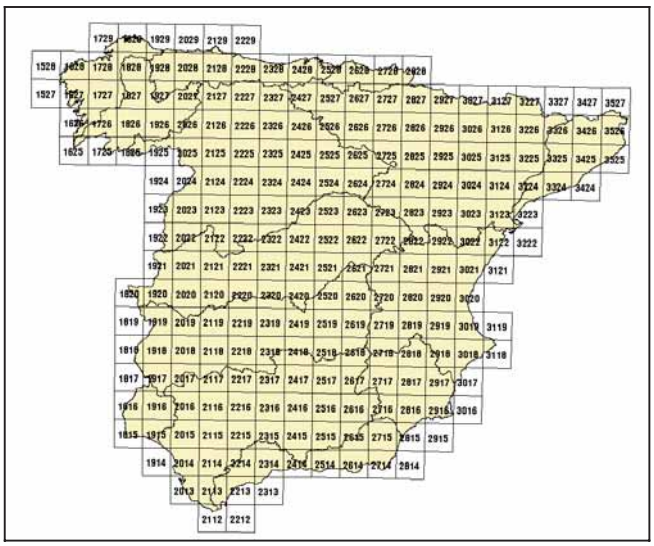


Fig.7.15. *Celdas de cálculo del modelo PROMES.*

El CEDEX (1998) realizó un estudio para investigar el efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos y las demandas de agua en el que se utilizó el modelo PROMES para simular escenarios climáticos. En la figura 7.16 se muestran las temperaturas medias diarias en otoño simuladas con PROMES para los escenarios 1 x CO2 y 2 x CO2.

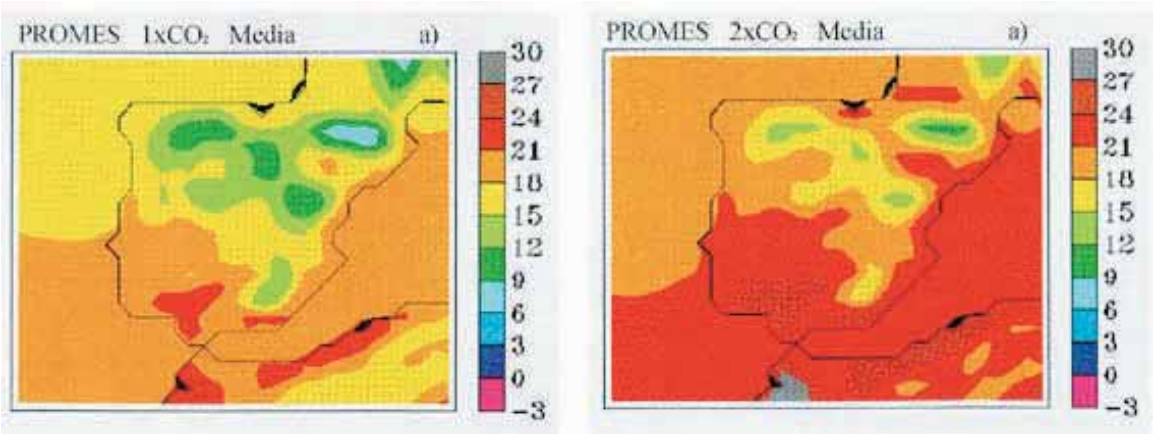


Fig. 7.16. *Temperatura media diaria a 2 m en otoño: izquierda) Media de la simulación 1 x CO2 PROMES, derecha) Media de la simulación 2 x CO2 PROMES (tomada de CEDEX 1998).*

En ese estudio se compararon las simulaciones de clima generados por el modelo PROMES con las correspondientes a la climatología CRU (Climate Research Unit) (Hulme *et al.,* 1995), concluyéndose que los valores de la precipitación en la simulación 1xCO_2 (situación actual) son por lo general mayores que los resultados obtenidos por la unidad climatológica CRU (1998). La diferencia de precipitación es más relevante en las zonas montañosas. En cuanto a la temperatura en el escenario 1xCO_2 las temperaturas en la mayoría de las regiones peninsulares están por encima de los resultados obtenidos por la unidad climatológica CRU (1998) variando desde 1 a 3 grados centígrados.

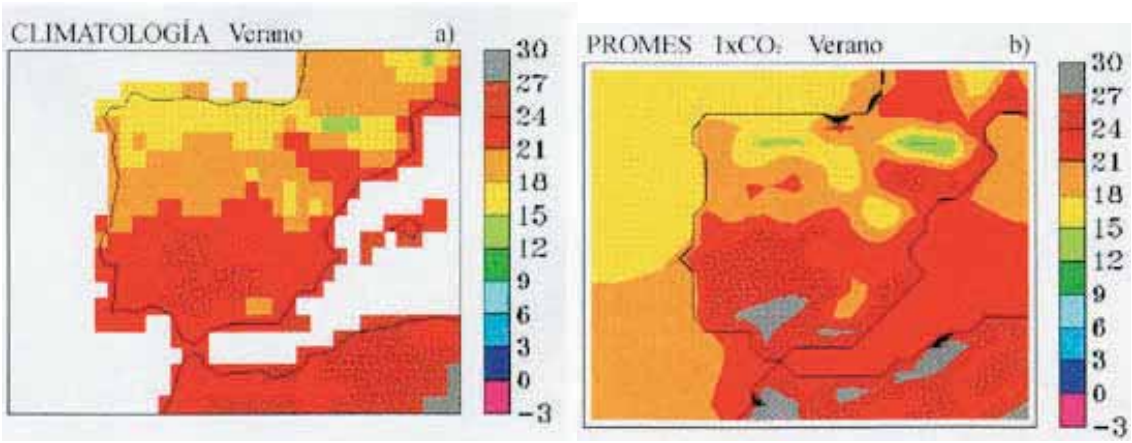


Fig. 7.17. *Temperatura media diaria a 2 m de altitud en verano, a) Climatología CRU, b) Simulación 1 x CO2 PROMES (tomada de CEDEX 1998).*

En general, PROMES sobreestima tanto la precipitación como la temperatura en la situación actual y probablemente los valores para la situación futura (2xCO_2) también serán sobreestimados. El resto de las variables utilizadas en los estudios del CEDEX, como son la humedad relativa, viento y radiación, no fueron contrastadas pero hay evidencia que existe una mayor incertidumbre que para la temperatura y la precipitación.

7.3.3. Evaluación del impacto sobre los recursos hídricos en España

7.3.3.1. Introducción

El informe ACACIA de la Comisión Europea sobre los Impactos del Cambio Climático (1999) asume para Europa que:

- Las presiones actuales y futuras sobre los recursos hídricos y su gestión en Europa se verán exacerbadas por el cambio climático (en parte porque el efecto del cambio es incierto). Probablemente aumentará el riesgo de inundaciones, y se prevé un incremento en la escasez de agua especialmente en el sur de Europa. Es probable que el cambio climático exagerará las diferencias en los recursos hídricos entre el norte y sur de Europa.
- En las zonas de litoral, el riesgo de inundaciones, erosión y pérdida de humedales experimentará un aumento sustancial con implicaciones para la colonización humana, la industria, el turismo, la agricultura y los hábitat naturales costeros. El sur de Europa parece ser más vulnerable a estos cambios.
- En las regiones montañosas, las temperaturas más altas darán lugar a que la frontera entre las zonas bióticas y criosféricas ascienda en altura, perturbando el ciclo hidrológico. Habrá una redistribución de especies con riesgo de extinción en algunos casos.

Estas conclusiones del informe ACACIA ponen de relieve la necesidad de cuantificar los efectos de un cambio climático sobre los recursos hídricos en España. La evaluación de esos impactos en nuestro país ha seguido diferentes líneas de trabajo, tanto en la escala espacial y temporal de simulación hidrológica como en el origen de los escenarios climáticos utilizados. Seguidamente se describen las diferentes evaluaciones realizadas ordenadas de menor a mayor complejidad de la modelación realizada.

7.3.3.2. Modelos agregados regionales

Dado que un primer paso es el conocimiento de los valores medios a largo plazo de las principales variables hidrológicas, la aplicación de leyes regionales que relacionen en valores medios anuales la precipitación, la evapotranspiración potencial (función de la temperatura) y la escorrentía total, puede proporcionar una visión general del alcance del problema.

Con este enfoque Ayala e Iglesias (Ayala-Carcedo *et al.*, 2001), emplean un modelo agregado para cada una de las grandes cuencas hidrográficas en que se divide España, basado en la utilización de leyes regionales anuales. Respecto a los escenarios de cambio climático consideran los cambios previstos en cuanto a la precipitación y temperatura medios anuales por el Instituto Nacional de Meteorología en 1995, basados en el modelo Hadley Center (UK) de 1990, donde en el horizonte del 2060 la temperatura media anual subiría 2,5^{0}C y la precipitación media anual descendería para el territorio peninsular español en un 8%.

Estos autores estiman que el cambio climático produciría una reducción global de los recursos hídricos del 17% junto a un aumento de la variabilidad interanual de los mismos para el año 2060 (horizonte de proyecto medio de las grandes actuaciones hidráulicas) y que estos cambios serán mayores en la mitad Sur de España. Para obtener estos valores aplicaron un modelo hidrológico conceptual agregado, utilizando como base el periodo 1940-85.

7.3.3.3. Modelos distribuidos regionales

Posteriormente en el Libro Blanco del Agua en España (MIMAM 2000) se mantiene el enfoque de aplicación de leyes regionales pero utilizando un modelo distribuido en el espacio. De esta manera se alcanza una mejora sustancial en los resultados al introducir la variabilidad espacial tanto de las precipitaciones como de las temperaturas y de las características fisiográficas de la cuenca.

El impacto sobre la escorrentía media anual derivado de distintos escenarios climáticos se estimó en MIMAM(2000) mediante la aplicación de forma distribuida (celdas de 1 km x 1 km) de la ley regional de Budyko (1961), que relaciona la escorrentía (A) con la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP). Esta ley ya había sido utilizada en un análisis experimental realizado en cuencas españolas de distintas características climáticas e hidrológicas (Estrela y otros 1995). Previamente a su aplicación, en MIMAM(2000) se contrastó la adecuación de esta ley a los datos observados en 130 puntos de control distribuidos por toda España (figura 7.18).

Los escenarios climáticos utilizados en el Libro Blanco del Agua en España proceden de los campos climáticos reflejados en el documento Programa Nacional sobre el Clima (MOPTMA 1995), donde se indicaba que:

- Una duplicación de CO_2 podría producir un aumento de temperatura media anual que oscilaría entre 1°C (análisis de respuesta en transición) y 4°C (mejor estimación del análisis de respuesta en equilibrio), aunque siendo ligeramente mayores esos aumentos en verano.

- Podrían producirse descensos generales de los valores de la precipitación media anual comprendidos entre el 5% y el 15%, siendo estos descensos más probables en la mitad sur de la península. Se apunta una tendencia hacia una concentración temporal de la precipitación, así como a una mayor variabilidad anual e interanual.

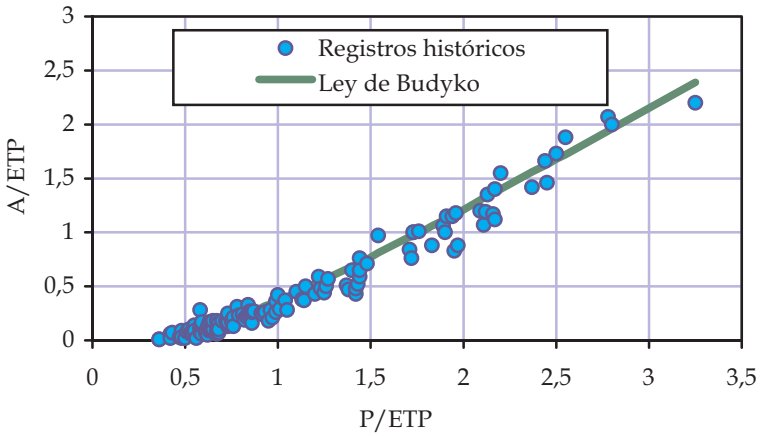


Fig. 7.18. *Relaciones entre aportación, precipitación y ETP en los puntos de control (adaptada de MIMAM 2000).*

Sin perjuicio de las cautelas e incertidumbres asociadas al problema, la evolución más probable del clima peninsular español, como resultado de esos análisis, se sintetizó en MIMAM(2000) en los siguientes escenarios de temperatura y precipitación, considerados representativos bajo la hipótesis de duplicación de CO2, prevista para el 2030:

- Escenario 1. Aumento de 1°C en la temperatura media anual.
- Escenario 2. Disminución de un 5% en la precipitación media anual y aumento de 1°C en la temperatura.
- Escenario 3. (escenario extremo poco probable) suponiendo una disminución del 15% de la precipitación media anual y un aumento extremo de 4°C de la temperatura.

Los resultados más recientes sobre precipitación en la Península Ibérica, a partir de modelos globales, producen variaciones de la precipitación muy moderadas, al situar nuestra zona en un área de cambio de signo de la variación esperada de las precipitaciones, es decir, en todos los experimentos la línea de cambio nulo atraviesa la Península Ibérica. Ello podría suponer condiciones hidrológicas más favorables que las anteriormente expuestas.

Del análisis realizado en MIMAM (2000) se puede concluir que las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares (ver figura 7.20), son aquellas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestaría más severamente. Los escenarios climáticos (1 y 2) implican una disminución media de aportaciones hídricas en España, en régimen natural, entre un 5 y un 14%.

7.3.3.4. Modelos distribuidos de simulación del ciclo hidrológico

Los modelos distribuidos de simulación del ciclo hidrológico, como el modelo SIMPA empleado en el Libro Blanco del Agua en España para la evaluación de recursos hídricos, establecen balances hídricos para los distintos procesos que tienen lugar desde el momento en que llueve hasta que el agua escurre superficial o subterráneamente, y estiman las aportaciones a partir de

datos meteorológicos (precipitación, evapotranspiración potencial, etc.) y de las características físicas del territorio (vegetación, hidrogeología, edafología, etc.).
En esta línea de trabajo conviene mencionar los estudios realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (1998) o por Fernández (2002).

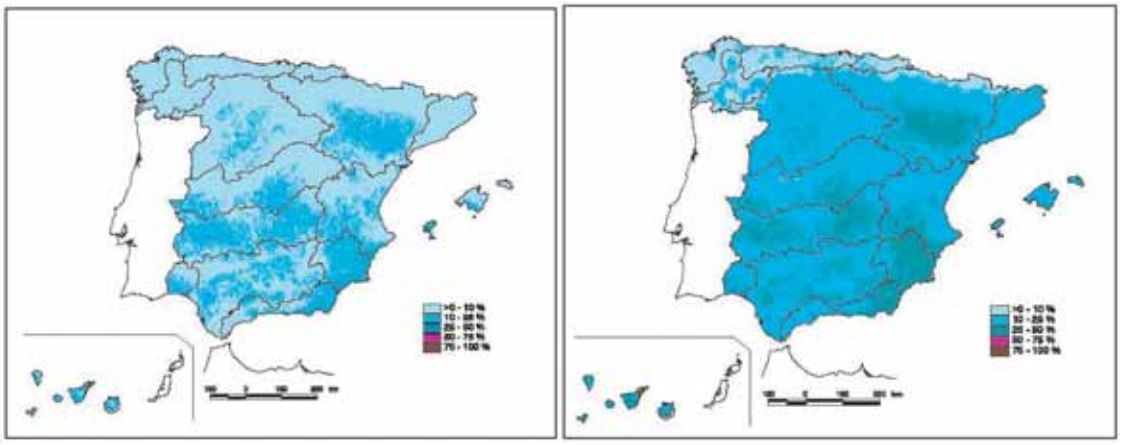


Fig. 7.19. *Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 1 y en el escenario 2.*

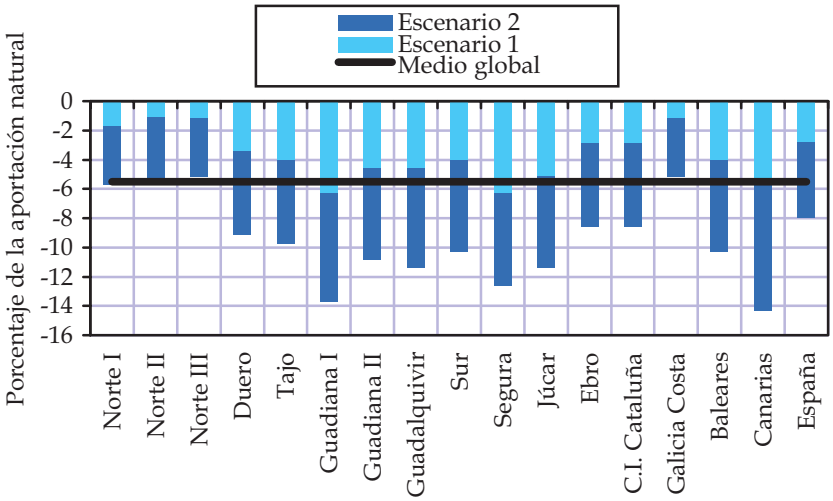


Fig. 7.20. *Porcentajes de disminución de la aportación total, para los escenarios climáticos considerados, en el largo plazo de la planificación hidrológica.*

En los trabajos desarrollados por el CEDEX en su "Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de riego en determinadas regiones de España" para el Ministerio del Medio Ambiente (MIMAM 1998), se utilizaron tres grupos de escenarios climáticos para las simulaciones hidrológicas:

- Análisis de sensibilidad a variaciones climáticas:
  - escenario 1. un aumento de 1ºC en la temperatura media anual
  - escenario 2. una disminución en un 5% de la precipitación media anual y aumento de 1ºC en la temperatura.
- Escenarios climáticos generales. Provenientes de modelos de circulación general, modelo UKMO.

- Escenarios climáticos regionales. Resultados del modelo de clima regional PROMES, considerando aumentos en la temperatura y manteniendo la precipitación igual que la actual.

Utilizando el modelo distribuido lluvia escorrentía SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación-Aportación) obtuvieron los mapas de escorrentía para cada escenario (ver mapa correspondiente a los resultados de PROMES en figura 7.21) y las variaciones porcentuales de la escorrentía respecto a la situación actual.

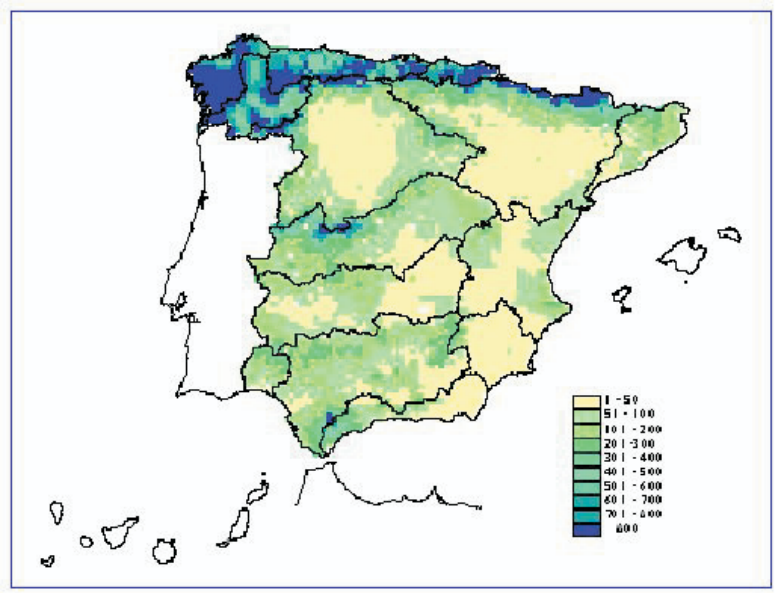


Fig. 7.21. *Mapa de aportación total media anual en mm bajo la hipótesis de cambio climático resultado del modelo PROMES.*

Del análisis realizado se extrajeron las siguientes conclusiones:

1) En España se producirían descensos medios en la aportación total media anual que oscilan entre un 5% para el escenario 1 hasta el 14% para el escenario 2 y el escenario regional 3.
2) El sureste peninsular y la España insular son las áreas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestará más severamente. En el escenario 1 la disminución de la aportación total variaría entre un 2% (Galicia Costa y Norte I) y un 11% (Guadiana y Segura), mientras que en el escenario 2 esos porcentajes crecen hasta un 9% (Galicia Costa y Norte) y algo más de un 25% (Canarias).
3) En el escenario regional adoptado la aportación total variaría entre un 5% en Galicia Costa, y un 22% en Guadiana II, con valores similares al escenario 2, salvo en la cuenca del Júcar 15% frente a 20% para el escenario 2, y las C.I. Cataluña 20% frente a 15% para el escenario 2.

En el citado estudio concluyen que los resultados no deben de ser tomados en ningún modo como definitivos, y están siempre sujetos a las hipótesis de partida adoptadas.

Fernández (2002), desarrolla un procedimiento metodológico para evaluar el impacto sobre los recursos en España mediante una modelización hidrológica distribuida a escala mensual, junto con la utilización de campos climáticos originados por modelos regionales de cambio climático. Este procedimiento lo aplica a 19 cuencas distribuidas a través del territorio español.

Los escenarios climáticos futuros adoptados se obtuvieron modificando la precipitación y la temperatura mensual del periodo comprendido entre 1945 y 1995 con la diferencia de resultados en precipitación y temperatura obtenidas por el modelo climático PROMES en las simulaciones $1xCO_2$ y $2xCO_2$ para los valores medios del periodo 2040 a 2049.

En este trabajo también se consideraron otras simulaciones correspondientes a distintos escenarios climáticos, como las mencionadas en MIMAM(2000) y otras que consideraron de interés. Se realizaron un total de 15 simulaciones hidrológicas, que se presentaron en dos grupos principales:

a) Nueve simulaciones anuales utilizando la ley regional de Budyko (Schreiber *et al.* 1978) a escala anual.

b) Seis simulaciones mensuales mediante el modelo hidrológico distribuido SIMPA.

Para la simulación a escala anual se utilizaron tanto campos climáticos (escenarios sintéticos obtenidos disminuyendo la precipitación en una proporción fija y aumentando la temperatura en uno o varios grados con respecto a la del periodo base) como escenarios generados por el modelo PROMES. En las simulaciones a escala mensual se utilizaron campos climáticos generados por el modelo climático global UKMO y por el modelo climático regional PROMES.

Una de las conclusiones importantes de este estudio son las significativas diferencias que se obtienen entre las aportaciones anuales simuladas con un modelo que simula series hidrológicas mensuales durante largos periodos de tiempo, como SIMPA y mediante la utilización de leyes regionales que únicamente consideran datos anuales o medios interanuales, como la de Budyko. Esta discrepancia demuestra claramente que las simulaciones a escala anual no son adecuadas para describir la variación de las aportaciones producidas por los cambios en la temperatura y precipitación, ya que no tienen en cuenta su distribución a lo largo del año, factor que se ha revelado, en los escenarios PROMES utilizados, fundamental para evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos.

7.3.3.5. El impacto del cambio climático sobre los recursos en la planificación hidrológica

Los estudios de evaluación del impacto climático sobre los recursos hídricos no se tuvieron en cuenta, de forma específica, en los planes hidrológicos de cuenca aprobados en España en el año 1998. La primera vez que se contemplaron este tipo de estudios con un cierto detalle fue en la elaboración de la Documentación Técnica del Plan Hidrológico Nacional (PHN). La compleja cuestión de los trasvases entre cuencas requería evaluar la posible disminución de los recursos hídricos debida al cambio climático en las cuencas candidatas a ceder recursos.
El PHN consideró las distintas horquillas de reducción en las aportaciones obtenidas en el Libro Blanco del Agua (MIMAM 2000) para las distintas cuencas, incrementándose, para mayor seguridad, el valor global recomendado, e introduciendo simultáneamente un efecto de mayor irregularidad en los valores de las series mensuales empleadas. Esto se realizó para las posibles cuencas cedentes, las del Duero, Tajo y Ebro.

En el caso de la cuenca del Ebro, la horquilla correspondiente a los dos escenarios, según el LBAE, está entre el 3 y el 9% de disminución de aportaciones.

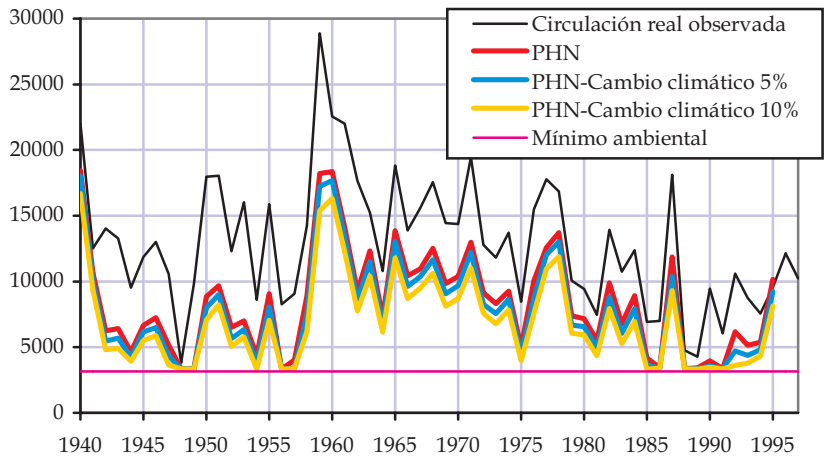


Fig. 7.22. *Circulación de caudales anuales (hm3) en el tramo final del Ebro bajo supuestos de cambio climático. Hipótesis de reducción del 5 y 10%. (tomada de la DT del PHN).*

Con ese fundamento, el documento de análisis del sistema del Ebro, elaborado en el PHN, evaluó los caudales anuales circulantes en el curso bajo del río bajo los supuestos de reducciones del 5 y 10% de las aportaciones hídricas de toda la cuenca.

Como resultado de esta evaluación, la figura 7.22, tomada del documento de *Análisis de Sistemas* del PHN, muestra la circulación de caudales anuales realmente observada en el tramo final del río Ebro, junto con la serie de circulaciones de diseño, adoptada en el PHN, y las circulaciones resultantes tras una disminución generalizada de aportaciones naturales del 5 y el 10%.

7.3.4. Evaluación integrada de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos complejos

El proceso metodológico para la evaluación integrada de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos complejos, requiere del empleo de diversos modelos de simulación anidados de forma secuencial. Esto se debe al elevado nivel de complejidad y de interacción de los distintos elementos que conforman los sistemas de recursos hídricos tanto en sus aspectos cuantitativos como en los aspectos de calidad química y ecológica del agua y en sus repercusiones socio-económicas.

El proceso secuencial parte de la selección de los resultados de los diversos escenarios climatológicos existentes para España, tanto los proporcionados por los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA) como por los modelos climatológicos regionales que permiten disponer de dichos resultados con mayor grado de detalle espacial. Las variables climatológicas resultado de los modelos son las variaciones previstas de temperatura y de precipitación.

Parte importante en la evaluación de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos es la selección de escenarios. Se pueden elegir o proponer diferentes tipos de escenarios, entre los cuales están los incrementales o sintéticos, los cuales pueden ofrecer una valiosa asistencia sobre la sensibilidad del sistema al clima futuro. Algunas veces los incrementos de estos escenarios pueden hacerse tomando como guía los resultados de las salidas de los Modelos de Circulación General propuestos por el IPCC en su apartado de regionalización mundial, eligiendo los correspondientes a España. Otra manera de evaluar los recursos hídricos es utilizar los escenarios de los modelos regionales ya sea el HadCM2SUL, UKMO o PROMES,

de tal manera que se cuente con un amplio abanico de escenarios que permitan, en su momento valorar los resultados de cada uno de ellos y analizar los resultados para los diversos periodos estacionales con el objetivo de conocer tanto las afecciones globales como las debidas a las variaciones estacionales de la lluvia y de la temperatura y sus posibles efectos en los recursos hídricos.

Seleccionados el conjunto de escenarios, el siguiente paso metodológico lo constituiría la simulación del ciclo hidrológico mediante un modelo distribuido lluvia escorrentía, el cual abarcase la totalidad de la cuenca hidrográfica y fuese de escala temporal mensual. Este modelo lluvia-escorrentía permitiría conocer en que proporción y lugar se verían reducidos los recursos hídricos y analizar como afectaría a las distintas componentes y almacenamientos de agua, como por ejemplo a los niveles piezométricos de los acuíferos o a la humedad del suelo en las capas superiores (íntimamente relacionado con la agricultura de secano). Por otra parte si estos modelos incluyen el transporte de algunas componentes químicas disueltas en el agua sería posible evaluar las variaciones en la calidad química del agua debido al cambio climático.

Analizadas las repercusiones cuantitativas y con algo de detalle las cualitativas en las cuencas hidrográficas, el siguiente proceso consistiría en la simulación u optimización de la gestión de los sistemas de recursos hídricos mediante los modelos disponibles en la actualidad, como SIMGES u OPTGES (Andreu *et al.* 1996). Estos modelos permiten reproducir la gestión en los sistemas de recursos hídricos y evaluar las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas y agrícolas, y en los caudales ecológicos y reservas ambientales establecidas en dichos sistemas. De esta manera pueden conocerse las repercusiones futuras que tendría la disminución de los recursos hídricos en el sistema de explotación. En la figura 7.23 se muestra el modelo de simulación de la gestión para el sistema Júcar.

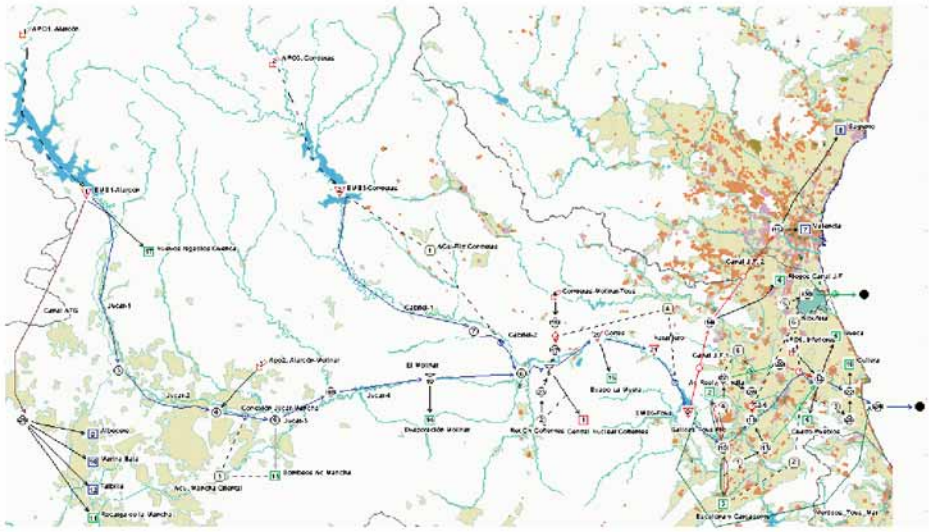


Fig. 7.23 . *Modelo de simulación de la gestión del sistema Júcar.*

Adicionalmente estos modelos también incorporan un modulo de evaluación económica y un módulo de gestión de la calidad química y ecológica, donde se incluyen la modelación del oxigeno disuelto, de la materia orgánica, de los contaminantes conservativos y de los contaminantes con descomposición de primer orden. Mediante estos modelos es posible conocer las repercusiones económicas y las variaciones en la calidad de las aguas asociadas a las distintas políticas de gestión.

La evaluación integrada y cuantificación detallada de los impactos producidos por el cambio climático requiere de la utilización secuencial de diversos modelos de simulación, los cuales han sido validados en los últimos años por su utilización cotidiana tanto en los ámbitos de planificación como de gestión de cuencas hidrográficas. Sin el empleo de estas herramientas se hace difícil alcanzar resultados de detalle que sean objetivos, debido principalmente a que el elevado número de simplificaciones necesarias para abordar el problema sino se utilizan estos modelos puede llevar a conclusiones no reales.

Garrote *et al.* (1999) realizaron una evaluación de los incrementos de capacidad de embalses necesarios debido a los impactos producidos por el cambio climático. En este estudio se calculó el incremento de la capacidad de embalses que sería necesario para mantener los sistemas de explotación en el mismo nivel de disponibilidad actual (1999), asumiendo escenarios con reducción en las series de aportaciones debidas al cambio climático.

Estos autores emplearon los escenarios climáticos y la evaluación de recursos hídricos realizada en el Libro Blanco del Agua en España. Los escenarios climáticos utilizados correspondían a un aumento de temperatura media anual entre 1ºC y 4ºC y unos descensos generales de los valores de la precipitación media anual comprendidos entre el 5% y el 15%.

El análisis del incremento necesario en la capacidad de regulación en España la realizaron mediante el empleo del modelo de optimización de cada una de las cuencas de los ámbitos de planificación del territorio peninsular utilizando para ello el programa OPTIGES. Este modelo se empleo para estimar la máxima demanda que se puede atender en cada nudo cumpliendo el criterio de garantía siguiente, según el cual se considera fallo cuando se cumple una de las tres condiciones siguientes:

1. Déficit anual superior al 50% de la demanda anual.
2. Déficit en dos años consecutivos superior al 75% de la demanda anual.
3. Déficit en 10 años consecutivos superior al 100% de la demanda anual.

En el escenario de cambio climático moderado, la reducción de las aportaciones en la España peninsular es de un 5%, lo que supone una reducción del 4% del recurso disponible. En el caso concreto de la cuenca del Segura esta disminución alcanza 9%.

En el escenario del cambio más severo, la reducción conjunta de las aportaciones es del 14% con una reducción del recurso disponible del 11%. Por ámbitos, Guadiana I experimenta la mayor disminución de las aportaciones con un 24%. Sin embargo en la cuenca del Segura se produce una disminución de aportaciones del 22% lo que supone la mayor disminución en el recurso disponible con un 18%.

7.3.5. Impactos sobre el medio ambiente, social y económico relacionado con los recursos hídricos

Muchos de los sistemas de la Tierra que sostienen a las sociedades humanas son sensibles al clima y a los recursos hídricos y sufrirán los impactos debidos a cambios en ellos. Se pueden esperar impactos en la circulación de los océanos, el nivel del mar, el ciclo del agua, los ciclos del carbono y los nutrientes, la productividad de los ecosistemas naturales, la productividad de la agricultura, los pastizales y los bosques, el comportamiento, la abundancia y la supervivencia de especies de plantas y animales, etc.

Los cambios en estos sistemas en respuesta a la variación en los recursos hídricos afectarán al bienestar humano, tanto positiva como negativamente. Los impactos sobre el bienestar humano se sentirán a través de cambios en la oferta y en la demanda de agua, cambios en las oportunidades para utilizar el medio ambiente con fines de recreación y turismo distintos del

consumo, cambios en el valor de la “no utilización” del medio ambiente hídrico como valor cultural y valor de preservación, cambios en la pérdida de bienes y vidas a causa de fenómenos hidrológicos extremos, y cambios en la salud humana.
Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos influirán en las perspectivas del desarrollo sostenible en diferentes partes del mundo y puede que den lugar a la ampliación de las desigualdades existentes, ya que como regla general los países más áridos se verán más afectados por estos cambios.

En algunos entornos, los impactos del cambio climático pueden causar disturbios sociales, declinación económica y desplazamientos de población que podrían afectar a la salud humana. Los impactos sobre la salud relacionados con los desplazamientos de población resultantes de procesos de desertificación, desastres naturales o de la degradación del medio ambiente son sustanciales.

En general, los impactos negativos del cambio climático en la salud serán mayores en poblaciones vulnerables de menores ingresos, predominantemente en los países tropicales y subtropicales.

Hay muchas técnicas convencionales y avanzadas específicas que pueden contribuir a mejorar la ordenación y planificación del medio ambiente hídrico, incluidos los instrumentos basados en el mercado para combatir la contaminación, la gestión de la demanda, la evaluación de los impactos ambientales, los planes ambientales estratégicos, los procedimientos de auditoria ambiental y los informes sobre el estado del medio ambiente.

Un aumento en la frecuencia y magnitud de los sucesos extremos podría tener efectos adversos en todos los sectores y las regiones. La agricultura y los recursos hídricos pueden ser particularmente vulnerables a los cambios en los extremos hidrológicos y a cambios en las temperaturas. Las crecidas pueden dar lugar a la difusión de enfermedades transmitidas por el agua y por vectores, en particular en países en desarrollo. Muchos de los daños y perjuicios monetarios de los sucesos extremos tendrán repercusiones sobre una amplia gama de instituciones financieras, desde aseguradores y reaseguradores hasta inversionistas, bancos y fondos para el socorro en caso de desastre. Los cambios en las estadísticas de los sucesos extremos tienen consecuencias para los criterios de diseño de las aplicaciones técnicas, que se basan en estimaciones probabilísticas.

El cambio climático puede reducir la disponibilidad de agua en algunas regiones con estrés hídrico y aumentarla en otras. En los sectores municipal e industrial, es probable que algunos factores que no dependen del clima sigan teniendo efectos muy sustanciales sobre la demanda de agua. El regadío, sin embargo, está más determinado por el clima, y su aumento o disminución en una zona determinada depende del cambio en las precipitaciones. Si las temperaturas son más altas mayor será la demanda de los cultivos causada por la evapotranspiración.

7.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

7.4.1. Concepto y criterios de vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un territorio a las variaciones en los recursos hídricos está estrechamente relacionada con los usos que tienen lugar sobre el mismo. Un mismo espacio geográfico es más vulnerable cuanto mayores son sus necesidades de agua y mayores son las garantías que precisa. Evidentemente, a igualdad de volumen de demanda de agua será mucho más vulnerable un territorio si ese volumen se destina al abastecimiento urbano que si es para el regadío, ya que en este último caso las garantías de suministro son menos exigentes.

Con carácter general los territorios con mayor estrés hídrico deberían ser considerados los más vulnerables a posibles variaciones en los recursos hídricos.

Existen muchos indicadores de estrés hídrico, la mayoría de ellos relacionan demandas de agua y los recursos hídricos renovables. En el siguiente apartado se muestran dos indicadores de estrés hídrico para el conjunto del territorio español: los déficit entre demandas consuntivas y los recursos potenciales y el denominado índice consumo, que se obtiene como el cociente entre la demanda consuntiva y el recurso potencial.

7.4.2. Vulnerabilidad frente a variaciones en los recursos hídricos en España

Un indicador de la vulnerabilidad de los distintos territorios en España puede obtenerse estableciendo el balance entre los mapas de recursos potenciales y demandas consuntivas.

Se entiende por recurso potencial la fracción no reservada de los recursos naturales más los recursos procedentes de la desalación de agua mar y por las transferencias existentes.

El mapa de demandas consuntivas puede obtenerse aplicando a la demanda de riego un 80% y para la demanda urbana e industrial un 90% en la franja costera peninsular de 10 km, un 80% en la misma franja costera insular y un 20% en el resto del territorio, reflejando de esta forma las distintas posibilidades de reutilización directa o indirecta de los recursos.

Estos criterios fueron aplicados en la elaboración del Libro Blanco del Agua en España (MIMAM 2000), obteniéndose un mapa con los balances en cada uno de los sistemas de explotación de recursos definidos en las cuencas españolas. El balance agregado por sistemas de explotación presupone la completa utilización de los recursos potenciales generados en todo el territorio del sistema, además, en su caso, de los recursos procedentes de la desalación de agua de mar y de las transferencias de otros sistemas. Esto representa una cota máxima de aprovechamiento que requeriría disponer del conjunto de infraestructuras necesarias y contar con las necesarias condiciones de calidad. En la figura 7.24 se muestran los sistemas de explotación con déficit.

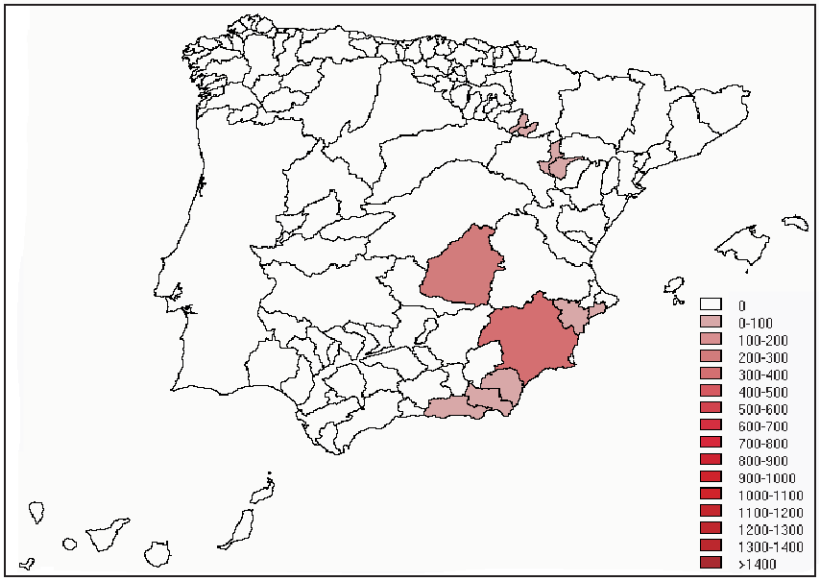


Fig. 7.24. *Mapa de déficit (hm^3/año) en los sistemas de explotación (tomado de MIMAM 2000).*

El mapa anterior muestra que los déficit se localizan fundamentalmente en el Segura, cabecera del Guadiana, Vinalopó-Alacantí y Marina Baja en el Júcar, zona oriental de la cuenca del Sur, junto con otros sistemas de menor extensión en la margen derecha del Ebro. Ahora bien, a pesar de que todos estos sistemas son deficitarios, la magnitud de los problemas es, obviamente, muy distinta, y no es comparable el déficit de los sistemas de la margen derecha del Ebro, de mucha importancia local, con el de la cabecera del Guadiana o el del conjunto formado por los sistemas meridionales del Júcar, el Segura y los sistemas orientales del Sur, con un impacto territorial y dimensión notablemente superior (MIMAM 2000).

Este mapa puede dar lugar sin embargo a interpretaciones erróneas, pues al tratarse de cifras absolutas están condicionadas por el tamaño de los sistemas, que varía mucho de unos casos a otros. Para evitarlo en MIMAM (2000) se elaboró el denominado índice de consumo, que relaciona la demanda consuntiva con los recursos potenciales. Este índice da lugar al mapa de riesgo de escasez que se muestra a continuación y que podría entenderse como un buen indicador del grado de vulnerabilidad de los distintos sistemas de explotación de recursos hídricos en España a las variaciones en los recursos hídricos. Los más vulnerables son aquellos clasificados como de escasez estructural, siguiéndoles en un menor grado los clasificados como de escasez coyuntural.

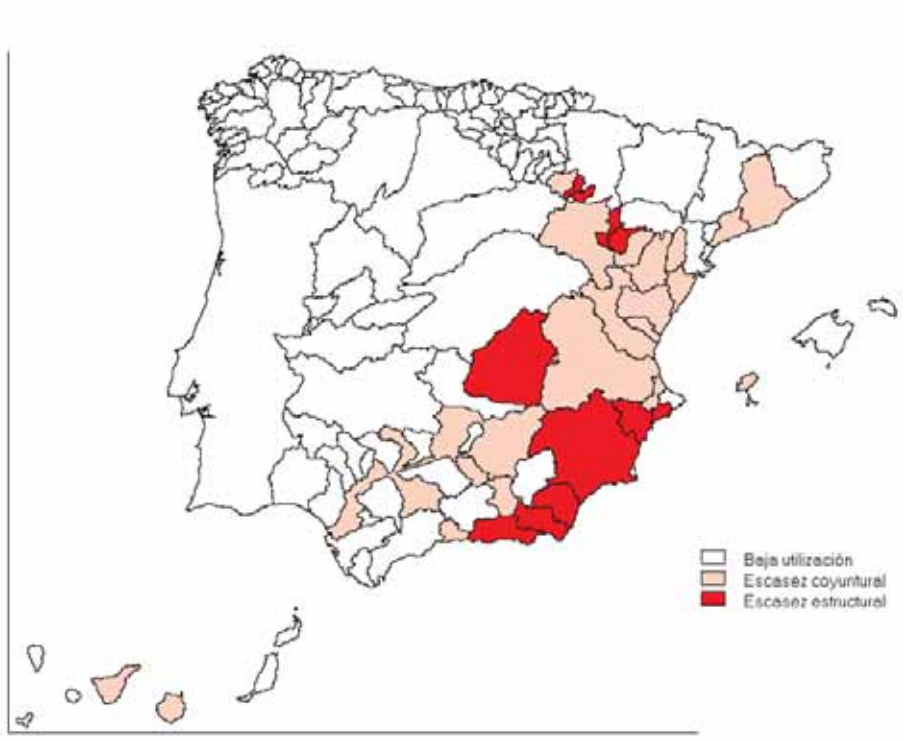


Fig. 7.25. *Mapa de riesgo de escasez en los sistemas de explotación (tomada de MIMAM 2000).*

En la figura 7.25, puede apreciarse que los sistemas deficitarios padecen una escasez de tipo estructural, es decir, el recurso potencial, incluyendo reutilización, desalación y transferencias, es sistemáticamente inferior al nivel de consumo que se pretende alcanzar. Pero existe, además, un conjunto de sistemas que, aun presentando superávit, corren el riesgo de sufrir una escasez de carácter coyuntural, debido a que sus niveles de consumo se hallan relativamente próximos al recurso potencial. En tales condiciones, secuencias hidrológicas adversas podrían dar lugar a problemas de suministro por insuficiencia de recursos.

Como puede apreciarse, una parte importante de los sistemas de explotación de la mitad suroriental de la península, junto con algunos sistemas de la margen derecha del Ebro, parte de Cataluña y algunas islas, estarían sometidos, aun en el hipotético caso de máximo aprovechamiento de los recursos potenciales, incluyendo desalación y transferencias, y máximo grado de reutilización, a una escasez de recursos de carácter estructural o coyuntural.

7.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

7.5.1. Conceptos y clasificación de los efectos paliativos de la disminución de recursos hídricos

De los apartados anteriores se desprenden tres principales impactos del cambio climático sobre los sistemas hidrológicos: 1) el calentamiento global producirá un aumento de la demanda de agua por parte de los ecosistemas terrestres y de los sistemas agrícolas 2) el cambio climático representará muy probablemente una reducción de los recursos hídricos disponibles en la mayor parte de las cuencas, y 3) es muy presumible que se acentúen las situaciones extremas: sequías y avenidas.

Frente a este aumento de presión sobre los sistemas de recursos hídricos, que ya están por encima del nivel de sobreexplotación en la mayor parte de las cuencas, se pueden proponer tres tipos de opciones adaptativas (véase, por ejemplo, MMA 1998): aumento de la oferta, gestión de la demanda, y mejora de la gestión de los sistemas.

La primera se basa tanto en acciones tradicionales (aumento de los volúmenes embalsados, trasvases) como en alternativas todavía no suficientemente desarrolladas (recursos subterráneos) y en el desarrollo de recursos no convencionales (cosecha de agua, desalación, reutilización). La segunda se basa en reducir los consumos mediante diversos procedimientos, como políticas tarifarias o de subsidios, y en mejoras técnicas (canalizaciones, regadíos). La tercera se basa en mejorar los conocimientos sobre los sistemas climático e hidrológico y perfeccionar y aplicar métodos e instrumentos para la gestión de los recursos, especialmente en condiciones extremas (sequías).

En cualquier caso, es necesario que las acciones emprendidas no atenten la sostenibilidad del sistema, y, en particular, que sean compatibles con la Directiva Marco del Agua (DMA). Las opciones propuestas deberían aplicarse independientemente del cambio climático a fin de disminuir los niveles de sobreexplotación, aumentar la robustez de los sistemas frente a situaciones extremas, y facilitar la recuperación del buen estado ecológico. El cambio climático, como indica una de las conclusiones principales del proyecto ACACIA (Parry 2000), representa un serio reto para el establecimiento de una gestión sostenible de los recursos hídricos.

Ante las evidentes limitaciones del presente documento, se intentará realizar una revisión sintética, poniendo más énfasis en las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas que en detalles de tipo técnico.

7.5.2. Opciones de aumento de recursos

El aumento de los recursos disponibles puede obtenerse mediante opciones muy diversas, desde las basadas en técnicas de la antigüedad (cosecha de agua), pasando por las más características de mediados del siglo XX (embalses), aprovechamiento de aguas de tormentas, hasta las técnicas que utilizan los últimos adelantos técnicos (desalación). A continuación se enumeran los principales tipos juntamente con su análisis crítico.

Reforestación

Tradicionalmente se ha considerado que el aumento de la extensión y densidad de la superficie forestal i) reduce la erosión de los suelos, ii) disminuye la frecuencia e intensidad de las crecidas, iii) mejora los recursos superficiales y subterráneos, e incluso iv) aumenta la precipitación. Sin embargo, las experiencias acumuladas durante el siglo XX en todo el mundo, en distintos ambientes y a distintas escalas, han desmentido o matizado estas presunciones (véase un resumen en Gallart y Llorens 2003): i) la mejora de la cubierta vegetal reduce la erosión, pero en muchas ocasiones la destrucción de la vegetación preexistente, los trabajos con medios mecánicos y la abertura de caminos contrarresta este efecto; ii) la cubierta forestal reduce apreciablemente las crecidas de poca o mediana magnitud en cuencas pequeñas, pero no afecta las grandes avenidas en cuencas medianas o grandes; iii) el establecimiento de una cubierta forestal en una cuenca con vegetación de bajo porte determina una disminución de los recursos superficiales y subterráneos. El problema es muy complejo, la desaparición de los árboles hace aumentar los primeros 2 o 3 años las aportaciones. Por un lado aumenta la intercepción foliar, pero por otro mejora la capacidad de almacenamiento del suelo y disminuye la evaporación del suelo; iv) el aumento de la cubierta forestal determina un aumento de la evapotranspiración real, de modo que puede representar un aumento de la precipitación, pero este efecto no compensa el aumento de la evapotranspiración y solamente se produce a escala continental.

No cabe duda de que existen muchas áreas en España que por diversas causas (abandono de actividades rurales, sobre pastoreo, incendios...) han sufrido una degradación de la cubierta vegetal y requieren actuaciones de regeneración. Por otra parte, algunas de las estrategias de mitigación del cambio climático se basan en la reforestación como una medida de secuestro de carbono, lo que se contempla en el acuerdo de Kyoto. Sin embargo, en el diseño de estas actuaciones, debe considerarse que las ventajas ambientales tienen como contrapartida un coste hidrológico.

Por el otro lado, cabe la posibilidad de recomendar el mantenimiento de cubiertas vegetales escasas en zonas limitadas donde los inconvenientes ambientales como el riesgo de erosión sean muy bajos en relación con el interés en minimizar la evapotranspiración (zonas de recarga de acuíferos de importancia estratégica, zonas de recepción para la cosecha de agua).

Cosecha de agua de lluvia o rocío

Desde la Antigüedad se han utilizado sistemas de captación de agua de lluvia mediante diversos sistemas para pequeñas explotaciones agrícolas o el suministro a viviendas aisladas o pequeñas comunidades. La mayor parte de estos dispositivos han caído en desuso en España por diversas razones técnicas, económicas y culturales. Sin embargo en los últimos años se está produciendo en distintos lugares del mundo una renovación de estas tecnologías por sus ventajas de bajos costes económico y ambiental y su fácil implementación en lugares remotos. En 1991 se creó la *International Rainwater Catchment Systems Association* (http://www.ircsa.org/), una asociación internacional para su desarrollo científico, técnico y educacional. El PNUMA también está apoyando intensamente estas tecnologías (UNEP 1998).

La principal limitación de estas técnicas es la escasa seguridad del suministro, pero pueden ser de utilidad para mejorar las técnicas de reforestación, favorecer la recarga de acuíferos, y utilizarse alternativamente con recursos subterráneos para favorecer la recuperación de los acuíferos durante períodos húmedos.

Aumento de la capacidad de embalse, trasvases entre cuencas

Una de las opciones tradicionales ante una previsible disminución de los recursos y aumento de su variabilidad temporal es el incremento de la capacidad de embalse o el trasvase de recursos entre cuencas. Sin embargo se ha demostrado en los últimos decenios que los elevados costes económicos sociales y ambientales de estas estructuras raramente son compensados por sus beneficios (MMA,1998; WCD 2000). En España, además, ya existe un número récord de presas y la mayor parte de los ríos ya están sobrerregulados. Desde la adopción de la DMA, los requerimientos legales y ambientales para la construcción de nuevas presas son muy restrictivos en Europa (Barreira 2004).

Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas tienen un papel muy importante en España. En la actualidad, las aguas subterráneas riegan aproximadamente un tercio de la superficie de regadío, pero producen más de la mitad de los ingresos. El agua subterránea es la fuente principal para el abastecimiento de las pequeñas localidades y es un recurso estratégico en casos de sequía prolongada.

Hasta 1985 las aguas subterráneas no estaban reguladas, lo que facilitó un rápido desarrollo de su explotación por particulares pero originó muchos casos de sobrexplotación. Actualmente, más del 20% de las unidades hidrogeológicas están sobreexplotadas (bombeo similar o mayor que la recarga). La contaminación por nitratos y por intrusión de la cuña salina marina son los principales problemas de calidad de las aguas subterráneas. Desde 1985, con la promulgación de la Ley de Aguas, las aguas subterráneas son de dominio público, pero la Administración, por falta de medios financieros, humanos y técnicos, no ha sido capaz desde esta fecha, salvo en algunos casos, de ordenar la excesiva explotación de los acuíferos ni de establecer una gestión conjunta suficiente de las aguas superficiales y subterráneas.

Algunas opciones de explotación de las aguas subterráneas pueden ser de gran interés ante el Cambio Climático. En particular, la *utilización alternativa* (utilización de recursos superficiales en períodos húmedos y subterráneos durante los secos), la recarga artificial durante períodos húmedos o la sobreexplotación temporal de algunos acuíferos, sobre todo litorales, durante períodos de sequía se apuntan como algunas de las opciones (MMA 1998).

Desalación

La desalación tiene ya una larga tradición es España, ya que se implantó por primera vez en Canarias en 1969. Las técnicas de desalación han experimentado grandes avances técnicos en los últimos años, especialmente desde el punto de vista de los costes económicos. En la actualidad estas tecnologías permiten obtener recursos hídricos a partir de aguas marinas o de baja calidad a un precio que permite incluso su utilización para algunos tipos de regadíos de elevado rendimiento. Los principales inconvenientes son el elevado coste energético y la eliminación de las salmueras resultantes. Una opción sostenible es utilizar energías renovables como apoyo a la desalación. En Canarias hay varias experiencias de desalación a gran escala donde se utiliza la energía eólica con el objeto de reducir el coste energético. El Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) ha desarrollado varias aplicaciones para la realización de este tipo de estudios y algunas experiencias a pequeña escala de sistemas totalmente autónomos con energía eólica o solar.

Reutilización

Se entiende por reutilización directa el aprovechamiento directo de efluentes depurados, con un mayor o menor grado de tratamiento previo, mediante su transporte al segundo punto de aprovechamiento a través de una conducción específica, sin vertido intermedio a un cauce público.

Las posibilidades de reutilización están condicionadas por las disponibilidades de efluentes tratados, por la calidad de estos efluentes, y por los requerimientos de calidad para el segundo uso. La mayor parte del agua reutilizada se emplea para regadío, y, en mucha menor proporción, para usos recreativos y campos de golf, usos municipales, ambientales e industriales. El uso para agua potable está prohibido por la Ley.

Las directrices para regular la reutilización del agua no solamente consideran unos parámetros de calidad mínimos para cada uso, sino también metodologías y criterios de control de la calidad de los análisis, sistemas de vigilancia y algunas normas de seguridad para reducir los riesgos, como limitaciones al riego por aspersión y almacenamiento y etiquetaje de las aguas no potables. Urge disponer de normas y directrices a escala Europea y Española.

Los principales problemas son la incertidumbre sobre el riesgo potencial para la salud pública (en particular a largo plazo en la recarga de acuíferos), el coste elevado de los procesos de depuración más intensos, y el hecho de que el agua depurada no se restituye a los cauces naturales, siendo necesario establecer caudales ecológicos para evitar una seria agresión ambiental en las zonas secas (AEMA 2002).

7.5.3. Opciones de optimización del uso. Gestión de la demanda

La necesidad de reducir la presión sobre los sistemas hidrológicos para no comprometer su sostenibilidad y la creciente limitación del aumento de la disponibilidad de agua de calidad suficiente está llevando a que la planificación del agua se centre cada vez más en las posibilidades de reducir la demanda. A continuación se resumen algunas de las opciones de gestión de la demanda (MMA 1998; AEMA 2002).

La información a los ciudadanos y el uso de sencillas técnicas de ahorro, como los de la descarga de las cisternas de los inodoros, puede llevar a reducciones hasta del orden del 40% del consumo urbano. Sin embargo, en muchas ciudades el suministro de agua está en manos de empresas privadas, siendo el ahorro del agua contrario a sus intereses.

Los sistemas de medición del agua, incluso sin considerar la recaudación, pueden producir un descenso del 10% al 25% del consumo. Las pérdidas en las redes de distribución suelen ser muy considerables (media del 28% con casos extremos del 50% en España) y dependen de la antigüedad de la red. La reducción de las pérdidas es un proceso costoso y tiene un límite técnico de entre el 10% y el 15%.

Las políticas de tarificación son también un mecanismo para controlar la demanda, sobre todo cuando se penaliza el consumo excesivo. Aunque los precios varíen mucho según los usuarios (domésticos, industriales, agrarios), la experiencia demuestra que el aumento del precio del agua reduce el consumo.

El principal consumidor de agua en España es el regadío. El consumo actual es insostenible, ya que ha llevado a la sobreexplotación de la mayor parte de las cuencas y de un creciente número de acuíferos, así como a la degradación de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas principalmente por nitratos y sales procedentes del lavado de los suelos. Las previsiones del PHN, del Plan nacional de Regadíos y de los diversos Planes de Cuenca son

cifras políticas sin ninguna base realista con criterios de sostenibilidad, y todavía menos ante el CC. Será por lo tanto necesario revisar a la baja las previsiones de crecimiento e incluso la extensión actual de los regadíos. También será necesaria la sustitución en algunas zonas de cultivos de elevado coste hidrológico (arroz, maíz) por otros de menor coste y el cese de irrigación de suelos inadecuados. Debe asegurarse que las políticas de subvención de las actividades agrícolas sean favorables a la sostenibilidad hidrológica. La mejora de las técnicas de riego y de la eficiencia de las conducciones pueden llevar a un ahorro significativo, aunque los costes económicos son elevados y algunas de las técnicas de elevada eficacia hidrológica son insostenibles por causar la salinización de los suelos.

En el sector industrial se requieren políticas adecuadas de tarificación y disposiciones legales que favorezcan las tecnologías limpias y de poco consumo de agua. Es necesario el control eficaz de tomas directas, sobre todo de aguas subterráneas, y de vertidos.

7.5.4. Opciones de mejora del sistema de recursos hidráulicos y de su gestión.

Se trata de actuaciones encaminadas a disponer de una mayor información sobre los sistemas de recursos hídricos y a obtener herramientas para facilitar su gestión más eficaz.

Las redes de medida de precipitación, meteorología, manto nival, caudales y niveles piezométricos deberían mejorarse para obtener una información adecuada sobre el ciclo hidrológico. En particular, la precipitación y meteorología se observa principalmente en poblaciones en lugar de las áreas de cabecera más relevantes para la generación de los recursos, y la red foronómica en cuencas de régimen natural es claramente insuficiente.

Los modelos de simulación de las aportaciones en régimen natural deben ser mejorados para reproducir el balance de agua del modo más físico posible, considerando el agua del suelo y diferenciando entre la evaporación del agua interceptada y el agua transpirada por la vegetación. El paso de tiempo debería ser diario, y se debe considerar explícitamente la incertidumbre de las predicciones. Los modelos de simulación y optimización de los sistemas de explotación deberían integrarse en Sistemas de Apoyo a la Decisión utilizables por usuarios poco especializados.

Las bases de datos sobre recursos, demandas y sistemas de explotación deben ser actualizadas en plazos breves y estar disponibles utilizando las nuevas tecnologías.

La constitución de los Centros de Intercambio de Derechos de Uso del Agua, previstos en la Ley de Aguas, puede mejorar la gestión de las aguas especialmente en condiciones de escasez, al favorecer la percepción del agua por parte de los usuarios como un bien escaso y facilitar la implantación de la recuperación de costes prevista en la DMA (Moral *et al.* 2003).

La gestión de los recursos durante períodos de sequía requiere una mención especial. En primer lugar, es necesario desarrollar métodos mejorados para la detección temprana, para lo cual se requiere información actualizada sobre datos de precipitación, clima, humedad del suelo, caudales, niveles piezométricos en los acuíferos y reservas en embalses. La utilización de predicciones meteorológicas a largo plazo así como la posible correlación de los períodos de sequía con indicadores globales como las oscilaciones del Atlántico Norte o del Niño en el pacífico deben ser estudiadas e implementadas en el sistema de detección. En segundo lugar, es necesario establecer planes de actuación que establezcan con claridad las reglas de explotación de los sistemas, en particular los recursos subterráneos, para diversos niveles de riesgo o severidad de la sequía.

Por último, la gestión sostenible de las cuencas requiere una gestión integrada de las aguas y del territorio. Cualquier decisión sobre el territorio representa una decisión sobre la cantidad y calidad del agua (Falkenmark 2000).

7.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

7.6.1. Sectores de influencia en la variación de recursos hídricos por el cambio climático

La variación en los recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático, está condicionada por la influencia de otros sectores también afectados por el cambio climático.

En principio hay tres sectores que inciden, o pueden incidir, en los recursos hídricos y por tanto, las alteraciones en estos sectores pueden condicionar alteraciones en los recursos hídricos en cantidad y calidad.

Todos los sectores que estén relacionados con el suelo y la cobertera vegetal pueden ser de influencia en la generación de escorrentías, pudiendo citarse:

Sector forestal

El aumento de masas forestales disminuye la intensidad de las crecidas y consigue niveles de mayor regularidad temporal en la generación de escorrentías.

Recursos edáficos

La generación o destrucción de suelos, condiciona la capacidad de retención de estos y por tanto las cantidades de agua que quedan pendientes de un proceso de evapotranspiración. Además influyen igualmente en la intensidad y regularidad temporal de las avenidas.

Biodiversidad vegetal

Las especies vegetales, con su específica profundidad radicular, sus necesidades de agua y las características de los suelos donde se asientan, condicionan el balance de agua y la generación de aportaciones.

7.6.2. Repercusiones de la variación de los recursos hídricos en otros sectores

A su vez, los cambios que se producen en los recursos hídricos afectan a otros muchos sectores de una forma importante. En los once sectores que se citan a continuación la influencia de los recursos hídricos es clara y notable.

Ecosistemas terrestres

Flora, fauna y en general todo ser vivo, tiene condicionada su existencia a la disponibilidad de agua de la calidad requerida en cada caso. La variación en cantidad y calidad de recursos hídricos y su distribución en tiempo y espacio pueden condicionar la existencia y desarrollo de ecosistemas terrestres.

Ecosistemas acuáticos continentales

Las zonas húmedas y muy especialmente en España, albergan una fauna rica y variada en comparación con su entorno. Dependen de las masas de agua que las constituyen y de las

fuentes naturales de suministro de estas aguas. La variabilidad espacial de la aportación puede jugar también un papel de importancia en atención a los movimientos de aves migratorias.

Biodiversidad vegetal

La biodiversidad vegetal está sujeta a la presencia del agua necesaria para el desarrollo de las diversas especies vegetales y las variaciones en la aportación pueden condicionar la desaparición de especies o la sustitución por otras de mejor adaptación. Al mismo tiempo, este sector se manifiesta como de incidencia en la generación de recursos hídricos.

Biodiversidad animal

De una manera análoga la biodiversidad animal está sujeta a la presencia del agua necesaria para la vida de las diversas especies animales y las variaciones en la aportación pueden condicionar la desaparición o migración de especies.

Sector agrícola

En España este sector es crítico. Se riegan más de 3 millones de ha 2 con aguas superficiales y 1 con aguas subterráneas. El regadío es posible gracias a un proceso de regulación generalizada con embalses y acuíferos. La disminución de precipitaciones ocasionará aumento del déficit de agua para riego; es decir la garantía de uso se verá disminuida. Mejorar la regulación no será suficiente, dado que ya es muy alta y no son posibles grandes mejoras.

Sector forestal

Es otro de los sectores de doble entrada, afectado por la cantidad y distribución espacial de la aportación y al mismo tiempo condicionante en el proceso de generación de recursos hídricos y muy especialmente de la cantidad e intensidad de las avenidas.

Riesgos naturales de origen climático

La distribución espacial de la aportación previsiblemente más heterogénea a consecuencia del cambio climático e incluso con el incremento en número e intensidad de sucesos extremos es previsible que haga más crítico el problema de las avenidas y aumenten en frecuencia e intensidad los deslizamientos de ladera. Es un fenómeno que aún con grandes incertidumbres se presenta de especial estudio en España habida cuenta de lo secular de los riesgos de vidas humanas en avenidas y deslizamientos.

Sector energético

El sector energético está condicionado por la existencia de agua suficiente, principalmente en producción de energía hidroeléctrica pero también para cubrir necesidades de refrigeración en térmicas y nucleares. A pesar de la gran regulación existente, el sector hidroeléctrico se verá afectado ante la previsible disminución de aportaciones consecuentes al cambio climático. Además de este planteamiento de carácter general debe tenerse en cuenta que la disminución de recursos hará que la agricultura demande un tipo de regulación mas adaptado a sus necesidades con desembalse más irregular y ello influirá en la producción hidroeléctrica de demanda más regularizada.

Sector turístico

El sector turístico condiciona un tipo de demanda muy heterogénea en el tiempo, como ocurre con la agricultura. La disminución de recursos y aún mas su peor distribución a lo largo del año será un factor de incidencia en el sector turístico. Es precisamente las áreas mediterráneas, con escasas o nulas lluvias de estío, las de mayor demanda turística y son estas zonas aquellas en que los recursos hídricos pueden sufrir mayores disminuciones porcentuales ante el previsto cambio climático.

Salud humana

La disminución de caudales, mucho más acusada en los meses de estío, puede condicionar parámetros de la calidad del agua con incidencia en la salud humana.

7.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

7.7.1. Análisis de incertidumbres y su importancia relativa

En lo referente a la estimación de recursos hídricos a consecuencia del posible cambio climático se deben considerar tanto las incertidumbres inherentes a la estimación por simulación del aumento de temperaturas y disminución de precipitación (para el caso de España), como las incertidumbres que se presentan en el proceso de generación de recursos; en el cual influye el suelo y la cobertera vegeta de una parte y el sistema de recursos hidráulicos y el modo de gestionarlo, de otra.

De estos dos grandes grupos de incertidumbres; los datos de base y el proceso de generación de escorrentías, tienen los primeros una mayor importancia relativa. Esta afirmación se basa en que en los cálculos sobre la generación de recursos existen muchos métodos que permiten adecuados contrastes de los resultados.

7.7.2. La incidencia de los datos de base. Escenarios

Las incertidumbres básicas de mayor relevancia, se refieren a la proyección de la precipitación y la temperatura para los horizontes de este siglo. Son los datos de base y cualquier cálculo o estimación de escorrentías parte de estos parámetros climáticos. Se ha visto además, que no hacen falta grandes variaciones de precipitación o temperatura para ocasionar variaciones importantes en la disminución de las escorrentías, especialmente con el tipo de clima semiárido, desgraciadamente frecuente en España.

Los cálculos de aportaciones se llevan a cabo con estudios hidrológicos suficientemente afinados, al menos en España, estimándose por la mayoría de los especialistas que los errores admisibles, en un buen estudio, son del 15%. Sin embargo para ello se requieren datos fiables a nivel mensual series homogéneas y representativas y una adecuada distribución de la información a nivel espacial. Por ello la fiabilidad de las evaluaciones de recursos frente al previsible cambio climático aumentará a medida que los escenarios sean más reales y den mejor información sobre la distribución temporal de la precipitación y de la temperatura.

Incertidumbres en los datos de base

El aumento del valor real de la temperatura
La disminución de la precipitación
La distribución de ambos en el espacio con la adecuada discretización

7.7.3. Distribución espacial y temporal de la precipitación y la temperatura

Los modelos de simulación son demasiado groseros en su discretización espacial para dar respuesta a cálculos suficientemente afinados que cubran las necesidades de información precisas en España. Uno de los errores más frecuentes y convenientemente detectados en muchos estudios hidrológicos en España consiste en evaluar la disminución de aportaciones debidas al posible cambio climático con estudios a nivel de cuenca (Ayala e Iglesias 2000) mientras que los cálculos extendidos a subcuencas o unidades más pequeñas (Fernández Carrasco 2002) suelen tener un mayor grado de fiabilidad. Esta afirmación es válida no sola para los estudios de cambio climático sino para la mayor parte de los estudios hidrológicos en España.

La distribución temporal de los parámetros climáticos a lo largo del año, como se ha visto en el punto 1, condiciona completamente la generación de escorrentías. Precipitaciones importantes en épocas muy cálidas no generan aportaciones que si se generarían con precipitaciones muy inferiores en los meses de invierno.

Esta es una incertidumbre especialmente crítica pues puede tener aún mas influencia que el valor de aumento de la temperatura a nivel anual.

De otra parte se tiene la incertidumbre de cómo variaran las series no dentro del año, sino a nivel interanual. Esta información no es conocida ni hasta estimada, conociéndose un solo caso de tanteo en Ayala e Iglesias (2000) donde se definieron unas series anuales que tenían de media la media de la serie media deducida y la desviación típica era coincidente con las de las series actuales. Se tendrán que mejorar los mecanismos de generación de series para corregir en lo posible esta incertidumbre.

Incertidumbres en la distribución espacial y temporal de precipitación y temperatura

La distribución mensual a lo largo del año de precipitación y temperatura
La distribución interanual de precipitación y temperatura (series)
La evaluación a nivel de subcuencas y pequeñas cuencas

7.7.4. Comportamiento del suelo y recarga de acuíferos

Las incertidumbres sobre el comportamiento del suelo y los factores reales que condicionan la recarga son muy variadas y alcanzan desde incertidumbres en los métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial, la intercepción foliar o el balance de agua en el suelo hasta los parámetros que inducen a que la parte de la lluvia útil que pasa a recargar los acuíferos sea mayor o menor. Hay métodos empíricos que se han validado para determinadas zonas con topografías dadas y antes valores climáticos dados, pero que no se tiene validada su utilidad frente a unos valores diferentes inherentes al cambio climático.

En lo referente a la infiltración que va a pasar a formar parte de la recarga de los acuíferos, se sabe que esta no puede producirse mientras el suelo no tenga excedentes. Es decir; cuando el suelo una vez saturado sigue recibiendo agua de precipitación, aparecen excedentes que son la lluvia útil de la cual una parte se infiltra para constituirse en recarga de acuíferos. No se conocen los parámetros que inciden en definir cuantitativamente esta división y es, sin embargo importante conocerlos dado que si como parece, o se plantea a nivel de hipótesis depende del tiempo que el suelo permanece saturado cada año y de los valores de permeabilidad del subsuelo, pudiera ocurrir que el cambio climático podría no afectar a las aguas subterráneas, o afectarlas intensamente en sentido positivo o negativo; la realidad dependería de cada caso.

Incertidumbres del suelo y recarga de acuíferos

Métodos adecuados para estimar la posible evaporación y evapotranspiración
Los fenómenos específicos de la recarga de acuíferos
Cálculos de lluvia útil en las nuevas circunstancias climáticas

7.7.5. Limitaciones de los modelos de simulación

Los modelos de simulación numérica y los analíticos basados en expresiones empíricas han sido usados tradicionalmente con buenos resultados, pero pueden hacerse algunos comentarios aclaratorios. En principio un modelo es tan bueno como los datos que se le suministre, sin embargo los realizados y en realización tienen un proceso de afine o calibración que les da una validez especial a la hora de su explotación. Los modelos para la evaluación de aportaciones frente a las circunstancias específicas que arrastra el cambio climático y que se plasman en unos escenarios determinados no pueden ser calibrados dado que tales series no han ocurrido en la realidad y no es posible en consecuencia comparar lo real acontecido con lo calculado por un modelo.

Los modelos de simulación tendrán que validarse con otras series actuales a las que se tendrá que suponer armonizadas con otras que se derivarán del cambio. Estas son algunas de las limitaciones básicas del proceso de modelado que tendrá que sufrir desarrollos y mejoras cara eliminar en parte sus limitaciones y a su utilización fiable en estudios del cambio climático.

7.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

7.8.1. Evaluación continua de recursos hídricos

El cambio que experimentan los recursos hídricos a consecuencia de los cambios de clima esperables es detectable con el hábito de medida y cuantificación que está establecido en España. Los cambios en los recursos hídricos, se detectan con un plan de medidas de caudales en río, piezométria de aguas subterráneas toma de muestras y análisis de aguas de cauces superficiales y tomas de muestras y análisis de muestras de aguas de captaciones de aguas subterráneas. Todo ello formalizado con la adecuada distribución espacial y frecuencia en la toma de medidas para seguir la evolución de los recursos y su calidad con la fiabilidad necesaria.

En España, existe una buena red foronómica que podría ser mejorada y de hecho suele tener mejoras continuadas. También se tiene una red de calidad de agua de ríos y entre ambas se puede seguir un control continuo en tiempo y espacio de la evolución de aportaciones superficiales en cantidad y calidad.

Han existido también redes razonablemente completas de control de acuíferos, piezometría y calidad y una red muy precaria e insuficiente de control de descargas de fuentes. Estas redes han ido empeorando en la calidad y frecuencia de sus medidas, aunque en el momento actual hay planes para su mejora.

El inconveniente de los datos de medida de caudales, es que no reflejan las aportaciones naturales sino que dan valores de aportaciones excedentarias. La diferencia entre unas y otras es básicamente las detracciones efectuadas para dejar satisfechos los usos del agua. Por ello, junto con las redes de control citadas se requiere una red de medida de usos del agua y está, como tal, no está desarrollada en la actualidad y es recomendable que sea cuidadosamente

diseñada e implementada. Asimismo estas redes deben completarse con redes de control de extracciones de aguas subterráneas.

7.8.2 Sistemas de control de cantidad y calidad. Aguas superficiales y subterráneas

En síntesis los sistemas de control para la evaluación continua de recursos hídricos serían los siguientes.

Aguas superficiales

- Redes de aforos de control de caudales y aportaciones
- Redes de control de avenidas
- Redes de control de la calidad química y bacteriológica en cauces de ríos
- Redes de control de calidad en lagos y embalses
- Redes de control de los usos del agua y derivaciones

Aguas subterráneas

- Redes de control piezométrico en sondeos y piezómetros
- Redes generales de control de la calidad
- Redes específicas de control de la calidad (intrusión marina, nitratos, etc.)
- Redes de control de aforos en fuentes y surgencias y aforos diferenciales en ríos
- Redes de control de bombeo de acuíferos

Estos sistemas de control o están en unos casos bien implantados o en vía de mejora y en otros se requiere y se recomienda su implantación más generalizada. Entre estos últimos se debe mencionar la conveniencia de diseñar e implantar o mejorar claramente la implantación de las redes de control de usos del agua, superficiales y subterráneas y la red de medidas de caudales en fuentes y surgencias.

7.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

La disminución de recursos hídricos incide, como se ha visto, en un gran número de sectores. Dado que la regulación, de estos sectores se lleva a cabo mediante la definición de políticas concretas, el cambio climático afectando a los recursos hídricos implicará necesariamente a la remodelación y redefinición de nuevas políticas.

Política científica y tecnológica

La política científica y tecnológica, se verá implicada con la disminución de recursos hídricos, por el incremento de inversiones y cambios en criterios de priorización que tendrán que presupuestarse cara a los nuevos núcleos de investigación que podrán presentarse tanto en métodos de generación de recursos (desalación) como métodos de lucha contra la contaminación, depuración de aguas y optimización del uso.

Política hidráulica

El cambio climático, con su afección a las disponibilidades de agua, va a deparar en el futuro debates en política hidráulica, seguramente más intensos y de mayor calado que los actuales. Pocas políticas se van a ver tan afectadas y tan de continuo como la política hidráulica.

Uno de los mecanismos de restauración de los impactos en los recursos hídricos causados por el cambio climática, consiste prioritariamente en utilizar un mejor y más adaptado sistema de

recursos hidráulicos y manejarlo de acuerdo a unas reglas de gestión perfiladas hacia el mundo real del binomio recursos – demandas.

La política hidráulica tendrá implicaciones de entidad con la variación de recursos. Los elementos de regulación, suministro, transporte, distribución y protección de la calidad de los recursos hídricos, su interdependencia y sus normas de gestión deberán adaptarse a las directrices políticas en las que se tendrán que priorizar usos y llegar a nuevos y más sólidos compromisos de solidaridad interregional.

Política energética

Es otra de las políticas en las que la previsible disminución de recursos tendrá una incidencia notable. La política energética, se verá incidida en tres aspectos fundamentales; disminuciones de producción de energía de origen hidráulico inherente a la disminución de recursos, aumento del consumo energético por incremento de las operaciones de desalación y bombeos en trasvase y de agua subterránea para paliar los nuevos déficit hídricos.

Se presentarán nuevas disminuciones de recursos por cambio en la distribución temporal de los desembalses para poder atender a otros usos prioritarios, principalmente agrícolas, antes que a la energía hidroeléctrica. Todo esto, tendrá que contemplarse y asumirse en las políticas hidráulicas que sucesivamente se vayan formulando.

Política agrícola

La política agrícola se verá implicada con redefiniciones motivadas por disminución de aguas disponibles para riego. Se fomentará métodos de riego para ahorrar agua y cultivos que requieran menor cantidad de agua consumida. Es posible que se acepten garantías de regadío más relajadas, e incluso que algunas ocasiones se subrogue el uso del agua de riego frente a otros usos más prioritarios como el abastecimiento humano o la ganadería. En la política agrícola se contemplará cada vez más la reutilización de aguas principalmente de origen urbano.

Política medioambiental

El agua se mueve con una doble faceta que propicia su incidencia en la política medioambiental. De una parte es el elemento transmisor, por excelencia, de contaminantes en la geoesfera y de otra el elemento prioritario de dilución de contaminantes.

La política medioambiental se verá afectada teniendo que redefinir los vertidos y sus niveles contaminantes ante posibles reducciones de caudales ecológicos.

Planificación del territorio

Los usos del agua y de la tierra tendrán que planificarse teniendo en cuenta la posible disminución de recursos hidráulicos debida al cambio climático.

La planificación del territorio tendrá que amoldarse a definiciones de uso del suelo más ajustadas a las posibilidades reales de recursos. Es incluso esperable, en ciertos casos, cambios de usos del suelo con usos muy consuntivos de agua a otros usos más ligeros.

7.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

7.10.1. Análisis y enumeración de los parámetros de incidencia

En la generación de escorrentías y posteriormente en la generación de recursos hídricos inciden un gran número de factores, que son los que hacen muy compleja la evaluación del impacto del cambio climático sobre ellos. Se enumeran los que se consideran más significativos de estos parámetros aunque, como ya se ha visto, no todos tienen el mismo nivel de incidencia.

- Disminución de la precipitación
- Aumento de la temperatura
- Distribución en espacios discretos de precipitación y temperatura (con discretización espacial suficientemente baja)
- Distribución temporal a lo largo del año de precipitación y temperatura
- Tipo de tratamiento que se da a estos datos y como se generan las series que intervienen en los cálculos
- Valores de EV y su variabilidad con parámetros climáticos y topográficos
- Valores de ETP y su variabilidad con parámetros climáticos, topográficos y la latitud del lugar
- Intercepción foliar
- Retención del suelo
- Reserva agua utilizable por las plantas
- Gestión de excedentes
- Infiltración de aguas subterráneas
- Sistema de recursos hidráulicos superficial y subterráneo
- Reglas de gestión del sistema
- Métodos de regadío
- Usos del agua

Los parámetros de incidencia se dividen en tres grupos principales; los que dependen del cambio climático y su distribución espacial y temporal, que es la incógnita por excelencia, y la manera de tratarlos, los relativos a la generación de escorrentías en si, en los que entran en juego los procesos en el suelo y, por último, los parámetros de incidencia que se derivan del sistema de recursos hidráulicos disponible y su modo de manejarlo.

7.10.2. Evaluación cuantitativa de niveles de confianza

Evaluar cuantitativamente el nivel de confianza que se tiene en los datos y procesos de la generación de recursos hídricos, empezando por el origen de todo, que es el esperable cambio climático, es una tarea que está dentro del mundo de la hipótesis y no dentro de las afirmaciones validadas como se exige en ciencia. Por ello debe asumirse que lo único que puede darse en lo relativo a niveles de confianza son ideas que variarán con el tiempo y, sobre todo, con la óptica con que se enfoque el análisis.

En lo referente a los datos de base que actualmente se dispone para iniciar los cálculos sobre previsiones de disminución de recursos hídricos, temperaturas y precipitaciones previsibles y su distribución espacial, el nivel de confianza puede considerarse *Baja (**).* Loa datos de base presentan variaciones muy elevadas en las estimaciones a medio y largo plazo teniéndose que realizar lo cual implica el uso de escenarios que difieren mucho unos de otros y que diversifican demasiado los rangos de resultados en las previsiones de escorrentías.

El segundo grupo de parámetros de incidencia, se refiere al conocimiento disponible sobre el proceso de generación de escorrentías y sobre si el proceso conocido actualmente es

convenientemente adecuado para aplicar ante variabilidades importantes de los parámetros climáticos. Debe matizarse que en este proceso se ha tenido hasta hoy un nivel de confianza Alta (****), pero ello era motivado por existir la posibilidad de contrastar los métodos empíricos con la integración del hidrograma obtenido de medidas reales en los ríos. El no poder tener contrastes efectivos, de los recursos que se estimen por métodos basados en el juego del agua en el suelo, hace perder cuando menos un nivel de confianza y por ello se considera el nivel de confianza en los parámetros de incidencia incluidos dentro del grupo del proceso de generación de escorrentías como *Mediana (***).* Dentro de este grupo hay aspectos de mayor nivel de confianza comparados con otros pero la calificación se extiende al grupo entero como media.

Por último, los niveles de confianza que se tienen el sistema de recursos hidráulicos y su manera de manejarlo debe considerarse *Alta (****).* En este grupo de incidencia, lo que se valora es la confianza en el cálculo de recursos hídricos partiendo de escorrentías ya conocidas y de un sistema de recursos hidráulicos existente o diseñable incluidas sus reglas de gestión. Este conocimiento en España es significativamente alto y se dispone de notable experiencia, tanto en el desarrollo de sistemas como en el manejo de modelos numéricos de gestión para apoyo en la adopción de normas de uso de dicho sistemas.

7.10.3 Definición de las necesidades de investigación

Las necesidades de investigación son grandes como seguramente ocurre en casi todos los sectores de influencia del cambio climático, pero siguiendo el orden establecido en los parámetros de incidencia pueden citarse como importantes las siguientes:

Investigaciones tendentes a mejorar y afianzar las estimaciones sobre los valores esperables de precipitación y temperatura con su adecuada distribución espacial y temporal para los diversos horizontes del presente siglo.

Investigaciones tendentes a definir métodos de generación de series de datos climáticos basadas en los escenarios planteados.

Investigaciones para evaluación de evaporación y evapotranspiración en función de topografía, latitud y parámetros climáticos distribuida en tiempo y espacio.

Investigaciones sobre el juego del agua en el suelo, interceptación, reserva de agua utilizable por las plantas, etc., que permita mejorar los métodos empíricos de cálculo de la lluvia útil.

Investigaciones tendentes a estudiar y conocer con mayor fiabilidad los fenómenos de recarga de acuíferos desde el suelo, que en la actualidad solo se estiman por descomposición de la curva de agotamiento del hidrograma.

Investigaciones tendentes al desarrollo de un modelo numérico estándar o análisis y adaptación de entre los existentes que automatice el cálculo de aportaciones superficiales y subterráneas y que se use como modelo de comparación ante diversas hipótesis en los sucesivos estudios. (El modelo diseñado o seleccionado, debería incluir todos los parámetros de incidencia y los índices físicos representativos de la cuenca).

Por último, se debería seguir investigando y diseñando métodos y modelos para apoyo en las decisiones sobre el diseño de sistemas de recursos hidráulicos y su modo de manejarlos.

7.11. BIBLIOGRAFÍA

ACACIA. 1999. Valoración de los efectos potenciales del cambio climático en Europa. Informe ACACIA. Parry M., Parry C. y Livermore M. (eds.).

AEMA. 2002. Uso sostenible del agua en Europa. Gestión de la demanda. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 94 pgs.

Andreu J., Capilla J. y Sanchis E. 1996. AQUATOOL, A Generalized Decision-Support System for Water-Resources Planning and Operational Management. Journal of Hydrology 177 : 269-291.

Ayala-Carcedo F.J. y Iglesias López A. 2001. Impactos del Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular. Instituto Tecnológico y Geominero de España.

Ayala-Carcedo F.J. y Iglesias López A. 1996. Impactos del Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular. Instituto Tecnológico y Geominero de España.

Balairon Ruiz L. 1998. Escenarios Climáticos. Energía y cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente.

Barreira A. 2004. Dams in Europe, The Water Framework Directive and the World Commission on Dams Recommendations: A Legal and Policy Analysis. WWF. http://www.panda.org/news_facts/publications/freshwater/index.cfm?uPage=2

BBVA. 2000. El cambio climatico. El campo de las ciencias y las artes. Servicio de estudios nº 137.

Beguería S. 2003. Identficación y características de las fuentes de sedimento en áreas de montaña: erosión y transferencia de sedimento en la cuenca alta del río Aragón. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.

Bosch J.M. y Hewlett J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology 55: 3-23.

Budyko M.I. y Zubenok 1961. The determination of evaporation from the lands surface. Izv. Akad, Nauk SSSR, Ser. Geogr. 6: 3-17.

CEDEX 1998. Estudio Sobre el Impacto Potencial del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Demandas de Agua de Riego en Determinadas Regiones de España. Informe técnico para el Ministerio de medio Ambiente de España. Madrid.

CRU 1998. Representing twentieth century space-time climate variability. II Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. En: New M., Hulme M. y Jones P. Climate Research Unit. School of Enviromental Sciences, University of East Anglia. Norwich, NR4 7TJ. Reino Unido.

Estrela T. y Quintas L. 1996. El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA. Revista de Ingeniería Civil, no. 104. CEDEX-Ministerio de Fomento.

Estrela T., Ferrer M. y Ardiles L. 1995. Estimación of pre-cipitation-runoff regional laws and runoff maps in Spain using a Geographical Information System. International Hydrological Programme (IHP). UNESCO FRIEND AMHY. Thessaloniki, Greece.

Falkenmark M. 2000. No Freshwater Security Without Major Shift in Thinking. Ten-Year Message from the Stockholm Water Symposia. Stockholm International Water Institute, Stockholm.

Falkenmark M. y Lindh G. 1976. Water for a Starving World. Westview Press, Boulder, CO.

Fernández Carrasco P. 2002. Estudio del Impacto del Cambio Climático Sobre los Recursos Hídricos. Aplicación en diecinueve cuencas en España. Tesis Doctoral. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

Flores-Montoya F., Garrote L.M. y Martín-Carrasco F.J. 2003. The hydrologic regime of the Tagus river in the last 60 years. XI World Water Congress, IWRA, CEDEX, Madrid (CD).

Frisk T., Bilaletdin Ä., Kallio K. y Saura M. 1997. Modelling the effects of climatic change on lake eutrophication. Boreal Environment Research 2 : 53–67.

Gallart F. y Llorens P. 2003. Catchment management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources. Water International 28(3): 334-340.

García-Vera M.A., Coch-Flotats A., Gallart F., LLorens P. y Pintor M.C. 2003. Evaluación preliminar de los efectos de la forestación sobre la escorrentía del Ebro. XI World Water Congress, IWRA, CEDEX, Madrid (CD).

Garrote L., Rodríguez I.C. y Estrada F. 1999. Una evaluación de la capacidad de regulación de las cuencas de la España peninsular. VI Jornadas Españolas de Presas. Vol.2, Málaga. Pgs. 645-656.

Iglesias López A. 1985. Usos y aplicaciones del agua en España. Boletín Geológico y Minero T XCVI-V :(512-540). Pgs. 44-72.

IPCC. 2001. Working Group II. The Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. WMO.UNEP.

IPCC. 2003. Future climate in world regions: and intercoparation of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios.

MIMAM. 1998. El Libro Blanco del Agua en España. Ministerio del Medio Ambiente.

MOPTMA. 1995. Programa Nacional del Clima.

MOPTMA- MINER. 1994. Libro Blanco de las Aguas Subterráneas.

Moral L. del, Werff P. van der, Bakker K. y Handmer J. 2003. Global trends and water policy in Spain. Water International 28(3): 358-366.

Moreno Torres A. 1982. Los usos del agua. Ponencia al cursillo monográfico sobre conservación del patrimonio hídrico. Madrid.

Parry M.L. (ed.). 2000. Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: Summary and Conclusions. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK. 24 pgs.

Pilgrim J.M., Fang X., Stefan H.G. 1998. Stream temperature correlations with air temperatures in Minnesota: implications for climate warming. Journal of the American Water Resources Association 34: 1109–1121.

Prieto C. 1996. La evolución de los recursos hídricos en España. 2ª Conferencia Internacional de Hidrología Mediterránea. Los recursos hídricos en los países Mediterráneos. Iberdrola Instituto Tecnológico, Bilbao. Pgs. 257-288.

WWW. 1999. Escenarios de Cambio Climático para la Península Ibérica. WWW.

UNEP. 1998. Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Africa. UNEP, Technical Publication Series, 8. (http://www.unep.or.jp/ietc/Publications /TechPublications/TechPub-8a/index.asp).

WCD. 2000. Represas y Desarrollo. El reporte final de la comisión mundial de represas. Un nuevo marco para la toma de decisiones. Comisión Mundial de Represas, http://www.dams.org/docs/report/wcd_sp.pdf.

8. IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS EDÁFICOS

V. Ramón Vallejo, Francisco Díaz Fierros y Diego de la Rosa

Contribuyentes

J. A. Alloza, M.T. Barral Silva, F. Gil Sotres, M.C. Leiros de la Peña, F. Moreno, J. Romanyà, P. Rovira

Revisores

T. Carballas, J. Cortina, J. Fons, J. A. González, F. Gozález-Vila, L. Rojo, M. J. Sanz

P. Loveland, M. Madeira

RESUMEN

Una parte importante de la superficie del territorio español está amenazada actualmente por procesos de desertificación, especialmente por el impacto de los incendios forestales, la pérdida de fertilidad de suelos de regadío por salinización y la erosión. Las proyecciones del cambio climático agravarían dichos problemas de forma generalizada y especialmente en la España de clima mediterráneo seco y semiárido.

Uno de los componentes esenciales de la fertilidad natural de los suelos es su contenido en carbono orgánico. Se estima que las variaciones en dichos contenidos oscilan entre menos de 4 kg C. m^{-2} en zonas como el valle del Ebro o la costa sur mediterránea, hasta más de 20 Kg C. m^{-2} en las zonas de montaña del norte o noroeste, e incluso pueden alcanzar los 30 Kg C. m^{-2} en algunos suelos forestales de Galicia, con lo que en el territorio español se encuentran prácticamente las mismas amplitudes de variación en la acumulación de carbono orgánico que en los suelos a escala mundial. Se estima un valor medio de 6-7 % de pérdida de carbono orgánico por cada grado de aumento en la temperatura, valor que puede aumentar o disminuir según sea el cambio en la precipitación y también según características propias del suelo y sus usos. Los modelos del ciclo del carbono y los estudios de transectos climáticos sugieren una disminución generalizada del carbono orgánico del suelo como consecuencia del aumento de la temperatura y de la sequía proyectados por los modelos de cambio climático, lo cual afectaría de forma negativa a las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y aumentaría el riesgo de erosión y desertificación. Las zonas donde cabe esperar pérdidas mayores de carbono orgánico serían las más húmedas (N de España) y para los usos de suelos que comportan contenidos en carbono orgánico más elevados (prados y bosques).

Los cambios en los usos y manejo de los suelos ofrecen muchas posibilidades de contrarrestar los efectos negativos que se vislumbran. Entre ellas, la reforestación de yermos y la práctica de una agricultura que a través del adecuado manejo de las técnicas de cultivo, del laboreo, riego y gestión de las enmiendas orgánicas, aumente los contenidos de carbono orgánico de los suelos y su fertilidad, desencadenando un efecto multiplicador en la capacidad de los ecosistemas para fijar carbono atmosférico. La Estrategia Europea de Conservación de Suelos, la Política Agraria Común, con sus medidas agro-ambientales, el Plan Forestal Español y la planificación de los usos de suelos a las diferentes escalas de gestión son instrumentos que deben permitir la conservación de los recursos edáficos y la mitigación de los impactos del cambio climático en el suelo y los ecosistemas asociados.

Una primera necesidad de investigación básica sobre los recursos edáficos es el inventariado de los mismos a una escala útil a la gestión (al menos 1:50.000), sobre el cual plasmar la evaluación de su estado, planificar su gestión y proyectar las tendencias de cambio. En España existen abundantes datos locales sobre caracterización de suelos que ofrecen grandes posibilidades de explotación científica. Estos datos, dispersos y heterogéneos en su estructura, deberían recopilarse y homogeneizarse utilizando como referencia bases de datos universales, tales como la de FAO-CSIC. Finalmente, los estudios a largo plazo de los suelos en estaciones experimentales representativas de los principales tipos y usos de suelos, en la línea de la red de estaciones experimentales permanentes RESEL (Dirección General de Conservación de la Biodiversidad) ya existente, constituiría un referente de gran valor para detectar los cambios en las propiedades de los suelos.

8.1. INTRODUCCIÓN

El suelo soporta la producción primaria en los ecosistemas terrestres. Por lo tanto, la producción de alimentos y fibras para la humanidad depende en gran medida de los recursos edáficos. A las escalas de tiempo humana y ecológica, el recurso suelo es no renovable, por lo que su conservación es un factor crítico para garantizar las demandas crecientes de alimentos en el mundo.

Los suelos pueden ser fuente y sumidero de carbono (C). Por lo tanto, los suelos contribuyen a la regulación del ciclo del carbono y sus consecuencias en el cambio climático. El cambio de usos del suelo es la fuerza motriz que determina el papel fuente o sumidero de C del suelo. La roturación de tierras ha supuesto una pérdida de carbono orgánico (en adelante OC) y el aumento inmediato de las emisiones de carbono, mientras que la reforestación de tierras cultivadas comporta un aumento en el secuestro de carbono. Sin embargo, el secuestro de C por forestación u otros cambios a usos no agrícolas, sólo recupera muy lentamente el OC perdido por el cultivo y las diferencias de escala temporal entre pérdidas antrópicas y recuperación son generalmente de varios órdenes de magnitud. Por otra parte, las propiedades de los suelos son sensibles al cambio climático. Las predicciones de los modelos de circulación global para la cuenca Mediterránea, que comportarían una acentuación de la sequía, aumentarían el riesgo de intensificación de los procesos de desertificación.

Gran parte de los impactos del cambio climático en los suelos están mediatizados por el OC edáfico. En suelos minerales, la relación aproximada entre materia orgánica y C orgánico del suelo (OC) es 1,724 x % OC = % materia orgánica. El aumento de temperatura incidiría en una mayor tasa de descomposición del OC. El aumento de la sequía tendría un efecto contrario. El posible aumento de la productividad vegetal debido al efecto fertilizador de un aumento del CO_2 atmosférico comportaría aumento de los aportes de OC al suelo, especialmente en cultivos intensivos (sin limitaciones hídricas ni nutricionales). En ecosistemas naturales en los que la productividad está limitada por la escasez de N, la fertilización por contaminación atmosférica de N puede también comportar un aumento de los aportes de OC al suelo. Por el contrario, la disminución de la productividad por intensificación del estrés hídrico conllevaría pérdidas de OC edáfico. El previsible aumento de los incendios forestales (ver capítulo 12) supondría pérdidas de OC (especialmente de la hojarasca) y aumento del riesgo de erosión. Incrementos en la erosión del suelo suponen pérdida de los horizontes del suelo más ricos en OC. En zonas donde los incendios forestales son un fenómeno recurrente, como en la cuenca mediterránea, la producción de formas altamente estables de OC duramte la combustión de biomasa puede contribuir a la estabilización de C a medio plazo. Todos estos procesos no son mutuamente excluyentes y la interacción entre algunos de ellos puede tener un efecto multiplicador.

El OC interviene en la fertilidad y productividad natural de los suelos: 1) como fuente de macronutrientes, especialmente N y P; 2) substrato de la actividad microbiana del suelo; 3) el OC humificado contribuye en gran medida a la capacidad de retención de nutrientes y sustancias contaminantes (capacidad de intercambio catiónico y aniónico); 4) las substancias húmicas de menor peso molecular (ácidos fúlvicos) mejoran la solubilidad de algunos micronutrientes esenciales así como de metales tóxicos; 5) es un factor crítico en la estructuración del suelo y su estabilidad y, en consecuencia, de las propiedades físicas que se derivan: capacidad de infiltración de agua, capacidad de retención de agua útil para las plantas, aireación, compactación, erosionabilidad.

Otro proceso que se verá probablemnet afectado por el cambio climático es la salinización del suelo. Las proyecciones de aumento de la evapotranspiración y de la sequía comportarán la remontada del nivel freático, la intrusión salina y la acumulación de sales en la zona de enraizamiento del suelo en clima árido y semiárido.

En resumen, los procesos que más afectarían a la pérdida de fertilidad de los suelos españoles y a su degradación son: pérdida en el contenido de OC, disminución de la estabilidad estructural, disminución de la actividad biológica del suelo, aumento del riesgo de erosión, extensión de la salinización. Estos procesos pueden ser mitigados con un adecuado manejo de las técnicas de cultivo, del laboreo, riego y gestión de las enmiendas orgánicas, así como de la reforestación de tierras yermas. En definitiva, las técnicas de reducción del impacto climático en los suelos se dirigen especialmente a aumentar los contenidos de OC de los mismos que, a través de una mejora de su fertilidad, desencadenan así mismo un efecto multiplicador en la capacidad de los ecosistemas para fijar carbono atmosférico y con ello contribuir a la mitigación del cambio climático a largo plazo. Los usos de las tierras probablemnete van a cambiar como consecuencia del cambio climático, abriendo oportunidades a nuevos cultivos y variedades adaptados a las nuevas condiciones, incluyendo también los correspondientes cambios en las prácticas agronómicas.

8.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

8.2.1. Características generales de los suelos españoles

Según la cartografía de suelos de España del IGN (1992, tabla 8.1, Fig. 8.1):

- del orden de un 17 % de la superficie corresponde a suelos poco desarrollados, superficiales (gran parte de los Entisoles), generalmente en vertientes, altiplanos y zonas de montaña.
- un 1,6 % suelos de vega, en sentido amplio, fértiles, sobre terrazas fluviales (Fluvents, incluidos en el orden Entisoles).
- un 60% son suelos poco diferenciados pero moderadamente profundos (Inceptisol) y de fertilidad media.
- un 9% de suelos bajo condiciones de clima árido (Aridisoles), incluyendo suelos con acumulaciones de carbonato cálcico, yeso y/o sales.
- Un 9 % de suelos con acumulación de arcillas subsuperficial (Alfisoles), fértiles, de los cuales una tercera parte son los suelos rojos tipicamente mediterráneos.
- Los suelos ricos en OC, muy fértiles, de tipo Mollisol, sólo suponen un 0,20 % del territorio español.
- Un 1,6 % de suelos muy arcillosos, que se agrietan cuandon están secos (Vertisoles) y se dedican mayoritariamente a la agricultura. Los Vertisoles se distribuyen especialmente en Andalucía y Extremadura.
- Los suelos ácidos bien desarrollados (Ultisoles y Spodosoles) sólo ocupan un 0,4 % del territorio, fundamentalmente en el norte de España.
- Finalmente, los suelos orgánicos (Histosol), con un alto contenido en carbono orgánico, son sólo anecdóticos en España (0,04 %) aunque presentan un importante valor ecológico y científico.

8.2.2. Procesos edáficos especialmente sensibles al cambio climático

Se entiende por sensibilidad de los suelos al cambio climático (CC) como la intensidad y extensión de la respuesta generada en las propiedades y procesos edáficos como consecuencia de la modificación en los parámetros del clima.

Propiedades edáficas que pueden ser modificadas por el CC serían el contenido en OC, características de la biota edáfica, regímenes de humedad y térmico y procesos como la erosión, salinización o fertilidad física, química y biológica. Los parámetros climáticos que pueden actuar como factores de estos cambios serían la temperatura, precipitación (cantidad y distribución temporal), así como las propiedades químicas de la atmosfera, especialmente el contenido en dióxido de carbono y compuestos de nitrógeno y azufre.

Tabla 8.1. *Relación de órdenes de suelos (USDA 1987) en España. Fuente: IGN 1992 (De la Rosa 2001).*

Orden	Unidades	Porcentaje, %	Extensión, ha
Alfisols	368	8,86	4507160,2
Aridisols	411	9,19	4672759,6
Entisols	830	18,90	9613443,7
Histosols	4	0,04	20813,2
Inceptisols	1612	60,73	30891369,6
Mollisols	2	0,21	104746,5
Spodosols	62	0,22	112146,8
Ultisols	5	0,24	121689,9
Vertisols	51	1,62	826275,5
TOTAL	**3347**	**100**	**50870405,1**

SEIS.net (Sistema Español de Información de Suelos en Internet (de la Rosa 2001, http//:www.microleis.com) recoge en formato manejable la información disponible sobre el estado actual de calidad y degradación de los suelos en España, incluyendo un atlas Digital de Comarcas de Suelos y una Base de Datos de Suelos *on-line.*

Fig. 8.1. *Mapa de subórdenes de suelos de España, según Soil Taxonomy, USDA 1987); IGN 1992 / SEISnet (De la Rosa 2001).*

Muchas propiedades de los suelos tienen bastante inercia frente a variaciones del clima y no son fáciles de detectar frente al fuerte impacto de los usos de suelos y sus cambios, más teniendo en cuenta la gran variabilidad espacial de los suelos. No es posible, por lo tanto, en el estado actual de los conocimientos, determinar las sensibilidades de los suelos españoles a las variaciones del clima actual de una forma precisa y cuantitativa, pero sí se pueden aportar algunos ejemplos donde quedan patentes estas relaciones entre clima y suelo:

a) Mineralización del OC. Teniendo en cuenta que este proceso es dependiente, en primer lugar, del clima edáfico, se puede considerar que dentro de ciertos umbrales a mayor temperatura y mayor número de días del suelo con humedad superior al punto de marchitez, más intensa será la mineralización del OC, por ello la coincidencia del regimen de temperaturas "térmico" con el de humedad "údico" o, incluso, "ústico" (Fig. 8.2) definiría aquellas regiones donde la sensibilidad de los suelos españoles a esta degradación de la materia orgánica sería más elevada en términos de pérdida absoluta de OC. Hay que tener presente que los cambios en la naturaleza (composición) de la materia orgánica pueden ser tan importantes como los cambios en los contenidos totales.

b) Fertilidad física del suelo. Aceptando, como es común, que el umbral del 2,3 % de OC de los suelos define un límite, del que si se desciende se aceleran de forma significativa los procesos de degradación física, se puede considerar que aquellos suelos que tengan valores inferiores a dicho umbral (en el mapa de la Fig.8.7 los que presentan menos de 12 Kg C m^{-2}) seran los más sensibles a la degradación física del suelo e, incluso, por los efectos que tiene esta sobre los procesos biológicos y químicos, sobre el conjunto de la fertilidad. No obstante, dicho umbral debe tomarse como un indicador genérico que no debería aplicarse directamente a la evaluación específica y detallada de los suelos.

c) Erosión del suelo. De acuerdo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, ampliamente utilizada para la predicción de la erosión hídrica, el factor K es el parámetro que define la sensibilidad del suelo a este tipo de degradación. El factor k depende del contenido en OC, la textura y la estructura del suelo, siendo la primera y la última de estas variables sensibles al cambio climático. Cabe asimismo esperar un aumento en la erosión eólica en la medida en que aumente la frecuencia de eventos tempestuosos y disminuya la cubierta vegetal.

d) Salinización. La aridización del clima, combinada con la puesta en regadío en suelos de pobre drenaje, constituye un riesgo de salinización del suelo y, eventualmente, de las aguas de escorrentía.

8.2.3. Usos de suelos

A corto plazo, los cambios de uso del territorio obedecen sobre todo a factores culturales, políticos y socioeconómicos, más que al impacto directo del clima. Sus efectos sobre el suelo pueden ser tanto o más importantes que los del mismo cambio climático (Vitousek 1992). En el último medio siglo, España, como gran parte de Europa, ha sufrido grandes transformaciones del territorio, transformaciones que continúan manifestándose e interaccionarán de forma compleja con los efectos del cambio climático en los suelos.

El abandono de cultivos marginales que se ha ido produciendo durante el siglo XX en España, especialmente a partir de los años 60, reforzado en la última década por la Política Agraria Común de la CE, acompañado por extensas reforestaciones (más de 3 Mha, ICONA 1989), ha dado lugar a un incremento en el secuestro de carbono en vegetación y suelos. La aparición de los grandes incendios forestales a partir de mediados de los 70 debe haber contrarrestado, en parte, esta acumulación de carbono, en la medida que los incendios incontrolados suelen consumir parte del sotobosque, parte de las ramas finas de los árboles y la hojarasca (del

orden del 65 % del C contenido en el conjunto de dichas fracciones en un incendio experimental de elevada intensidad, Serrasolses y Vallejo 1999).

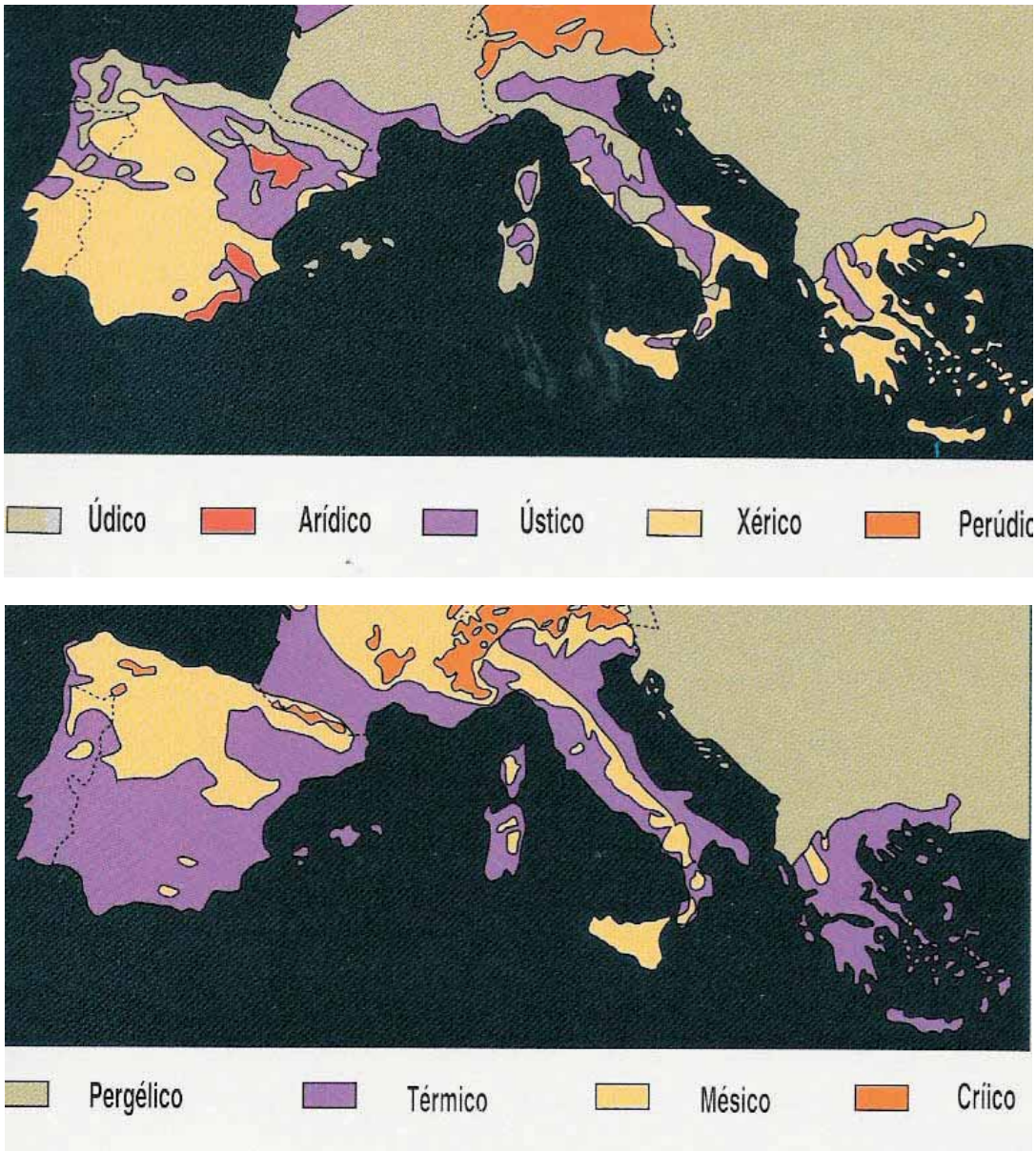


Fig. 8.2. *Regímenes de humedad (arriba) y de temperatura (abajo) según los criterios de la Soil Taxonomy para el sur de Europa. Adaptado del Mapa de Suelos de las Comunidades Europeas 1:1.000.000 (CEC 1985).*

Según datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente España, después de Francia, es uno de los países europeos que más territorio agrícola ha perdido durante los años noventa (1,8% de su territorio). Una parte significativa del territorio se ha dedicado a la urbanización (0,3%) mientras que el resto (1,5%) se ha transformado en territorio forestal (básicamente en ecosistemas de regeneración natural y en plantaciones forestales). La reducción de tierras de cultivo por urbanización se concentra especialmente a lo largo de la costa y cerca de las

grandes áreas metropolitanas. En este caso aparece el problema del sellado del suelo que produce la destrucción física de los suelos o modifica profundamente sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Además, el sellado puede ocasionar problemas hidrológicos, incrementos locales de temperatura, cambios en los niveles freáticos, mayor movilidad de los contaminantes y sobrecarga en los cursos de agua, especialmente durante las lluvias torrenciales. Donde las aguas contaminadas alcanzan estuarios y zonas costeras pueden producir su degradación, en relación directa con los procesos degradativos del suelo.

Los cuatro escenarios económicos del IPCC conllevan predicciones sobre cambios de usos de suelos entre 1990-2050. Se pueden resumeir en los aspectos que afectan a los usos de suelos como sigue:

- A1 (rápido crecimiento económico): disminución ligera de tierras cultivadas, aumento de pastos. Disminución de bosques y otros usos. Este escenario supone que se mantienen las tendencias anteriores en los cambios de usos de suelos, gobernadas por las fuerzas económicas.
- A2 (identidades locales). No se han desarrollado explicitamente cambios de usos de suelos en este escenario.
- B1 (economía de servicios e información): disminución más ligera que en A1 de la superficie cultivada, disminución de pastos y aumento de bosques y otros usos.
- B2 (economías locales, sostenibilidad): aumento importante de los cultivos y pastos, disminución de bosques y fuerte disminución de otros usos.

Estos escenarios no discriminan la localización de los cambios, que evidentemente variará geográficamente. En Europa (y España), los escenarios económicos A1 y B1 comportarían a medio plazo la continuidad del lento abandono de tierras agrícolas marginales. Probablemente, a pesar de las predicciones de A1 y B2, los bosques aumentarían su superficie a partir de la colonización de cultivos abandonados. Por lo tanto, sería interesante considerar las opciones que contemplan la gestión adecuada de las tierras marginales abandonadas y a la restauración forestal.

8.2.4. Desertificación

España es uno de los países afectados por procesos de desertificación (Convenio de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación, Anexo IV) fomentados por las actividades humanas bajo condiciones de aridez (Fig. 8.3). Las cuencas afectadas por la desertificación se definen a partir de las estimaciones de la erosión del suelo, la superficie afectada por incendios forestales, el grado de explotación de los recursos hídricos y la sequía (ver borrador del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación, PAND, del MMA). Dos componentes fundamentales de la desertificación en España son la erosión (Fig. 8.4) y la salinización del suelo. En el momento presente, se reconoce que un 31,5 % de la superficie española está afectada gravemente por la desertificación (PAND, MMA). Según las mismas fuentes, un 42 % de la superficie nacional estaría por encima de los límites de erosión tolerables y afectaría principalmente a las cuencas del Guadalquivir, Ebro, Tajo y Sur (Fig. 8.4). En España, en 1991 se estimaba que los costes directos de la erosión ascendían a 280 millones de € y el coste de las medidas de recuperación exigiría un desembolso de 3.000 millones de € en un periodo de 15-20 años.La erosión hídrica en condiciones mediterráneas es altamente episódica en la actualidad. Por ejemplo, en un complejo de cuencas en condiciones de clima mediterráneo seco en Valencia, sólo se registran 3 a 4 eventos sedimentarios por década, con umbrales de precipitación productiva entre 30 y 60 mm dia-1 (S. Bautista, comunicación personal, proyecto europeo SPREAD). Evidentemente, los cambios predichos sobre un aumento de los eventos climáticos extremos en España (Millán et al 2004, en prensa) redundarían en un agravamiento del riesgo de erosión.

Según el mapa de suelos de España IGN 1992 Fig. 8.1), los suelos salinos (*Salorthids*) ocuparían unas 180.000 ha, un 0,35% de la superficie nacional. En la UE, la salinización del suelo afecta a 1 millón de hectáreas, principalmente en los países mediterráneos (C.E. 2002). El problema de la salinización de los suelos afecta en grado severo a un 3 % y bajo alto riesgo a un 15% de los 35.000 km^2 de regadío existentes en España, especialmente en las cuencas del Guadalquivir, Ebro, Guadiana, Tajo, Sur, y a lo largo de la costa levantina (PAND, MMA).

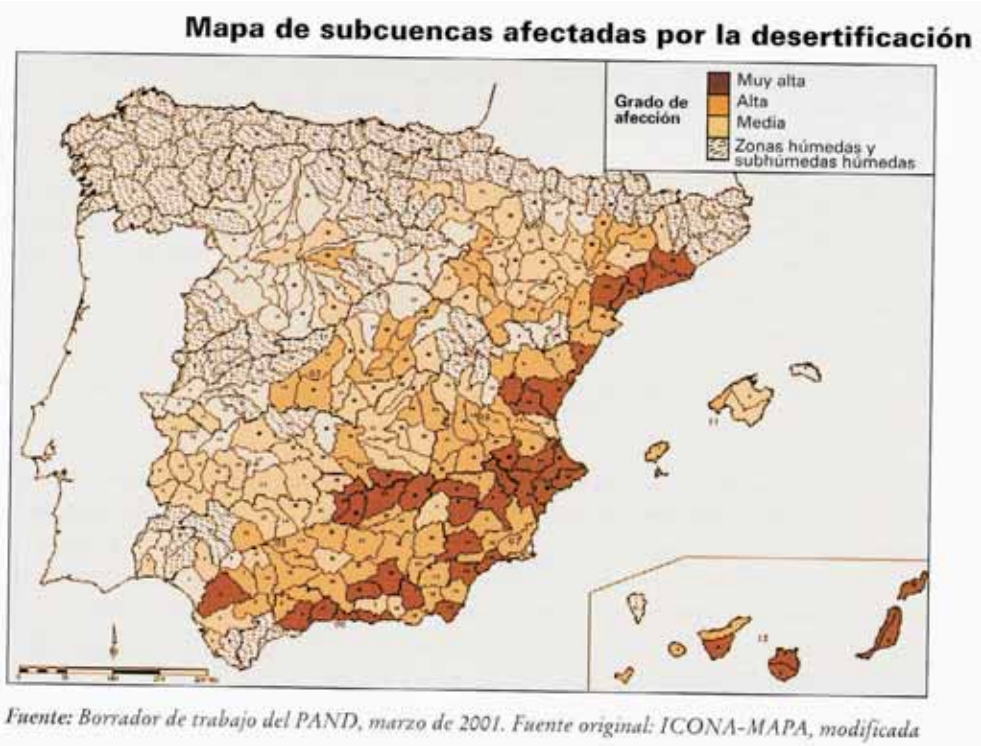


Fig. 8.3. *Mapa de subcuencas afectadas por la desertificación en España.*

Fig. 8.4. *Mapa de estados erosivos de España con las estimaciones de pérdida de suelos.*

8.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

8.3.1. Impactos en la evolución del suelo

La relación de los tipos de suelos con la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración es bien conocida. Sin embargo, sólo ciertas propiedades pueden ser alteradas, en cortos espacios de tiempo, por cambios en los factores climáticos, como por ejemplo el contenido en sales solubles. Así cabe esperar que los suelos afectados por la salinidad cambien su distribución (Salorthids, Soil Taxonomy, de la Fig. 8.1).

Debido a los posibles cambios de temperatura, más acusados en las zonas de mayor latitud, la pérdida de materia orgánica en suelos de turberas puede ser rápida y muy importante (*Histosols* en la Tabla 8.1 y Fig. 8.1). No obstante, el impacto global de tales pérdidas de OC sería poco relevante debido a la poca extensión de turberas en España.

8.3.2. Salinización: en relación con el cambio climático y la intensificación de la agricultura

La salinización de los suelos es probablemente el proceso de degradación más importante en términos de producción de fibra y alimento en los países de clima árido y semiárido. La causa más común de salinización se relaciona con el regadío en áreas con pobre avenamiento, suelos de textura fina, con la utilización de agua con exceso de sales para el riego y con las intrusiones marinas. Los nuevos planes de regadío en zonas sensibles y la intensificacíón de la agricultura y sobre-explotación de los acuíferos son los agentes causantes de la salinización predominantes en España. El Plan Nacional de Regadíos (Dirección General de Desarrollo Rural 2001) prevé la ampliación de los regadíos en España en el horizonte del 2008.

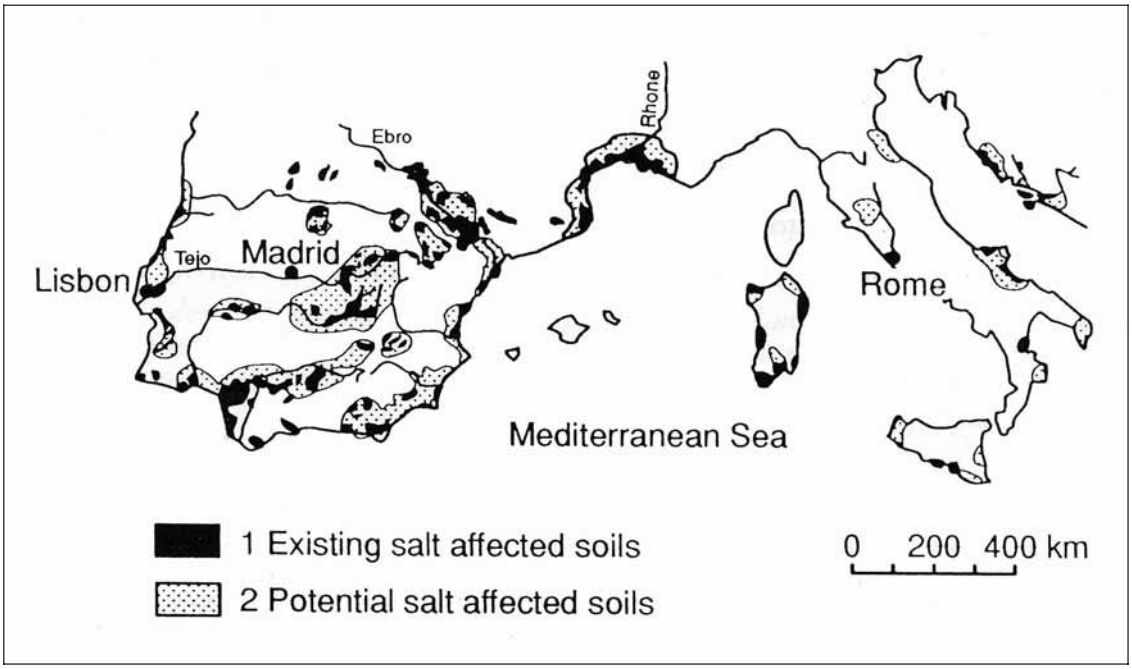


Fig. 8.5. *Distribución de los suelos salinos y su expansión potencial como consecuencia del cambio climático (Pérez-Trejo 1992).*

El problema de la salinidad se relaciona con la presencia de sales más solubles que el yeso en el suelo, generalmente NaCl y Na_2SO_4 (los sulfatos abundan en zonas del interior). Cuando el

balance hídrico del suelo no produce excedentes de agua (o no se drenan eficazmente, produciéndose encharcamiento), las sales tienden a acumularse en la capa arable, afectando osmóticamente a la absorción de agua por la planta (sequía fisiológica) y produciendo toxicidad. La puesta en regadío en suelos con alto contendio en sales puede agravar el problema si no hay un drenaje adecuado. Esta acumulación de sales, por lo tanto, es característica de climas con una baja relación P/ETP (Precipitación/Evapo-Transpiración Potencial). En la medida en que las proyecciones del cambio climático auguran para España una disminución de dicha relación, cabe esperar que los problemas de salinización se acentuen. Asimismo, la posible subida del nivel del mar agravará los problemas de intrusión marina en los freáticos y de extensión de la salinización en las zonas costeras.

Por lo tanto, la intensificación de la agricultura en las grandes cuencas hidrográficas y en las zonas costeras del E y SE español, acompañada de una aridización del clima, va a producir una expansión grave del problema de la salinización (Fig.8.5), con importantes repercusiones en la reducción de las cosechas y/o fuerte demanda de inversiones para mitigar el problema.

La corrección de los suelos salinos cultivados es difícil y costosa. Las técnicas se basan en el lavado de las sales, utilizando drenajes y agua no salina en gran cantidad, complementado con la utilización de cultivos tolerantes a la salinidad y técnicas de cultivo que minimicen la acumulación de sales en la zona de enraizamiento (por ejemplo el acolchado). En cualquier caso, la corrección de la salinidad en unas tierras siempre traslada el problema (las sales) aguas abajo, al río o las tierras colindantes de cotas inferiores (Vallejo 1999) , col la posibilidad de una mayor salinización de las zonas costeras.

En algunos casos, los suelos salinos naturales han sido objeto de proyectos de recuperación para su utilización agrícola. Un ejemplo lo tenemos en las marismas del Guadalquivir, en las que un área de unas 50.000 ha se ha recuperado mediante la instalación de un sistema de drenaje y riego (Grande Covián 1967) y que en la actualidad es utilizada para cultivos de algodón y remolacha azucarera principalmente, con buenos resultados. En esta área, Moreno *et al.* (1995) han realizado estudios sobre la dinámica de sales y agua, mostrando sus resultados el buen funcionamiento del sistema de drenaje y el lavado de sales durante los períodos de cultivo con riego.

8.3.3. Balance de OC

En un contexto mediterráneo, en el que los suelos suelen ser pobres en materia orgánica, su aumento puede favorecer tanto las propiedades físicas como químicas y biológicas de los suelos degradados.

8.3.3.1. Impacto del suelo en el cambio climático

Además de los impactos del cambio climático sobre las propiedades del suelo y su funcionamiento, resulta también del mayor interés conocer la influencia del suelo sobre dicho cambio. La cantidad global de carbono orgánico en el suelo tiene una influencia directa en los niveles de CO_2 atmosférico. Ligeros cambios en el OC, ya sean positivos o negativos, pueden tener un efecto apreciable sobre el CO_2 atmosférico. Por otra parte, en suelos encharcados de forma permanente o temporal, las emisiones de CH_4 (metano) y N_2O (óxido nitroso) también contribuyen al efecto invernadero.

El secuestro del carbono orgánico por los ecosistemas terrestres forma parte de un ciclo biológico muy activo, por lo que una parte importante del carbono actualmente retenido por los suelos puede volver a la atmósfera en un tiempo relativamente corto. De esta forma, el secuestro del carbono por los ecosistemas terrestres se debe considerar como un

almacenamiento temporal más bien que permanente. En este sentido, se estima que los suelos dedicados al cultivo han perdido entre un 20-40% de su OC respecto al que tenían con vegetación natural y se considera que mediante la utilización de prácticas de laboreo de conservación es posible el recuperar en parte los niveles de OC del suelo originarios.

Dentro de los ecosistemas terrestres, el almacenamiento actual de carbono es mucho mayor en los suelos que en la vegetación, particularmente en los ecosistemas no forestados de latitudes medias y altas. Además, el retorno del carbono almacenado a la atmósfera es más lento en el suelo que en la vegetación. También, el carbono retenido en el suelo se encuentra bastante mejor protegido contra los incendios y otras perturbaciones.

8.3.3.2. Contenido en carbono de los suelos españoles

El contenido en carbono del suelo es el resultado del balance entre los procesos de aporte de OC y de mineralización de la misma, ambos dependientes de las condiciones climáticas. A partir de las estimaciones de Tinker y Ineson (1990, retomadas por Bottner *et al.* 1995 para discutir los suelos mediterráneos, Figura 8.6), la distribución del contenido en carbono de los suelos del mundo varía entre menos de 2 kg C m^{-2} para los suelos de las zonas subdesérticas hasta más de 30 Kg C m^{-2} de las zonas de tundra y bosque húmedo.

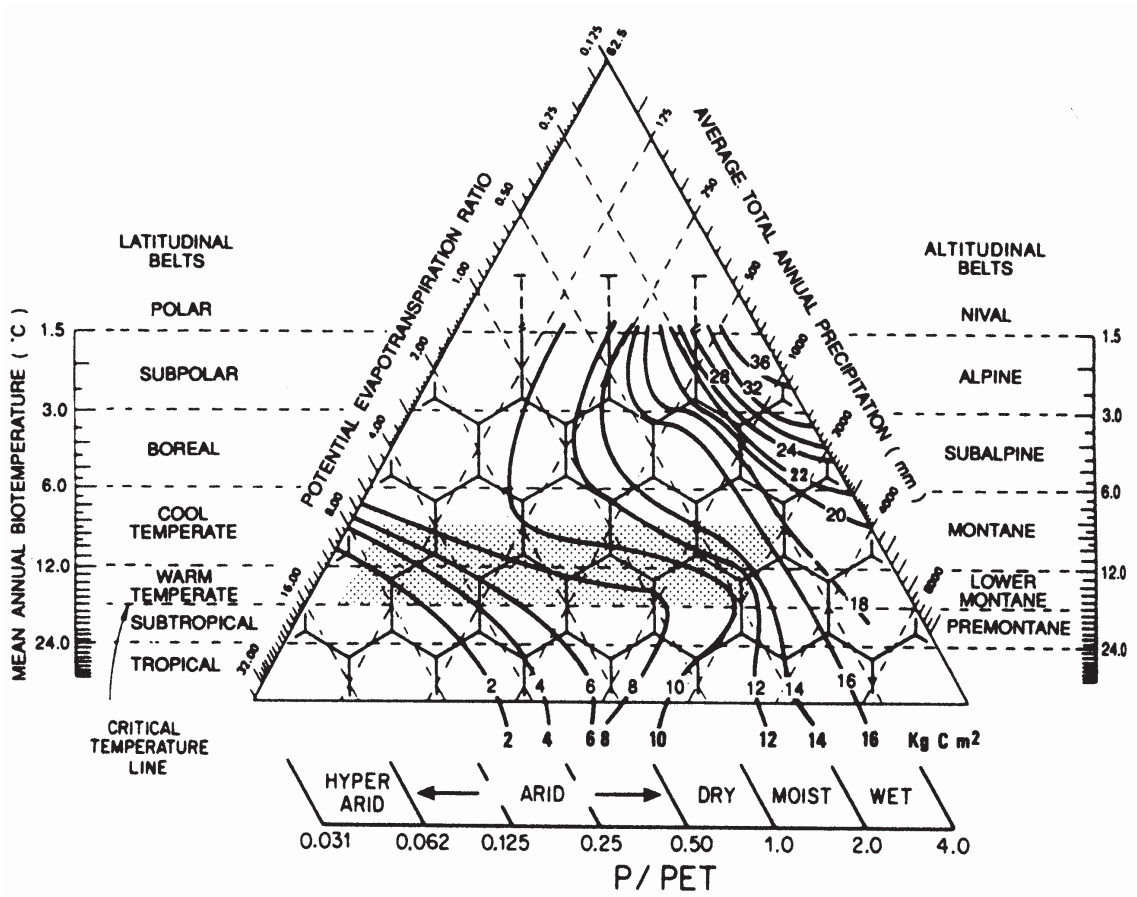


Fig. 8.6. *Contenido en carbono orgánico (en Kg. m^{-2}) de los suelos del mundo. Bottner et al., 1995. En sombreado, el rango correspondiente a los suelos mediterráneos.*

Para España, Rodriguez-Murillo (2001) tomando como base un conjunto de 1.030 perfiles de suelos realiza un estudio de la distribución geográfica de su contenido en carbono, construyendo un mapa (Figura 8.7) en donde estima que las variaciones oscilan desde menos

de 4 kg C m^{-2} en zonas como el valle del Ebro o la costa sur mediterránea, hasta más de 20 Kg C m^{-2} en las zonas de montaña del norte o noroeste. En el mismo sentido, para suelos agrícolas, las acumulaciones de carbono orgánico son superiores en suelos españoles de clima atlántico que en los de clima mediterráneo (Fig. 8.8). Barral y Díaz-Fierros (1999) señalaban que los suelos forestales gallegos podían alcanzar los 30 Kg C m^{-2}, con lo que se ponía de manifiesto que en el territorio español se daban prácticamente las mismas amplitudes de variación en la acumulación de OC que en los suelos a escala mundial.

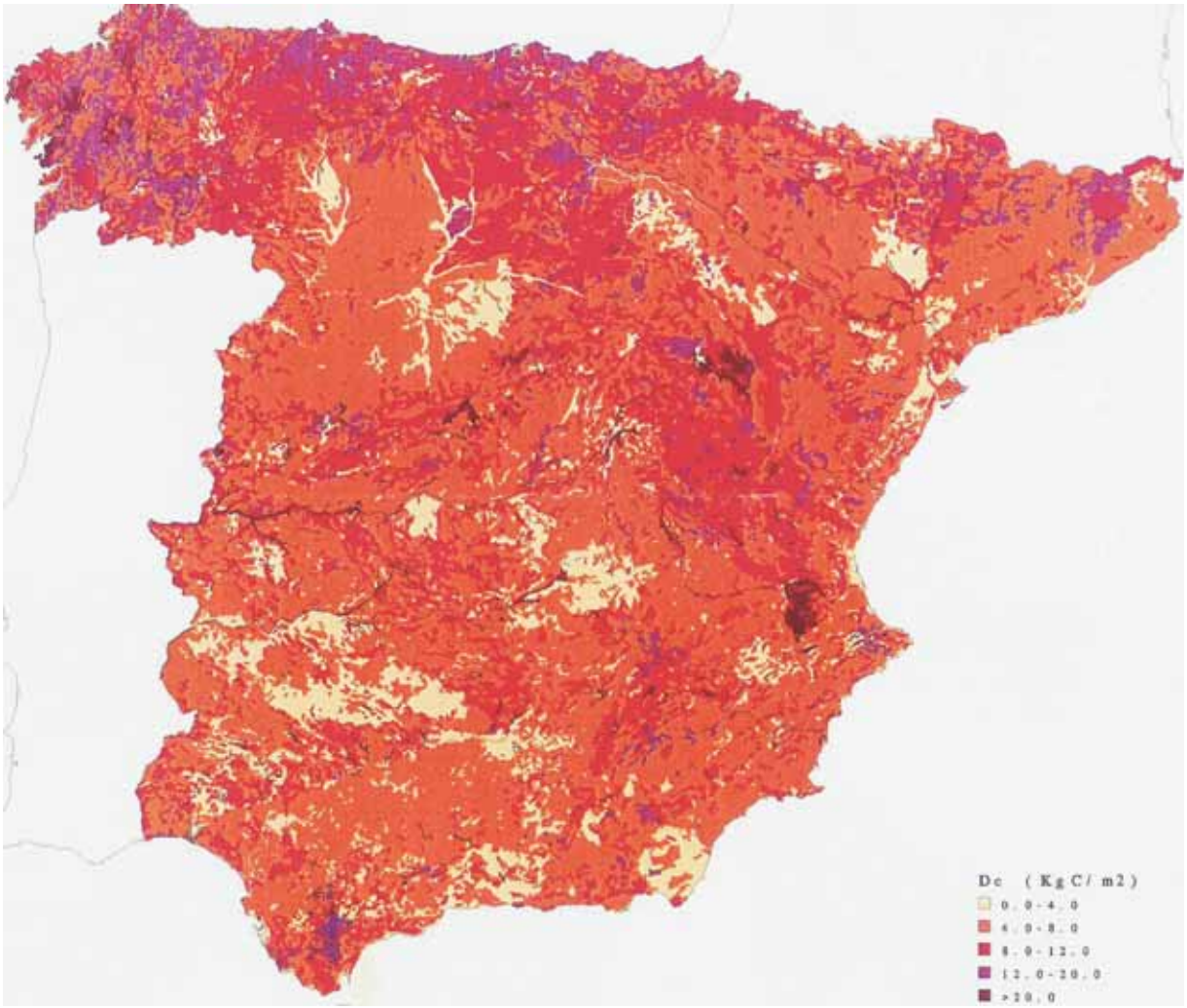


Fig. 8.7. *Contenido en carbono orgánico (hasta 1 m de profundidad) en los suelos españoles (Rodriguez-Murillo 2001).*

El segundo factor en importancia que regula el contenido en OC es el tipo de uso, así como el manejo a que está sometido el suelo (Tabla 8.2, Fig. 8.9). El mismo estudio de Rodriguez-Murillo (2001) presenta una tabla donde relaciona los principales usos del suelo con su contenido en carbono, encontrando que los de matorral son los que lo presentan en mayor proporción, con un contenido medio de 11,3 Kg C m^{-2}, seguidos de los de bosque caducifolio con valores de 9,36, mientras que son los cultivos de secano, con 5,08 Kg C m^{-2} los que lo presentan en menor cantidad. Los sistemas de cultivo que restituyen OC mediante abonado, barbechos, enterrado de resíduos de cosechas, etc., mantienen siempre más elevado el contenido orgánico del suelo que aquellos que no lo hacen o realizan quemas de rastrojos, que aceleran la mineralización.

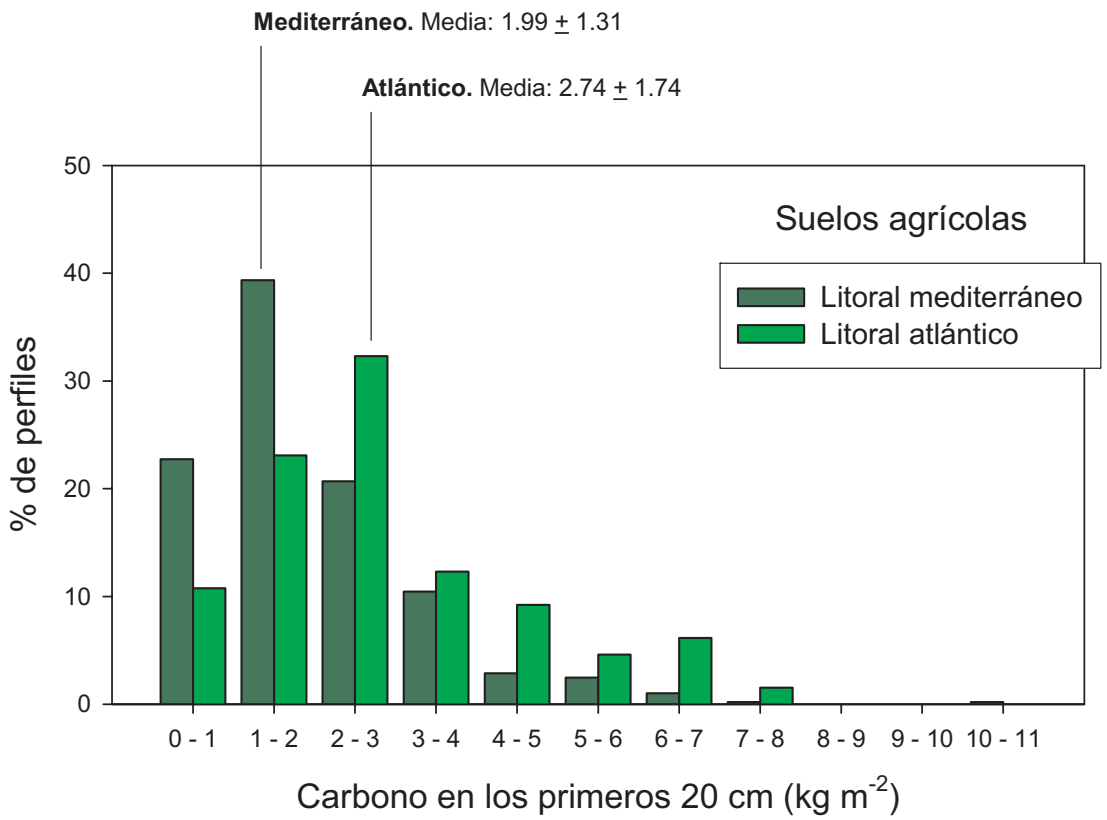


Fig 8.8. *Acumulación de carbono en la capa arable de suelos españoles de clima mediterráneo y atlántico. Fuente: Rovira y Vallejo (comunicación personal), Evaluación del C en los suelos del área mediterránea, OECC.*

Tabla 8.2. *Carbono total bajo los principales usos del suelo en la España Peninsular. Según Rodríguez-Murillo (2001).*

Uso del suelo		Superficie Km^2	Carbono kg m^{-2}	Carbono total Tg
Bosques	Coníferas	63 010	7.50	473
	Planifolios	23 991	9.36	225
	Mixto	18 934	12.1	229
	Total	105 935	8.74	926
Matorral		78 492	11.3	890
Matorral + arbolado		40 938	8.20	336
Cultivos secano		121 740	5.08	618
Otros		147 458	6.28	926

8.3.3.3. Efecto del cambio climático sobre el OC del suelo en España

El cambio climático va a ejercer una influencia sobre el contenido en OC del suelo a través de un efecto directo sobre los procesos de acumulación y mineralización y otra indirecta a partir de su influencia sobre los cambios de uso del suelo. Según diferentes estudios, realizados a partir de modelos, es probable que sea más importante la influencia ejercida indirectamente sobre los cambios de uso del suelo que la desarrollada directamente sobre los procesos que regulan el balance de OC del suelo (Parshotam *et al.* 2001). No es posible hacer predicciones precisas sobre la respuesta de los ecosistemas a estos cambios. Subsisten grandes lagunas de conocimiento, porque la mayor parte de los trabajos publicados simulan experimentalmente un aumento del CO_2 atmosférico, o un aumento de la temperatura (con o sin disminución de la precipitación), pero no ambos efectos a la vez. Pueden mencionarse, sin embargo, dos grupos de efectos:

A) Efectos del aumento de CO_2 atmosférico

Posible aumento de la producción primaria. Admitiendo un aumento de la producción primaria derivado del efecto fertilizante del aumento de CO_2 atmosférico, el mantenimiento del carbono secuestrado en el suelo sería importante si la asignación del plus de carbono fijado pasa a formas de carbono de descomposición lenta (carbono estructural: lignocelulosa, suberina, formas resistentes varias). La información disponible parece sugerir lo contrario. En ecosistemas pratenses de USA, en clima mediterráneo, Hungate et al (1997) observan en tres años un aumento de la biomasa, raíces, detritus enterrados y OC del suelo. Sin embargo el aumento de la OC del suelo parece concentrarse en fracciones lábiles, cuya estabilización a medio plazo no está clara: podría perderse con la misma facilidad con que se ha acumulado. Más importante que el aumento en sí es la aceleración del ciclo de carbono en el suelo. Los autores se muestran escépticos acerca de la capacidad de estos prados para acumular más carbono. La combinación del aumento del CO_2 junto al de la temperatura resultaría en una disminución de la producción primaria a medio plazo (ver capítulo 9 y apartado B más abajo).

Disminución de la calidad del OC. En concreto, aumento del índice C/N. Se considera un resultado probable del aumento del CO_2 atmosférico, que en principio debería traducirse en una descomposición más lenta de los residuos vegetales, y por tanto en una mayor acumulación de carbono en el suelo. No está claro si ello ocurrirá realmente, porque los estudios experimentales no han detectado de un modo concluyente que los restos provenientes de plantas cultivadas en atmósfera enriquecida en CO_2 se descompongan más lentamente que los de plantas control. De Angelis *et al.* (2000) observan una disminución de la tasa de descomposición en tres especies mediterráneas, pero la disminución observada es ínfima y sería indetectable en condiciones reales. Particularmente importante es la observación de Coûteaux *et al.* (1991), de que el resultado depende de la riqueza de la comunidad animal del suelo y de la complejidad de su red trófica: en suelos con una comunidad pobre y una red trófica sencilla, la hojarasca obtenida en atmósfera enriquecida en CO_2 se descompone más lentamente que la hojarasca control, pero este resultado se invierte en caso de haber en el suelo una comunidad variada y una red trófica compleja.

Efectos sobre la actividad microbiana. Se han observado efectos positivos sobre la actividad microbiana y actividades enzimáticas varias (Moscatelli *et al.* 2001), que en principio se traducirían en una mayor actividad descomponedora y por tanto en una disminución del contenido de carbono en el suelo. Sin embargo los efectos parecen ser a corto plazo; en pocos años se vuelve a los valores de actividad normales. Este resultado debe tomarse con precaución, porque es prácticamente imposible separar los efectos directos sobre las actividades microbianas de los efectos indirectos debidos al aporte de exudados radiculares y otras formas lábiles de carbono por parte de las raíces, que también sufren un aumento debido al incremento de CO_2 (y que tampoco se mantienen más allá de unos pocos años).

B) Efectos del aumento de la temperatura

La producción primaria aumentaría si no se produjera una disminución sustancial de la disponibilidad de agua. Para España, los modelos proyectan una disminución a medio plazo de la producción de los bosques aunque se vería acompañada de un aumento de los aportes de hojarasca por disminución de su vida media (capítulo 9). En un transecto de pinares europeo, desde Escandinavia hasta España, Berg *et al.* (1999) muestran que los aportes de hojarasca (de la fracción acículas) disminuye linealmente con la latitud entre 48 y 67º N, mientras que vuelve a disminuir en condiciones mediterráneas. Probablemente, en este transecto aparece el factor sequía como reductor de los aportes en las parcelas mediterráneas.

Aumento de la tasa de descomposición. El aumento de la temperatura afecta más a la tasa de descomposición que a la producción primaria, por lo que el resultado neto debería ser una disminución del contenido de OC del suelo (Batjes y Sombroek 1997). En principio, el trabajo con suelos reales parece confirmar esta predicción (véase más abajo), aunque la situación será probablemente más compleja, puesto que si el aumento de la temperatura media se acompaña de un aumento de la aridez, la tasa de descomposición debería disminuir. Los resultados obtenidos en el experimento VAMOS (Bottner *et al.* 2000, Fig. 8.9) ilustran esta predicción: en un transecto de suelos forestales, desde el norte de Suecia hasta la Comunidad Valenciana, la traslocación de horizontes orgánicos y minerales de Norte a Sur (del N de Suecia al S de Suecia, del S de Suecia a Inglaterra) se tradujo en un aumento de su tasa de mineralización, lo que sugiere que en tales latitudes la temperatura es el principal factor limitante. Sin embargo, en la zona mediterránea se invertía la tendencia: al traslocar el suelo de Inglaterra al S de Francia y del S de Francia a zonas mediterráneas más áridas (Lleida o Castellón) se producía una disminución de la tasa de descomposición: la temperatura media dejaba de ser el factor limitante para la actividad microbiana, y la disponibilidad de agua pasaba a ser el condicionante principal.

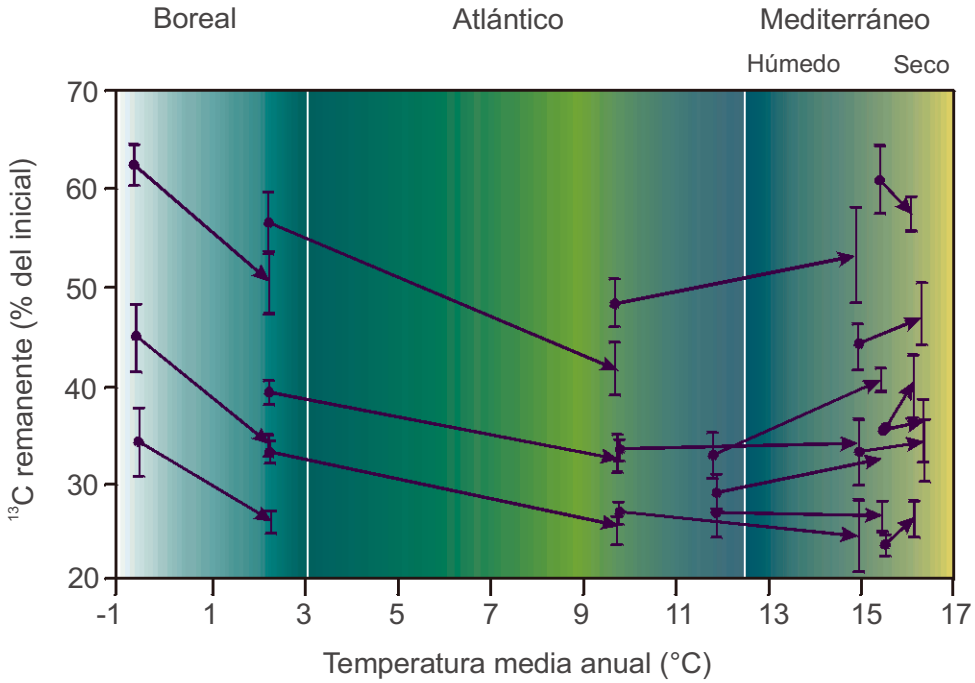


Fig. 8.9. *Carbono marcado (C^{13}) residual en el suelo, tras la incubación, en % respecto del inicial para horizontes orgánicos y minerales de pinares. Las flechas unen las dos estaciones objeto de la translocación de suelo: la estación origen (círculo) y la estación destino (punta de flecha), que siempre estaba situada más al Sur. Se observa cómo al pasar de Norte a Sur, en el ámbito Boreal y Atlántico, disminuye el % de C^{13} remanente, lo que indica un aumento de la tasa de descomposición. Al pasar de Atlántico a Mediterráneo húmedo, y de Mediterráneo húmedo a seco, la tendencia se invierte, al pasar el déficit hídrico (y no la temperatura) a ser el factor limitante principal. De Bottner et al. (2000), algo simplificado.*

En las zonas de alta montaña, el calentamiento proyectado junto a un manteniemiento o reducción poco significativa de las precipitaciones comportaría un aumento de la actividad microbiana y una descomposición más rápida del OC almacenado en estos suelos.

En los últimos años se comenzaron a realizar experiencias de simulación de la influencia del cambio climático sobre los procesos que regulan el contenido en OC de los suelos, sobre todo a partir de la determinación de las emisiones de dióxido de carbono del suelo en condiciones variables de humedad y temperatura. Estudios realizados en la zona húmeda (Guntiñas *et al.* 2000) o en el área mediterránea (Peñuelas *et al.* 2003, en prensa) muestran un efecto contrapuesto de la disminución de la humedad y del incremento de la temperatura sobre la respiración del suelo, que parece más acusado para la influencia de la temperatura. De todas formas, también se puso de manifiesto, sobre todo en el área mediterránea, que existe un umbral de humedad del suelo por debajo del cual la influencia de la temperatura es irrelevante, por lo que se podría concluir que, previsiblemente, el efecto del incremento de la temperatura como acelerador de la mineralización del suelo debería manifestarse en la zona húmeda española. mientras que en el mediterráneo podría producirse el efectro contrario. Sin embargo, un aumento de precipitaciones estivales en condiciones mediterráneas producirían importantes aumentos en la respiración del OC del suelo (Sanz *et al.* 2004).

En resumen, los posibles efectos directos del aumento del CO_2 atmosférico (incremento de la producción, disminución de la calidad de la hojarasca, efectos sobre la actividad microbiana) son dudosos a medio o largo plazo, y por ahora es razonable no tenerlos en cuenta en la predicción. Los efectos del aumento de temperatura son persistentes y más consistentes. Por lo tanto, a efectos prácticos es razonable centrar el análisis en la predicción de estos efectos a escala global: aumento de la temperatura, junto con una disminución de la precipitación.

Predicciones a partir de modelos informáticos

El modelo CENTURY es el más utilizado a este respecto, por ser el que mejor permite integrar los factores climáticos y el posible cambio de calidad del OC. Mencionamos algunos ejemplos que simulan condiciones climáticas similares a las de algunas zonas de España.

Paustian *et al.* (1996) aplican el modelo a la simulación de agroecosistemas en la zona continental semiárida de Estados Unidos, con un periodo de simulación de 50 años. Los resultados pueden tomarse como referencia para las zonas más continentales de España (la Meseta). La simulación tiene en cuenta efectos previstos por el cambio climático: aumento de la fotosíntesis, disminución de la transpiración por unidad de área foliar, aumento del C/N de los tejidos, aumento de la asignación de C hacia las raíces. La evolución del OC del suelo depende más de la gestión agrícola que del cambio climático en sí. Se prevé un aumento de la producción de residuos agrícolas, que se traducirán en un aumento del OC del suelo.

West *et al.* (1994) aplican CENTURY a ecosistemas semidesérticos de USA. Las predicciones podrían ser también válidas para las zonas más áridas de nuestro país (zonas de Andalucía, Murcia, Alicante). Prevén en todos los casos un descenso del C orgánico del suelo, un aumento de los carbonatos, y un aumento de la erosión. La pérdida de carbono calculada para los próximos 40 años está entre 1 y 2,5 %, para un aumento de la temperatura de 2°C, pérdida bastante menor que la prevista para otros ecosistemas, como se verá a continuación.

Bottner *et al.* (1995) aplican el modelo CENTURY para calcular pérdidas de carbono en condiciones mediterráneas contrastadas. Las pérdidas calculadas, para un aumento de la temperatura de 3°C (sin modificar la precipitación) durante los próximos 100 años, varían desde un 15 % para zonas muy áridas, con precipitación (P) < 100 mm (El Cairo, Egipto; Bechar, Argelia), hasta un 20 % para zonas más frescas como Montpellier (Francia), o un 28 % para zonas mediterráneas muy húmedas (Ain Draham, Túnez: P = 1534 mm). Lo cual nos daría

una pérdida entre 5 y 9,3 % de OC por cada grado de aumento de temperatura. Según los mismos autores, en condiciones mediterráneas parece evidente un mayor efecto de la falta de humedad que del aumento de temperatura.

Trabajos basados en el estudio de transectos climáticos

El método consiste en estudiar el contenido de carbono total en suelos de una zona geográfica y establecer relaciones genéricas entre precipitación y/o temperatura y contenido de carbono. Tales relaciones pueden extrapolarse para el cambio climático previsto, o una serie de escenarios. Generalmente se asume un aumento de la temperatura, pero se duda acerca del cambio en la precipitación.

Álvarez y Lavado (1998) aplican este criterio a suelos de la pampa Argentina. Obtienen una buena correlación (no lineal) entre el carbono total del suelo y el cociente precipitación / temperatura (r^2 = 0,693). A partir de la relación obtenida, extrapolan el resultado para un cambio climático previsto. El problema es que no está clara la evolución de la precipitación. Si la precipitación aumenta, el OC total del suelo podría aumentar; sin embargo, si la precipitación no aumenta, calculan que un aumento de la temperatura de 6°C (considerada la estimación más probable para aquella zona) se traducirá en una pérdida del 45 % del C del suelo, lo cual significa cerca del 7,5 % por cada grado de aumento.

El trabajo de Hontoria et al (1999) es la principal referencia a este respecto, para los suelos de España. A partir de una base de datos de perfiles publicados, correlacionan el contenido de carbono en el suelo con (1) uso del suelo, (2) precipitación total, (3) temperatura anual y, entre otros parámetros, (4) número de días consecutivos en que la sección de control del perfil se encuentra seca en su totalidad (parámetro utilizado por la taxonomía de la USDA para la clasificación de los suelos). Las correlaciones obtenidas no son muy altas (< 0,5), lo cual puede atribuirse a la heterogeneidad del territorio abarcado, tanto en lo que respecta al clima como al material parental, tipo de vegetación, etc. A partir de las relaciones obtenidas, los autores extrapolan el resultado a cuatro posibles escenarios de cambio climático (Tabla 8.3). De 12 situaciones posibles, sólo en tres casos se prevé un aumento del contenido de carbono que ocurriría en el caso de un aumento de la precipitación. Las mayores pèrdidas de OC se obtienen para una disminución de precipitación simultánea a un aumento de temperatura, que coincidirían con las predicciones más recientes. No se calcula la posible pérdida de carbono en los suelos agrícolas, pero debería ser porcentualmente mucho menor. Obsérvese que las pérdidas son mayores en suelos bajo pastizal, que suelen ser los más ricos en OC. Por otra parte, en los suelos agrícolas la mayor parte del carbono está asociado a fracciones finas (limo fino y arcillas), físicamente protegido, y en principio es bastante más estable e inerte que el carbono de los suelos de bosque o pastizal.

Tabla 8.3. *Pérdida calculada de carbono en los suelos peninsulares, en cuatro situaciones distintas de cambio climático. Según Hontoria et al. (1999).*

Parámetro climático		Tipo de vegetación		
Temperatura	Precipitación	Bosque	Matorral	Pastizal
Sin cambios	- 10 %	- 7.8 %	- 5.5 %	- 9.0 %
+ 10 %	Sin cambios	- 5.6 %	- 4.0 %	- 6.5 %
+ 10 %	+ 10 %	+ 0.8 %	+ 0.6 %	+ 0.9 %
+ 10 %	- 10 %	- 12.9 %	- 9.1 %	- 14.8 %

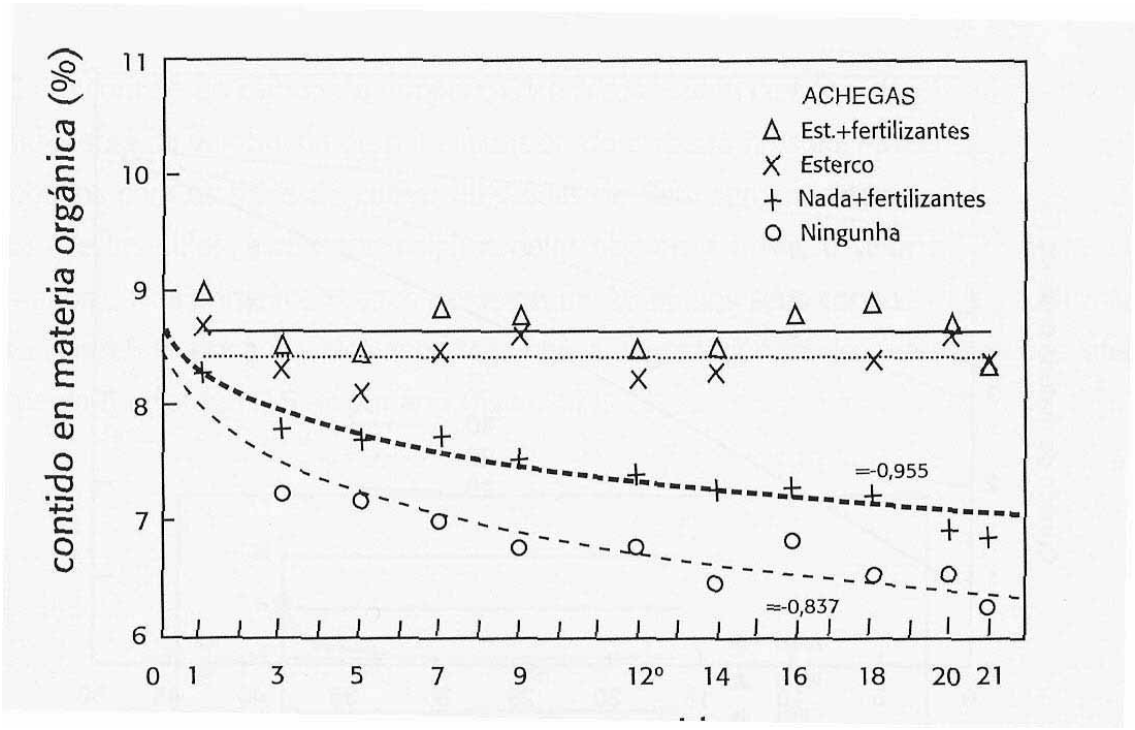
Si no se produce un aumento de la precipitación, el contenido de OC debería bajar, en el peor de los casos, casi un 15%. Las mayores pérdidas se darían si se produce, además de un aumento de la temperatura, un descenso de la precipitación. Tomando como ejemplo Barcelona (T media: 15,5°C), tendríamos que un aumento del 10% en la temperatura implicaría un aumento de aproximadamente 1,5 ºC. Luego la pérdida de carbono sería, en el peor de los casos 14,8 / 1,5 = 9,9 % por cada grado de aumento. En el caso de los matorrales sería, en el peor de los casos, 9,1 / 1,5 = 6,1 % por cada grado. Este resultado es similar al obtenido por Álvarez y Lavado (1998) para la Pampa Argentina y consistente con el cálculo de Bottner *et al.* (1995), antes mencionado.

La coherencia de estos tres resultados (Bottner *et al.* 1995; Álvarez y Lavado 1998; Hontoria *et al.* 1999) sugiere que puede aceptarse un valor medio de 6-7 % de pérdida de carbono por cada grado de aumento en la temperatura (es decir entre 3 y 8 Mg C ha^{-1} perdidos por cada grado de aumento en la temperatura), valor que puede aumentar o disminuir según sea el cambio en la precipitación y también según características propias del suelo y sus usos.

El cambio climático puede afectar de forma distinta los distintos compartimentos del OC (Coûteaux *et al.* 2000), por lo que la pérdida de carbono puede distribuirse desigualmente en el suelo. Contrariamente a lo que podría esperarse, en nuestros suelos el OC de la parte profunda del perfil a menudo es menos estable que el de la parte superficial. Si bien el porcentaje de carbono físicamente protegido es mayor, es también relativamente más rico en carbohidratos y menos en fracciones recalcitrantes (Rovira 2001). Dado que la parte profunda es más probable que pueda mantener humedad durante el estío, es posible que sea el OC de la parte profunda del perfil el que sufra una pérdida mayor. Ello no es seguro, sin embargo, ya que recientemente Bol *et al.* (2003) han verificado que es precisamente la mineralización de la fracción más recalcitrante y antigua del OC la que responde de modo más claro a un aumento de la temperatura.

8.3.4. Cambios de usos de suelos

Los cambios de usos y de manejo del suelo, así como de determinadas perturbaciones como pueden ser los incendios, afectan los contenidos en OC del suelo. De singular interés, por su duración es el estudio realizado en la Misión de Galicia del CSIC de Pontevedra (Sánchez y Dios 1995) sobre la evolución del OC del suelo de una parcela de maíz sometida a diferente sistemas de fertilización durante 21 años. Los resultados (Fig. 8.10) muestran cómo la parcela donde se suprime la fertilización orgánica experimenta un descenso progresivo en el contenido en OC, que al término del período de estudio se cifra en un 30%. Otro estudio, realizado igualmente en la zona húmeda española, a partir del análisis de tres cartografías de suelos realizadas en años diferentes (1958 1964 y 1997) muestra como los suelos dedicados a maíz, con escasa o nula fertilización orgánica, perdieron en 39 años un 43% de su contenido inicial en OC. Por otra parte, la comparación de los contenidos medios en OC de los suelos de zona húmeda dedicados a bosque o matorral frente a los de cultivo de patata o cereal muestran siempre un decrecimiento en el contenido en OC que se puede cifrar en un 30-40% (Calvo de Anta *et al.* 1992). En el área mediterránea, un suelo bajo pinar, después de la eliminación de la vegetación arbórea pasa en 9 años de un contenido en OC de 2,34 % a 1,61 %, siendo esta pérdida debida en su mayoría a la mineralización y en menos de un 1% a la erosión (Martínez Mena *et al.* 2002).



Años tras la aplicación de los tratamientos

Fig. 8.10. *Evolución del contenido en materia orgánica de un suelo dedicado a maíz en la Misión Biológica, CSIC (Pontevedra, Sánchez y Dios 1995) con diferentes tratamientos (0 ninguno, + fertilización mineral, x fertilización orgánica, Δ fertilización mineral + orgánica). % Materia orgánica/1,724 = % OC.*

La roturación de suelos forestales siempre comporta pérdida del OC edáfico (por ejemplo Fig. 8.11). En el ejemplo de dicha figura, se observa que la recuperación de los niveles iniciales, en suelos arenosos como es el caso, puede ser relativamente rápida (unos 80 años en el cultivo de cereales abandonado y reforestado) e incluso superarse cuando se introduce una especie de crecimiento rápido (*Pinus radiata* en este caso). Sin embargo, cuando los suelos han sufrido pérdidas erosivas (suelos de viña en ladera) la recuperación es más lenta.

Finalmente, perturbaciones accidentales como son los incendios forestales, que con alta probabilidad se deberían incrementar como consecuencia del cambio climático (Piñol *et al.* 1998), pueden llegar a producir pérdidas en el contenido en OC del suelo que pueden oscilar, según la intensidad del incendio, de valores inferiores al 5% cuando las temperaturas son menores de 170 ºC, a superiores al 90% cuando estas son superiores a los 450 ºC (Soto *et al.* 1991) en los cm más superficiales del suelo. Durante un incendio forestal se libera una gran cantidad de CO_2 a la atmósfera, sin embargo a medida que el ecosistema afectado vuelve a crecer y se recupera, el CO_2 es captado y fijado vía fotosíntesis incorporándose nuevamente al sistema, de esta forma puede considerarse que el balance neto de C a medio plazo es nulo (Levine 1996) si los procesos erosivos no son dominantes. Sin embargo, durante los incendios se producen modificaciones en la dinámica de los materiales orgánicos que conducen a la creación de formas más resistentes a la degradación y por ello a procesos de secuestro de C en la geosfera (González-Vila y Almendros 2003; González-Pérez *et al.* 2004). Este efecto puede ser de especial relevancia en regiones, como la cuenca mediterránea, donde los incendios forestales y de vegetación son un fenómeno recurrente; la producción de estas formas de OC refractario se ha estimado para Andalucía en hasta 31000 t/año (González *et al.* 2002). Como consecuencia de las altas temperaturas generadas por el incendio, en ocasiones se crea en las capas superficial o subsuperficial del suelo zonas de hidrofobia que dificultan la infiltración de agua con los consiguientes efectos negativos sobre la escorrentía superficial (que

se ve incrementada de forma sustancial hasta valores superiores al 20% de la precipitación, Soto y Díaz-Fierros 1998) y el contenido en agua del suelo. En suelos de textura fina, y especialmente cuando predomina la fracción limo, la pérdida temporal de cubierta vegetal producida por el fuego genera la formación de una costra superficial que disminuye la infiltración de agua en el suelo y aumenta la escorrentía (y el riesgo de inundaciones) (Bautista et al 1996).

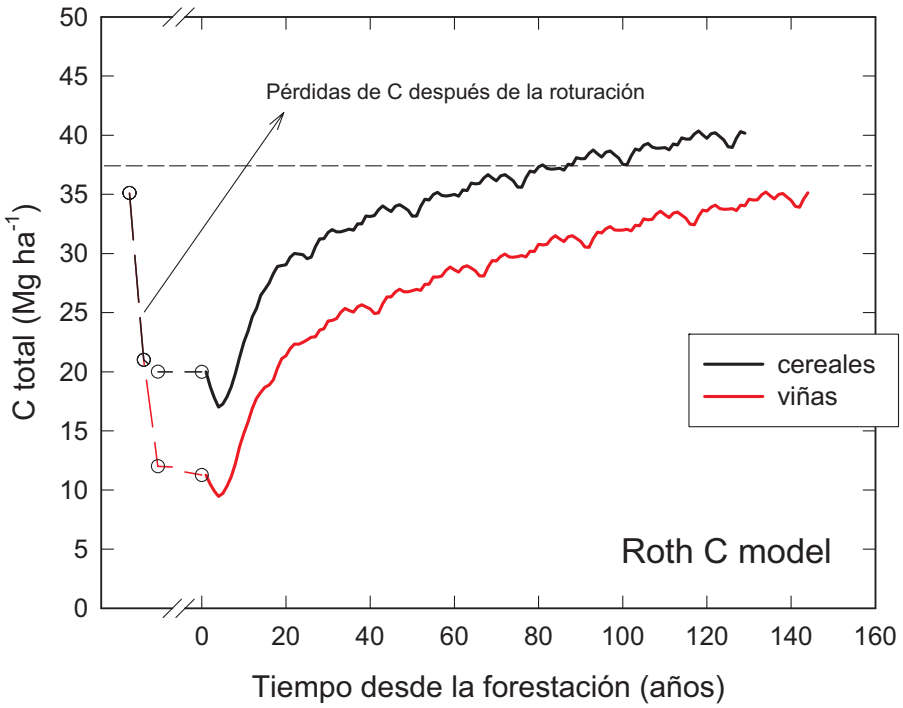


Fig. 8.11. *Cambios en el OC del suelo después de la roturación y de la forestación con Pinus radiata en condiciones mediterráneas según el modelo Roth C. La línea discontinua se refiere a los niveles de carbono del encinar autóctono (Romanyà et al 2000).*

En resumen, los incendios forestales tienen un mayor impacto en los primeros centímetros del suelo, con pérdidas netas de C importantes en este horizonte. Estas pérdidas pueden ser contrarestadas, en parte, por la formación de compuestos recalcitrantes de C durante la combustión. Si las condiciones edafoclimáticas son favorables, la recuperación de la vegetación puede restablecer el balance de C a corto-medio plazo. Finalmente, cambios físico químicos, como la presencia de zonas de hidrofobia, pueden aumentar la escorrentía superficial dificultando la recuperación de la vegetación.

8.3.5. Síntesis de los efectos del cambio climático en el OC del suelo

El OC del suelo resulta del balance de entradas, aporte de hojarasca (o enmiendas orgánicas en cultivos) y raíces muertas, y salidas, descomposición (más lixiviado de OC soluble). En ecosistemas forestales, los aportes de hojarasca podrían aumentar según las salidas de los modelos (capítulo 9), aunque comparando transectos climáticos de bosques actuales parece que la sequía reduce los aportes. Por otra parte, en estudios multitemporales de encinares de Cataluña, la producción de hojarasca se relaciona de forma lineal y significativa con la producción primaria neta de la parte aérea del bosque Ibáñez *et al.* 1999). En condiciones húmedas (Norte de España) parece esperable un aumento de los aportes, pero en la España seca este aspecto se mantiene bastante incierto. En relación con la tasa de descomposición,

todos los estudios coinciden en su aceleración con el aumento de temperatura, a menos que se vea acompañada de condiciones de sequía (Fig. 8.9), en cuyo caso la tasa de descomposición se reduciría. En condiciones mediterráneas, la respiración del suelo y la mineralización del OC están limitadas por la temperatura en invierno y por la sequía en verano (Casals *et al.* 2000, Rey *et al.* 2002). Según los últimos autores, se esperaría una disminución general de la respiración del suelo en los escenarios de cambio climático aceptados para las condiciones mediterráneas. Por lo tanto, los cambios proyectados supondrían un aumento de la tasa de descomposición en la España húmeda y su disminución en la España mediterránea.

Los modelos de ciclo del OC y los estudios de transectos climáticos (Tabla 8.3) sugieren una disminución del OC del suelo como consecuencia del aumento de la temperatura y de la sequía. Los datos procedentes de los transectos son bastante consistentes en la medida en que se basan en análisis directos del OC edáfico. Sin embargo, estos datos no son compatibles con un aumento de los aportes y una disminución de la tasa de descomposición supuestos en el párrafo anterior para la zona mediterránea. Cabría concluir, por lo tanto, como más probable una disminución generalizada de los contenidos en OC del suelo, que en las zonas mediterráneas vendría determinado por una reducción de los aportes de hojarasca, con la incertidumbre asociada a este último proceso.

8.3.6. Efectos del cambio climático sobre la comunidad microbiana y faunística del suelo

Los organismos del suelo están fuertemente influenciados por la cubierta vegetal en general, por lo que es en principio previsible que se produzcan alteraciones de la composición de las comunidades de organismos del suelo concomitantes con los cambios de uso del suelo y ambientales derivados del cambio climático.

Flora microbiana

De acuerdo con la revisión de Panikov (1999) la microflora está adaptada a sobrevivir a cambios importantes en la temperatura del suelo (cambios día-noche de decenas de grados, en verano; cambios estacionales también importantes) y en el contenido hídrico (gran estacionalidad en clima mediterráneo); tales cambios son de una magnitud superior a los aumentos de temperatura media y al aumento o disminución previstos para la precipitación. Por tanto, los efectos directos no deberían ser muy significativos. Los resultados obtenidos por Moscatelli *et al.* (2001), en suelos mediterráneos, están de acuerdo con esta predicción: la actividad microbiana expuesta a una atmósfera enriquecida en CO_2 vuelve al nivel de los suelos control en apenas dos años. Ello puede ser debido a la gran redundancia de la comunidad microbiana; hay muchos táxones distintos que parecen ocupar el mismo nicho ecológico, compitiendo por los mismos substratos. Algunos pueden resultar favorecidos por el cambio climático, mientras que otros pueden ser perjudicados; en cualquier caso siempre hay un táxon análogo a otro perjudicado, preparado para ocupar su función. Incluso asumiendo que la biodiversidad microbiana resultara perjudicada (lo cual está por demostrar), no está claro que ello afectara al funcionamiento del suelo en el ecosistema global. Este es el resultado que parece desprenderse de la mayoría de estudios en que la biodiversidad microbiana del suelo se ha reducido artificialmente, por fumigación o por irradiación.

Al aumentar la temperatura aumenta la respiración, pero el efecto depende del estado nutricional del suelo, siendo menos acusado en suelos oligotróficos. El aumento de la respiración es debido al aumento de la actividad de la microflora, porque en realidad el aumento de la temperatura se traduce en una disminución de la biomasa microbiana (Álvarez *et al.* 1995). En el caso de suelos no agrícolas empobrecidos en nutrientes, la actividad microbiana se vería menos afectada por el aumento de temperatura, por lo que son más bien los suelos ricos en OC (que suelen ser también ricos en N y P) los que corren un mayor peligro.

Fauna del suelo

En conjunto, el efecto del cambio climático sobre la fauna del suelo es mucho menos predecible que el efecto sobre la reserva de carbono orgánico. Se dispone de bastantes estudios realizados en microcosmos, pero la diversidad de resultados hace difícil extraer un patrón claro. Se suele aceptar que la elevación del CO_2 atmosférico, por sí misma, tendrá poco efecto sobre la fauna del suelo porque ésta ya está adaptada a la atmósfera edáfica que es muy rica en CO_2 (Van Veen *et al.* 1991). No obstante, Zaller y Arnone (1997) observaron un aumento de la actividad de las lombrices en suelos sometidos a una atmósfera enriquecida en CO_2. Caso de confirmarse, estos resultados serían relevantes por la gran importancia de las lombrices en el mantenimiento de la fertilidad natural de los suelos y en la dinámica del OC.

No hay mucha información disponible, pero los estudios en que artificialmente se ha elevado la temperatura del suelo en condiciones de campo han observado un aumento de la biomasa y diversidad de la mesofauna, a condición de que la disponibilidad hídrica no disminuya excesivamente: si ello ocurre, el efecto pasa a ser negativo (Harte *et al.* 1996).

La desaparición de especies incapaces de resistir sequías estivales prolongadas es un efecto esperable. No está claro qué efectos puede tener esta desaparición sobre el funcionamiento del suelo como sistema global. Podría no tener mucha, porque la red trófica del suelo es altamente redundante, con un número de especies muy superior al necesario para un funcionamiento eficiente de los ciclos biogeoquímicos (Freckman *et al.* 1997). En cualquier caso, la simplificación de la comunidad animal del suelo debería tener como consecuencia la aceleración de los ciclos biogeoquímicos, dado que una red trófica rica y compleja se traduce en una reducción de la intensidad de la descomposición del OC, debido a la predación que sufren los organismos descomponedores (bacterias, hongos, actinomicetes) por parte de la micro- (protozoos, nematodos) y mesofauna (microartrópodos) (Setälä y Huhta 1990, Scheu y Wolters 1991).

8.3.7. Fertilidad del suelo

Como resultado de la intensificación de la agricultura y de los cambios de uso del territorio que han tenido lugar desde mediados del siglo XX, en la actualidad la fertilidad de los suelos europeos se encuentra ante una dicotomía. Mientras que en los suelos agrícolas actuales ha disminuido su fertilidad intrínseca (ver por ejemplo la pérdida de OC generalizada en los suelos ingleses, Ministry of Agriculture Fisheries and Food, Reino Unido), en los suelos forestales, que han resultado del abandono agrícola, se ha observado una recuperación de su fertilidad y de sus propiedades físicas a partir de un incremento en OC concentrado en los horizontes superficiales (Romanyà *et al.* 2000), siempre y cuando las condiciones edafoclimáticas del sitio hayan permitido una recuperación suficiente de la vegetación. En clima semiárido son frecuentes situaciones en las que la calidad de los suelos abandonados no ha sido suficiente para sustentar el desarrollo de una comunidad vegetal mínima e iniciar un proceso de recuperación. En estos casos se entraría en una espiral de degradación del suelo que no permitiría la recuperación autogénica de la fertilidad del suelo. Por otra parte, en el caso de los suelos forestales antiguos, puede existir un aumento en la demanda de nutrientes en general como resultado del aumento de CO2 atmosférico que dependerá de las especies que se consideren (Peñuelas *et al.* 2001). Este aumento diferencial, según especies en la demanda de nutrientes puede por un lado determinar la composición futura de los ecosistemas y por otro disminuir la calidad de la hojarasca producida. En el caso del nitrógeno, los cambios en el depósito atmosférico asociados a la contaminación en algunos casos podrían contrarrestar el aumento de demanda por parte de la vegetación.

En esta sección discutimos aspectos de la contaminación atmosférica no directamente asociados al cambio climático pero que pueden tener una gran repercusión en sus imapctos sobre la fertilidad del suelo. Los depósitos atmosféricos han incrementado el aporte de nitrógeno a los ecosistemas terrestres del mundo en general. Este efecto es el resultado del incremento en óxidos de nitrógeno en la atmósfera resultado de las actividades industriales y de transporte y de la agricultura y ganaderías intensivas (Vitousek *et al.* 1997). En el mediterráneo, dichos aumentos han sido también destacables, aunque en los últimos 15 años, según datos de la zona del Montseny (Barcelona), se han mantenido relativamente constantes, entre 15 y 22 kg N ha-1 año-1, mientras que en el mismo periodo el azufre ha sufrido una disminución (Rodà *et al.* 2002). Otras medidas realizadas en zonas mediterráneas más apartadas de las grandes acumulaciones urbanas han dado valores de aportes atmosféricos de entre 3 y 10 kg N ha^{-1} $año^{-1}$ (Bellot J. y Escarré 1991, Moreno y Gallardo 2002, Sanz *et al.* 2002). Los valores anteriores más altos incluyen deposición seca y húmeda (Sanz *et al.* 2002). Los estudios realizados en las zonas atlánticas de España muestran valores mínimos más elevados que en el mediterráneo y unos valores máximos coincidiendo con la zona del Montseny (desde 11 hasta 22 kg N ha^{-1} $año^{-1}$; Amezaga *et al.* 1997; Fernández-Sanjurjo *et al.* 1997). Camarero y Catalán (1993) encontraron menor acidez y menor depósito de nutrientes en las lluvias del Pirineo en relación a los Alpes, si bien el depósito de nutrientes fue mayor en las zonas más lluviosas. En estudios más recientes se han encontrado, además de mayores aportes de N y de contaminantes orgánicos en las zonas más lluviosas de Pirineo, coincidiendo con las mayores altitudes (Carrera *et al.* 2002) y en las partes culminales tanto en suelos como en sedimentos se han encontrado indicios de destacables aportes de elementos potencialmente tóxicos (McGee y Vallejo 1996; Camarero *et al.* 1998).

Las bajas concentraciones de aportes atmosféricos que se han medido en Sierra de Gata (6 kg N ha-1 año-1) contribuyen positivamente a la nutrición de los melojares de la zona (Moreno y Gallardo 2002), si bien los aportes de otros nutrientes como el S y el Zn son mayores a la demanda del bosque. Debido a las elevadas producciones de los ecosistemas forestales y pratenses atlánticos, parece razonable pensar que los aportes moderados de N que se dan en algunas de estas zonas (20 kg ha-1 año-1) puedan ser absorbidos en parte por la vegetación. Incluso en el caso de ecosistemas poco productivos, como pueden ser los brezales de Calluna vulgaris del NO peninsular, se ha visto que tienen capacidad de reciclar en la vegetación cantidades de N superiores a las de la deposición atmosférica (Marcos *et al.* 2003). Los encinares mediterráneos son capaces de reciclar internamente las cantidades más elevadas de N en el depósito atmosférico medido en España (20 kg ha-1). Dado que el crecimiento de las encinas no seria suficiente para consumir todo este N, parece ser que una buena parte del N depositado puede retenerse, de momento, en el suelo (Rodà *et al.* 2002). El destino de este N a más largo plazo en estos encinares es todavía una incógnita. En matorrales mediterráneos se han medido mineralizaciones de N desde 20 a 40 kg ha-1 año-1, mientras que en prados secos la mineralización de N es sensiblemente superior (40-70 kg ha-1 año-1; Romanyà *et al.* 2001). Estos datos sugieren que en el caso de los matorrales mediterráneos los depositos atmosféricos pueden llegar a doblar el N disponible y por lo tanto pueden resultar en cambios importantes en la dinámica del nitrógeno. En los ecosistemas agrícolas, el aporte de N atmosférico, si bien es menor a la demanda de la mayoría de cultivos, podría contribuir a una sobre-fertilización.

Dado que el depósito atmosférico de fósforo suele ser muy bajo (Vallejo *et al.* 1998), los aportes atmosféricos de N pueden dar como resultado una mayor relevancia de la limitación de fósforo en los ecosistemas terrestres. Existen varias evidencias de una limitación general de fósforo en ecosistemas forestales mediterráneos, por lo menos en el ámbito de los suelos carbonatados (Vallejo *et al.* 1998). El análisis de la nutrición de los árboles del inventario ecológico y forestal de Cataluña, mediante el sistema DRIS, señaló una deficiencia generalizada de fósforo en los pinares de las comarcas dominadas por suelos carbonatados (Serrano, datos no publicados). Por otra parte, ensayos de fertilización con plántulas forestales en suelos sobre lutitas carbonatadas también han indicado respuesta positiva de la nutrición en

fósforo a la fertilización con lodos de depuradora (Valdecantos 2001). En suelos forestales atlánticos, la disponibilidad de P también parece ser clave para la nutrición de las plantaciones de Pinus radiata sobre todo en suelos con pHs muy ácidos (Romanyà y Vallejo 1995; Sánchez-Rodríguez *et al.* 2002; Romanyà y Vallejo 2004). El aumento de disponibilidad de nitrógeno asociada a la contaminación atmosférica puede resultar en un aumento de la demanda de fósforo y consecuentemente exacerbar su deficiencia. Además, tanto los niveles elevados de nitrógeno asimilable como la falta fósforo pueden dificultar la fijación atmosférica de N_2 (Binkley y Giardina 1997) y por lo tanto favorecer el desarrollo de las plantas no fijadoras de N.

En cuanto al posible impacto de los contaminantes, haciendo uso del modelo Pantanal (MicroLEIS DSS; De la Rosa *et al.* 2004) y suponiendo una perturbación climática previsible para el año 2050, el riesgo de contaminación difusa en el caso de Andalucía, por el uso de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, metales pesados y pesticidas, aumenta en un 60 % de los suelos, mientras que disminuye en otro 40 %. Los primeros suelos se localizan en el litoral de Cádiz y tierras altas de Jaén. A su vez, los suelos en donde disminuye el riesgo de contaminación se localizan preferentemente en la campiña baja de Córdoba, litoral de Huelva y Málaga, y en las mejores zonas agrícolas de la provincia de Sevilla. Considerando separadamente cada tipo de contaminante, los riesgos por metales pesados y pesticidas aumentan proporcionalmente más que los riesgos por el uso de fertilizantes (De la Rosa *et al.* 1996).

8.3.8. Impactos sobre la degradación física del suelo y la erosión

Las propiedades físicas del suelo se pueden ver alteradas especialmente por las prácticas de manejo y por los incendios, y en general por la pérdida de OC que es un factor esencial de la estructura edáfica. La degradación de las propiedades físicas del suelo comporta el encostramiento y sellado superficial, compactación, posible incremento de la hidrofobia de la superficie del suelo, pérdida de estabilidad estructural, disminución de la capacidad de infiltración (lo que acentúa las condiciones de sequía) y aumento del estrés por agrietamiento en vertisoles.

Bajo el cambio climático es previsible una disminución de la precipitación media, así como un aumento de la frecuencia de los eventos extremos. Ello puede provocar un incremento peligroso de la erosión del suelo en amplias zonas del país y ser crítico en áreas donde la acumulación de procesos históricos de erosión ha derivado en suelos muy poco profundos.

Considerando el escenario climático EC para el año 2050, el riesgo de erosión de los suelos agrícolas de la UE es previsible que aumente en un 80 % (UNEP-EEA 2000). Este incremento se producirá preferentemente en las zonas que ya presentan un riesgo severo. Según las mismas fuentes, se estima un aumento del 20% de la superficie agrícola española amenazada por riesgo muy alto de erosión, mientras que las superficies con riesgo alto y moderado disminuirían en un 8 y un 19 % respectivamente.

La influencia de la precipitación sobre la erosividad de los suelos se puede aproximar a partir del factor R del modelo USLE, o bien a partir de relaciones más sencillas que permiten su cálculo a partir de valores mensuales o anuales de precipitación (Renard *et al.* 1994). Nearing, *et al.* (2004), aplicando el modelo WEEP determina para suelos característicos de EEUU que por cada incremento del 1% en la precipitación anual existe un incremento del 2% en la escorrentía superficial y de 1,7% en la erosión. Esta menor sensibilidad al cambio de la erosión frente a la escorrentía se debe al incremento de la protección del suelo que se genera por incremento de la biomasa epigea, debido al aumento de la precipitación. Se considera que la intensidad de las precipitaciones experimentará también un incremento de acuerdo con la intensificación del ciclo hidrológico que se supone provocará el calentamiento de la tierra.

Por otra parte, como consecuencia del incremento de las temperaturas y de la sequía estival previsto para las áreas mediterráneas, se acepta que existirá también una mayor incidencia de los incendios forestales, por lo que los cambios que estos provocarían sobre la erosionabilidad y protección vegetal del suelo se sumarían a los generados por el incremento en la erosividad de la lluvia. Al mismo tiempo, la disminución en el contenido en OC de los suelos actuaría también en el mismo sentido de incrementar la erosionabilidad del suelo (factor K de la USLE).

En el caso de Andalucía, haciendo uso del modelo Raizal (MicroLEIS DSS; De la Rosa *et al.* 2004) y suponiendo una perturbación climática previsible para el año 2050, el riesgo de erosión hídrica aumenta en un 47 % de los suelos, aunque disminuye en otro 18 % de los suelos. Los primeros suelos se localizan en el noroeste de Almería, las sierras norte de Córdoba, el noroeste de la provincia de Granada y el sur de Jaén. A su vez, los suelos en donde disminuye el riesgo de erosión se localizan preferentemente en la sierra sur de Córdoba, la parte central de la provincia de Granada y el norte de Jaén, así como en las mejores zonas agrícolas de la provincia de Sevilla (De la Rosa *et al.* 1996). No obstante, el cambio climático puede inducir cambios en los usos de los suelos a través, por ejemplo, de nuevos cultivos y prácticas agronómicas, o de un aumento en el abandono de cultivos, cambios que repercutirían en el impacto erosivo descrito más arriba.

Tabla 8.4. *Resumen de los resultados de la evaluación del riesgo de erosión en Andalucía, para la situación climática actual (1961-1990) y para la perturbación climática prevista en el año 2050 (aumento de la temperatura y disminución de la precipitación). Fuente: De la Rosa et al. (1996).*

Clase de vulnerabilidad	Escenario actual		Escenario de cambio	
	km^2	%	km^2	%
V1. Ninguna	4253	5	4253	5
V2. Muy baja	3906	4	6219	7
V3. Baja	14643	17	13285	15
V4. Moderadamente baja	13918	16	12963	15
V5. Ligeramente baja	5177	6	5247	6
V6. Ligeramente alta	21219	24	20952	24
V7. Moderadamente alta	10573	12	5826	7
V8. Alta	7887	9	12569	14
V9. Muy alta	4925	6	3560	4
V10. Extrema	773	1	2400	3

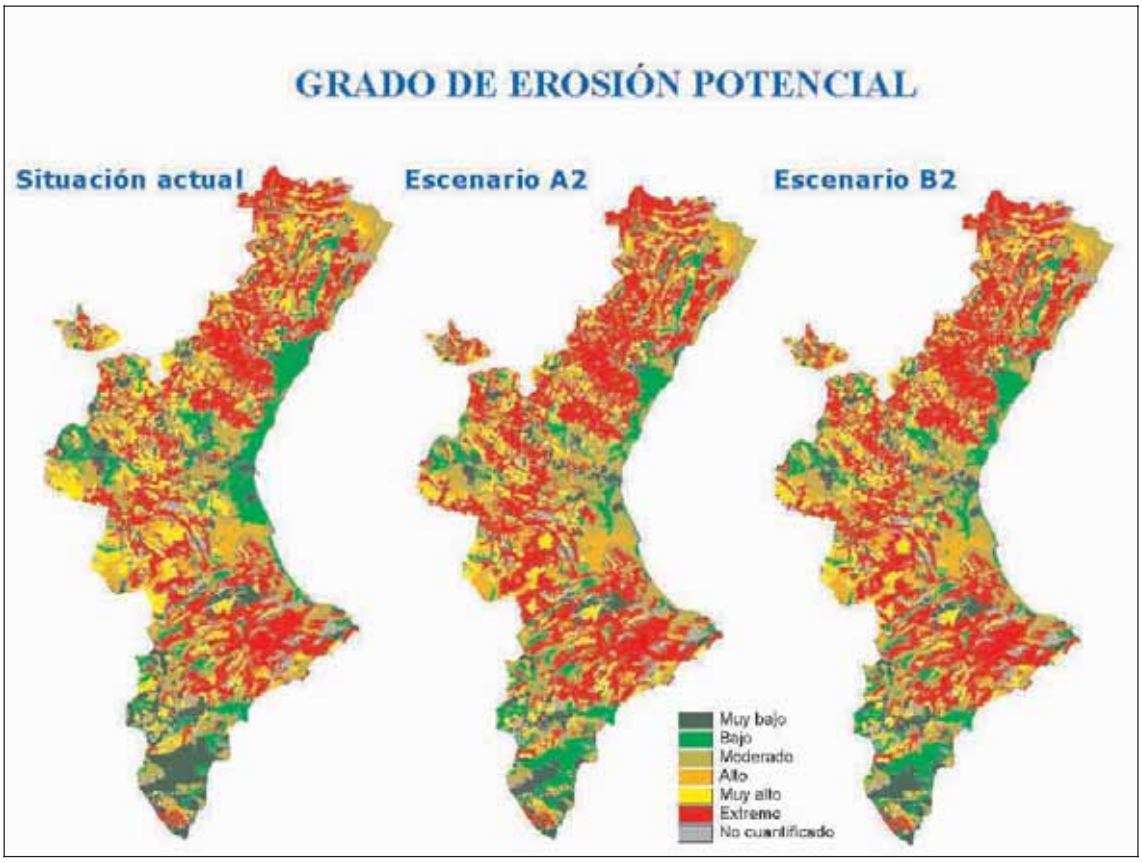


Fig. 8.12. *Estimación del grado de erosión según las predicciones de cambio climático para la Comunidad Valenciana. Se ha modificado el factor R (erosividad de la lluvia en el modelo USLE) de acuerdo con las previsiones de cambio del régimen de precipitaciones.*

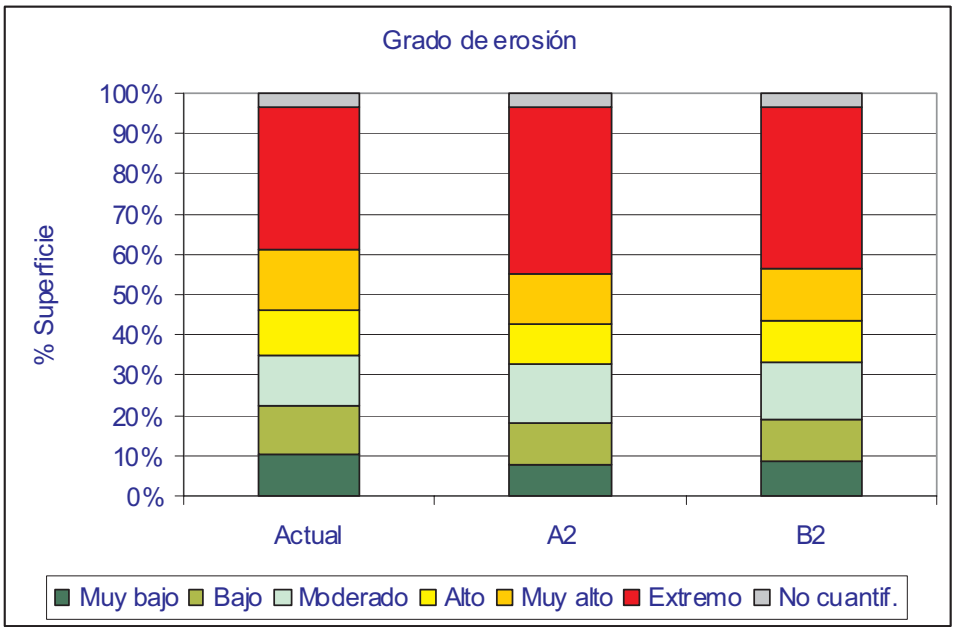


Fig. 8.13. *Porcentaje de superficie afectada en la Comunidad Valenciana por diferentes grados de erosión del suelo (datos de la Fig. 8.12) para los escenarios socioeconómicos A2 y B2. La superficie afectada por el grado "extremo" aumentaría entre un 5 y un 6%, mientras que el conjunto de los grados "alto + muy alto + extremo" sólo lo haría en un 2 %.*

La aplicación de los supuestos de cambio climático del capítulo 1 de este informe a la estimación del riesgo de erosión con la USLE en la Comunidad Valenciana (Fig. 8.12 y 8.13) sólo produce incrementos moderados del riesgo de erosión extremo, entre un 5 y un 6 %.

Una consideración a parte merecerían los cambios de uso y de tipos de vegetación que podrían ser provocados por el cambio climático. Los cambios de uso, sobre todo cuando evolucionan del bosque o matorral hacia los cultivos intensivos, tienen una clara incidencia negativa sobre los riesgos erosivos del suelo, así como las tendencias previstas hacia una mayor presencia del carácter mediterráneo en los tipos de bosque y matorral que incidirían claramente sobre el riesgo de incendio, que, lógicamente, se vería incrementado.

Finalmente, y en relación con el conjunto de los procesos de degradación física del suelo (p.e. compactación) habría que señalar que el mantener en el mismo unos niveles de OC superiores al 2,3 % es la mejor protección frente a este tipo de degradación. Si se tiene en cuenta que este umbral en OC del suelo es aproximadamente equivalente a un contenido en carbono de 8 $kg.m^{-2}$ y que una buena parte de los suelos españoles se encuentran por debajo de este valor (Figura 8.7) se podrá concluir que el riesgo de degradación física del suelo se debería ver incrementado en la medida en que se produzca un retroceso, como consecuencia del cambio climático, en el mantenimiento de esos valores de protección.

8.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Las zonas más vulnerables son las que se ven más afectadas por los procesos de desertificación (Fig. 8.3, 8.4 y 8.5, incluyendo las expectativas de aumento de los incendios forestales, capítulo 12), que se prevé se acentuarán en los supuestos de una mayor aridización del clima.

En cuanto al cambio en contenido en OC, las zonas donde cabe esperar pérdidas mayores serían las más húmedas (Norte de España) y para los usos de suelos que comportan contenidos en OC más elevados (prados y bosques). En el otro extremo, donde el contenido de OC es menor, pequeñas pérdidas de C pueden significar la superación de un umbral crítico para el mantenimiento de la funcionalidad del suelo.

8.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

En relación con las posibilidades de aumentar la fijación de carbono, las medidas consideradas por el IPCC incluyen: gestión de los cultivos para producir mayores entradas de C al suelo, gestión del riego, agricultura de conservación, prácticas de control de la erosión, gestión de los arrozales, gestión del pastoreo, mejora de la productividad de pastos, gestión del fuego en pastos, regeneración de bosques, fertilización de bosques, gestión del fuego en bosques, gestión de plagas, regulación de la explotación forestal, restauración de antiguos humedales y restauración de suelos muy degradados.

8.5.1. Influencia de las prácticas agrícolas

Los sistemas sostenibles de uso y manejo del suelo ofrecen un extraordinario potencial para el secuestro del carbono en las tierras agrícolas a través de la reducción de las pérdidas de carbono orgánico del suelo e incremento de la producción de biomasa (Lal and Kimble 1998). Se estima que los suelos cultivados contienen por término medio entre un 20 y un 40% menos OC que los suelos no cultivados (Davidson y Ackerman 1993). La pérdida de OC en los suelos cultivados puede recuperarse mediante la aplicación de prácticas adecuadas de uso y manejo de los suelos agrícolas (Lal *et al.* 1998). Según estimaciones de la FAO (2002) para el año 2030, la cantidad de carbono fijado en los suelos de cultivo, como materia orgánica procedente

de residuos de cultivo y estiércol, puede aumentar un 50% si se introducen los correspondientes procedimientos de uso y manejo. El C perdido desde el inicio de la actividad agraria por la humanidad se estima entre 40 y 90 Pg C (Raupach *et al*. 2003). Las tasas anuales de recuperación de C mediante cambios en la gestión agrícola pueden ser del orden de 0,3 a 0,9 $PgC \cdot año^{-1}$ (Lal 2004, Smith 2004). Esto implica que en un periodo del orden de 50 a 100 años se habría recuperado el C perdido, en el mejor de los casos.

En cuanto al tipo de uso del suelo, se debe lograr la mayor correlación entre las potencialidades y limitaciones de los diferentes suelos y los requerimientos edáficos de los posibles cultivos. Para ello la zonificación agro-ecológica constituye un estudio previo e imprescindible en cualquier area o región. La diversificación de cultivos estará condicionada por dichos estudios de variabilidad espacial de suelos y clima. A su vez, la segregación detallada de áreas vulnerables o marginales para la agricultura será consecuencia de la zonificación agro-ecológica.

El manejo agrícola tiene una influencia significativa en la cantidad de carbono almacenado por los suelos a lo largo del tiempo. Algunos cambios en las prácticas agrícolas pueden determinar cuánto y a qué velocidad el carbono es almacenado o liberado por los suelos (Ringius 1999). La sostenibilidad ambiental de las prácticas agrícolas, adaptadas a las condiciones agro-ecológicas de cada lugar, se referiría especialmente a los siguientes aspectos: restauración del nivel de materia orgánica de los suelos, intensidad y dirección del laboreo, consideración del tempero para cada operación, tipo y peso de la maquinaria a utilizar que evite la compactación, y racionalización del uso de fertilizantes y pesticidas.

Una agricultura a la medida de cada suelo, haciendo especial hincapié en maximizar la producción de residuos de cosecha que se incorporen al suelo y en reducir y diversificar el laboreo, facilitará el secuestro de C del suelo así como todos los beneficios asociados en las propiedades físicas, químicas y biológicas. Por otra parte, el máximo aprovechamiento de los residuos agrícolas es una medida muy eficaz de control de la erosión. La agricultura de conservación (laboreo reducido con reciclado de los restos de cosecha en forma de empajado) es muy eficaz de control de la erosión y supone también un ahorro considerable en la utilización de combustible. Estas prácticas se están extendiendo lenta pero continuamente en España.

En la recuperación de las tierras degradadas, el nivel de secuestro de carbono puede servir como indicador de dicha recuperación: así si la degradación disminuye el secuestro aumenta, y viceversa. En las zonas semiáridas, se estima para los próximos 50 años que si se implementan medidas efectivas de conservación y rehabilitación de suelos, ello conduciría a un secuestro anual de carbono entre 1,0 y 1,3 Gt por año (Squires 1998). La Fig. 8.14 muestra la distribución de suelos cultivados con epipedión ócrico, los cuales mejorarían sus propiedades con la adición de enmiendas orgánicas. El epipedión ócrico se define por propiedades que se relacionan, en principio, con el contenido en OC (Soil Taxonomy), como el color más o menos obscuro y la estructura. No obstante, en el norte de España se encuentran suelos cultivados con epipedión ócrico que tienen altos contenidos en OC con lo que no necesariamente mejorarían sus propiedades con la adición de enmiendas orgánicas.

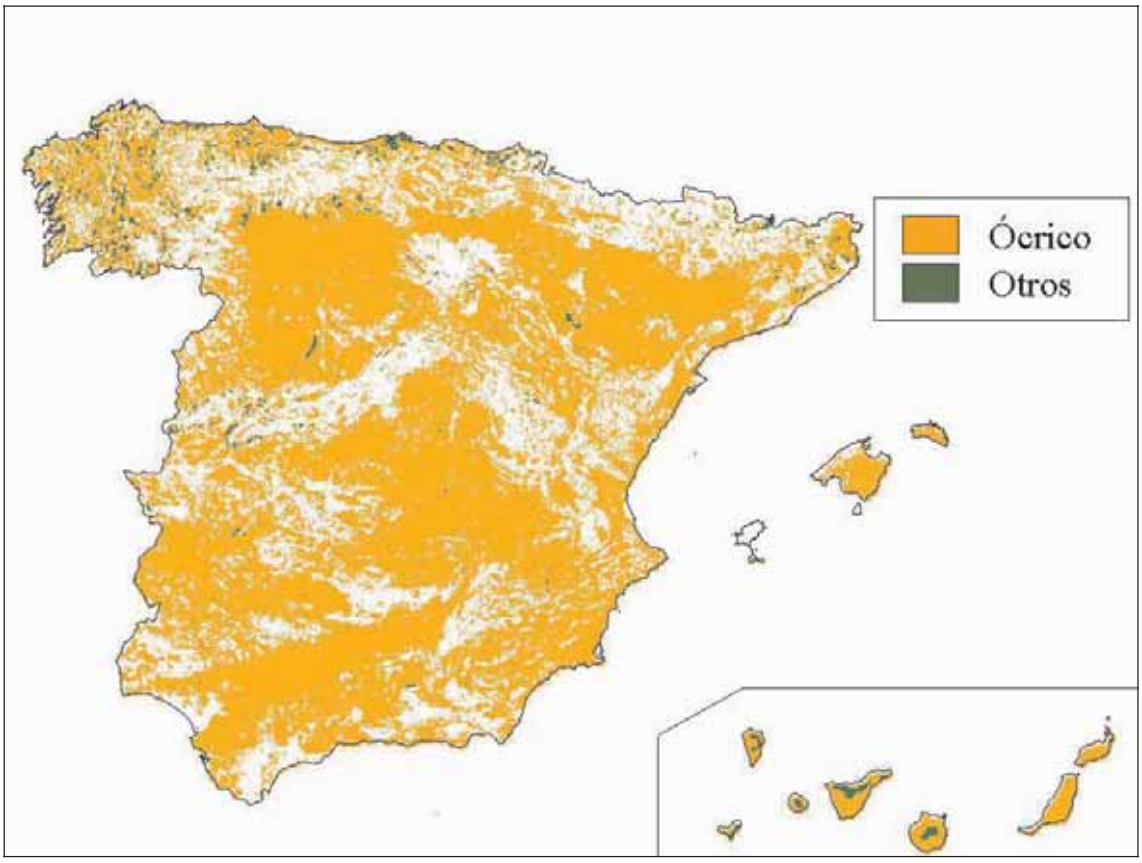


Fig. 8.14. *Superficie agrícola en suelos con epipedión ócrico que podrían mejorar su calidad con la adición de enmiendas orgánicas (96 % de la superficie dedicada a la agricultura en España). Mapa realizado a partir de la cartografía de usos de suelos CORINE de 1991 y del mapa de suelos del IGN de 1992.*

8.5.2. Abandono de cultivos

En la actualidad, tanto la estructura como la dinámica de los montes mediterráneos contienen la impronta de los efectos heredados de los antiguos usos del territorio. La gran extensión de territorios ocupados por vegetación colonizadora, básicamente en zonas agrícolas abandonadas, determina que muchos de nuestros suelos forestales puedan encontrarse en fases agradativas, mientras que en áreas con limitaciones severas de la productividad forestal (por ejemplo áreas de alta recurrencia de incendios o en climas semiáridos) pueden prevalecer los procesos degradativos.

El abandono de cultivos en tierras de productividad marginal ofrece la posibilidad de aumentar el secuestro de C mediante su transformación a bosques o matorrales. No obstante, en clima semiárido el abandono puede degenerar en mayor degradación si no se gestiona la restauración de los ecosistemas. En condiciones de clima mediterráneo seco subhúmedo, el aumento de vegetación, y de combustible, favorece la propagación de los incendios forestales. Por lo tanto, el abandono de cultivos ofrece posibilidades de gestión para contrarrestar los impactos del cambio climático pero también para evitar la degradación de las tierras abandonadas.

8.5.3. Forestación/reforestación

Los planes de forestación de los países mediterráneos tienen entre sus objetivos principales la protección del suelo. De hecho, en España, ya desde finales del siglo XIX se documentan trabajos importantes de restauración forestal con fines protectores de cuencas que sufrían frecuentes inundaciones (Gómez 1992).

En estadios tempranos de la sucesión, el suelo es el factor crítico que controla el desarrollo de los ecosistemas (Bradshaw 1997). En situaciones en las que el recubrimiento del suelo es muy bajo (menos del 30%), se puede entrar en una espiral de degradación. En estas condiciones conviene actuar ya sea a partir de la mejora directa del suelo (aplicaciones de enmiendas orgánicas, acolchados) y/o a partir de la introducción de especies (tanto leñosas como herbáceas) resistentes a tal situación (siembras, plantaciones, introducción de plantas micorrizadas) que a partir de sinergias puedan revertir la degradación del suelo (Vallejo *et al.* 2003). La revegetación es el medio más eficaz para el control de la degradación del suelo en tierras yermas. La baja disponibilidad de agua característica del clima mediterráneo puede verse exacerbada en un contexto de suelos degradados en los que se favorece la formación de la costra superficial (Maestre *et al.* 2002) y la desestructuración (Caravaca *et al.* 2002) del suelo que dificultan la infiltración y la capacidad de retención de agua del suelo. En los suelos agrícolas la formación de la costra superficial puede reducir la productividad de los cultivos (Amezketa *et al.* 2003). Por este motivo, tanto la gestión agrícola de los suelos mediterráneos como los trabajos de restauración y recuperación de suelos degradados concentran una buena parte de sus esfuerzos en la mejora de las propiedades físicas del suelo (Caravaca *et al.* 2002, Bellot *et al.* 2001, Querejeta *et al.* 2000). No obstante, prácticas inadecuadas de restauración forestal pueden dar lugar a la degradación del suelo.

Se sabe que la introducción de determinadas especies puede favorecer las condiciones del suelo. En ocasiones, dichas especies pueden incluso facilitar la implantación de otras especies en su área de influencia (facilitación) (Pugnaire *et al.* 1996, Maestre *et al.* 2001, Castro *et al.* 2002, Caravaca *et al.* 2003a). El uso de enmiendas orgánicas conjuntamente con la introducción de plantas han facilitado la recuperación de la vegetación y, en definitiva, han contribuido a la mejora de los suelos. En algunos casos se ha visto que la introducción de determinados organismos (inoculación de micorrizas) puede mejorar ligeramente el resultado de las aplicaciones de las enmiendas orgánicas por si solas tanto en relación al crecimiento de las plantas como en relación a la calidad del suelo (García *et al.* 2000, Caravaca *et al.* 2002, Caravaca *et al.* 2003b). Macías *et al.* (2001) han demostrado la eficacia de la revegetación con especies de crecimiento rápido (eucaliptos) en el secuestro de C en escombreras.

8.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

En la medida en que el suelo es el soporte básico de la producción primaria, la degradación de los mismos tendrá un considerable impacto en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, incluyendo los sectores productivos agrícola, ganadero y forestal. Por otra parte, cuando la degradación es severa se hace prácticamente irreversible, requiriéndose enormes inversiones de energía para recuperar la productividad de los suelos. Además del impacto directo en los ecosistemas terrestres, la degradación del suelo en forma de erosión, salinización o contaminación puede ejercer impactos negativos en otros sistemas, como aguas continentales (colmatación de embalses por ejemplo) y obras públicas.

8.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

La mayoría de análisis realizados a lo largo del capítulo presentan incertidumbres en grado variable. La tabla 8.5 sintetiza el grado de fiabilidad de los impactos.

Tabla 8.5. *Síntesis de los impactos directos previsibles del cambio climático en el suelo y su grado de fiabilidad. (mf): muy fiable, (fi): fiabilidad intermedia, (i): incierto. + : el impacto supone un aumento; -: el impacto supone una disminución; 0: no se espera un efecto significativo.*

Variables asociadas al cambio climático	Contenido en materia orgánica	Erosión del suelo	Salinización	Biomasa microflora y fauna	fertilidad
Aumento del CO_2	+ (i)	-(i)	0 (mf)	0 (fi)	- (i)
Aumento de la temperatura	- (mf)	+ (i)	+(mf)	- (i)	+ (i)
Aumento de la sequía	- (mf)	+ (mf)	+(mf)	- (fi)	- (i)

Aparte de las incertidumbres asociadas a las proyecciones climáticas y socioeconómicas, en relación directa con el suelo detacaríamos:

- Los impactos del cambio climático en el suelo interaccionan de forma muy significativa con el uso y manejo del suelo. Dichas interacciones y la evolución de los factores socioeconómicos que regularán los tipos de uso y las prácticas de manejo constituyen importantes incertidumbres.
- Muchos de los estudios de base utilizados para estimar el impacto del cambio climático sobre la capacidad de producción y los riesgos de degradación de los suelos se han realizado en otros países de condiciones semejantes. Queda, por lo tanto, la incertidumbre del grado de aplicabilidad de dichas observaciones a las condiciones de los suelos españoles.

8.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

En España no existen muchos estudios que aporten datos propios sobre los procesos edáficos asociados a cambios del clima, aunque existe una posibilidad potencial de analizar e interpretar determinados archivos históricos de suelos que pueden aportar una valiosa información sobre las tendencias de cambio en los contenidos en OC del suelo, por lo menos desde los años 1940-50 en que fueron realizados estudios cartográficos de suelos a escala 1:50.000, donde figuran localizados los puntos de muestreo y tabulados sus contenidos en OC. Posteriormente, en torno a los años 60-70 se iniciaron otras cartografías de suelos (p.e. los mapas de clases agrológicas del MAPA) donde igualmente figuran muestreos y tablas de datos de suelos españoles. Finalmente, en los años 90 el Proyecto LUCDEME realiza otra cartografía sistemática de los suelos españoles del área mediterránea y semiárida. Si a esto se añade los innumerables estudios locales o de comarcas, realizados en estos últimos cincuenta años, nos encontraríamos con un elevado conjunto de datos, que debidamente analizados y depurados, podrían aportar una buena información sobre las tendencias de cambio en el contenido en OC de los suelos bajo diferentes condiciones climáticas y de tipos de uso y manejo.

La red de estaciones experimentales permanentes (RESEL, Rojo y Sänchez 1996) mantenida por el Ministerio de Medio Ambiente supone una iniciativa muy útil en esta línea.

Sugerencias para mejorar el seguimiento

Existen abundantes bases de datos locales sobre caracterización de suelos, especialmente referidos a resultados de análisis agrícolas. La dificultad estriba en su dispersión, dificultad de acceso y que los formatos de los datos serán heterogeneos y poco manejables informáticamente. La homogeneización de esta información sería de gran valor para mejorar nuestro concimiento de los suelos españoles. Para ello, se recomienda la utilización de bases de datos universales, tales como la base de datos de FAO-CSIC (2003), SDBmPlus: Multilingual Soil Profile Database, en la recogidade la información sobre perfiles de suelo (datos y metadatos).

No existen estudios sobre monitorización de suelos de suficiente antigüedad y continuidad como para poder establecer tendencias de evolución o degradación del suelo. Sin embargo, ya hay una experiencia contrastada sobre la aplicación y validez de diferentes modelos que permiten realizar predicciones de erosión a partir de parámetros climáticos, edáficos y de uso del suelo, como es el caso de modelos tipo USLE, RUSLE, EUROSEM, LISEM, KYNEROS, WEPP, etc. Por ello, conociendo la evolución esperada con el cambio climático para dichos parámetros, sería posible llegar a realizar predicciones de la erosión con una seguridad razonable. Debe, por tanto, prestarse más atención y apoyo a los escasos experimentos de larga duración existentes en España, así como al mantenimiento de las colecciones de muestras de suelo.

En relación con el seguimiento del contenido en OC del suelo, las complejas interacciones entre los efectos del cambio climático y de los cambios en los usos de los suelos, con el añadido de la heterogeneidad espacial intrínseca del OC del suelo, hacen muy difícil la detección del cambio, especialmente en relación al clima. Por lo tanto, los seguimientos en parcelas permanentes deberían ser a largo plazo e incluir gradientes climáticos y de usos de suelos. El seguimiento del impacto del cambio climático requeriría intervalos de muestreo de al menos 10 años, aunque el seguimiento de los efectos de los cambios de usos de suelos requeriría intervalos de muestro mucho más cortos. El seguimiento debería considerar, además del OC del suelo, otras propiedades que se ven influidas por la materia orgánica, con el objeto de obtener una visión integrada de los impactos en otras funciones relevantes del suelo.

Para afrontar los retos que supone el cambio climático relacionados con el suelo es necesario disponer de una serie de información y herramientas que permitan por una parte detectar los cambios producidos y, por otra, realizar proyecciones (escenarios) como herramienta de soporte a la gestión y prevención de su impacto. Recogiendo y completando las propuestas de la Estrategia Europea de Protección de Suelos, se sugieren las siguientes medidas:

- Información de base. La disponibilidad de estos datos es clave para la aplicación de modelos, los cuales permiten extrapolar y realizar proyecciones futuras
  - Mapa de suelos a una escala apropiada, por ejemplo 1:50.000.
  - Base de datos de suelos (perfiles) asociado a la cartografía. Recopilación de la información existente dispersa en instituciones a distintas escalas (estatal, regional, comarcal).
  - Series temporales históricas. La recopilación de bases de datos puede ayudar a identificar series históricas de gran utilidad para entender los elementos que controlan los distintos procesos.
- Mejora del seguimiento
  - Asegurar la continuidad de estaciones experimentales existentes, particularmente las que cubren un mayor período de tiempo.

- Identificar zonas o combinaciones de factores que no están recogidos en las estaciones experimentales existentes.
- Cabe considerar una red más ambiciosa de seguimiento del OC. En todo caso la escala temporal para detectar cambios es un elemento a tener en cuenta.
- En áreas susceptibles a la salinización y sodificación, se recomienda el seguimiento de los siguientes parámetros:
  - Conductividad eléctrica como indicador de salinización.
  - Tasa de absorción de sodio (SAR) como indicador de sodificación.

- Seguimiento de la erosión. Dada la dificultad y coste económico que representa el seguimiento de la erosion del suelo, se propone una aproximación basada en indicadores y modelos.
  - La superficie con riesgo de erosión se propone como un indicador del estado de la erosión del suelo.
  - La calibración y validación de modelos requiere de las medidas de las tasas de erosión reales en campo**.** Se recomienda utilizar primero las estaciones experimentales existentes y sólo aumentar el número de estaciones donde no hay datos suficientes.
  - Selección de estaciones experimentales (parcelas y cuencas): las zonas seleccionadas deben tener un riesgo moderado a alto de erosión y ser representativos de una zona agro-ecológica.
  - Interpolación de resultados desde las medidas locales a zonas más amplias: para evaluar el estado de la erosión del suelo en áreas donde no hay datos mientras se analiza con detalles qué factores locales afectan a la erosión del suelo.
  - Otra información complementaria relevante:
  - Cartografía de las evidencias de erosión observables.
  - Medidas continuas del transporte de sedimentos en los aforos de microcuencas.
  - Medidas de deposición de sedimentos en embalses, balsas y lagos. Dado que la erosión del suelo es muy variable en el tiempo y el espacio, las medidas de erosión deben ser contínuas. A partir de las medidas a largo plazo, se pueden obtener valores medio, por ejemplo en periodos de 10 años.

8.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

Puesto que el suelo es la base física de la mayor parte de las actividades humanas, es inevitable la confluencia de intereses o de funciones que se le asignan. La gestión de esta complejidad no es sencilla, sin embargo el reconocimiento de la necesidad de integrar los aspectos ambientales en las políticas, con el fin de aproximarse a un desarrollo sostenible, está impulsando la aparición de nuevos mecanismos para optimizar la gestión de los recursos. Ello queda reflejado, a nivel eruopeo, con la elaboración de la *Estrategia Europea de Conservación de Suelos* que debe poner las bases para el desarrollo de normativas europeas sobre conservación y uso sostenible de suelos.

Tal como se recoge en los documentos preparatorios de la *Estrategia*, la planificación del territorio es un elemento clave. De acuerdo con los datos presentados en el presente informe se considera que la calidad del suelo debería tomarse en consderación en los planes urbanisticos y en cualquier reclasificación de usos. En el momento presente, una parte importante de los suelos de mejor calidad (productividad) están desapareciendo por sellado (construcción) en áreas periurbanas de las grandes conurbaciones.

La Política Agraria Común (PAC), con sus medidas agro-ambientales, promueve prácticas de manejo sostenible de los suelos cultivados. También ha promovido en el pasado reciente el abandono de cultivos marginales y su forestación (Reg. 2080/92 y 1257/1999), con un objetivo

ambiental (complementario al objetivo primario de mantener las rentas en el sector agrario). La reforma de la PAC ofrece posibilidades de mejorar la conservación de suelos y aumentar la fijación de carbono.

El Plan Forestal Español y los correspondientes a las autonomías están incorporando la fijación de carbono entre sus objetivos.

8.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

En España no se ha llevado a cabo una labor generalizada y continuada de reconocimiento de los suelos. Esta falta de información básica sobre la variabilidad geográfica de los suelos se pone particularmente de manifiesto en el caso de tratar de precisar el impacto del cambio climático. Por consiguiente, deberían promoverse estudios básicos a largo plazo para intentar detectar las tendencias en la evolución de los suelos y sus respuestas a las perturbaciones y al cambio climático, especialmente en relación con los eventos de baja periodicidad. Una primera necesidad básica sobre los recursos edáficos es el inventariado de los mismos a una escala útil a la gestión (al menos 1:50.000), sobre el cual plasmar la evaluación de su estado, planificar su gestión y proyectar las tendencias de cambio.

Los nuevos estudios de reconocimiento, evaluación y monitorización de los suelos darían especial importancia a seleccionados indicadores de la calidad del suelo, tales como las propiedades hídricas (por ejemplo S-theory, Dexter 2004).

Sobre los efectos del cambio climático en el OC del suelo, serían necesarios estudios donde se analizarán conjuntamente los efectos de la elevación del CO_2 atmosférico y cambios de temperatura y precipitación. En relación con las medidas de mitigación, es necesario reforzar la investigación sobre la utilización de enmiendas orgánicas y la influencia de su calidad, junto a otras técnicas de gestión del suelo, para aumentar su capacidad de secuestro de OC, tomando en consideración el papel de la actividad y diversidad biológica del suelo.

Sería necesaria la investigación en sistemas informáticos que faciliten la transferencia de la información y el conocimiento sobre los recursos edáficos a los políticos y los usuarios directos del territorio, tanto para los escenarios actuales como para aquellos de cambio climático. Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la planificación de usos de suelos, así como en la formulación de prácticas de manejo a la medida de cada suelo (por ejemplo MicroLEIS DSS, De la Rosa *et al.* 2004), constituyen ya una realidad con extraordinarias posibilidades de aplicación y adaptación.

8.11. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez R. y Lavado R.S. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. Geoderma 83: 127-141.

Álvarez R., Santanatoglia O.J. y García R. 1995. Effect of temperature on soil microbial biomass and its metabolic quotient in situ under different tillage systems. Biology and Fertility of Soils 19: 227-230.

Amezaga I., Gonzalez Arias A., Domingo M., Echeandía A. y Onoindia M., 1997. Atmospheric deposition and canopy interactions from conifer and deciduous forests in northern Spain. Water Air and Soil Pollution 97(3-4): 303-313.

Amezketa E., Aragués R., Pérez P., Bercero A. 2003. Techniques for controlling soil custing and its effect on corn emergence and production. Spanish Journal of Agricultural Research 11: 101-110.

Bautista S., Abad N., Llovet J., Bladé C., Ferran A., Ponce J.M., Caturla R.N., Alloza J.A., Bellot J. y Vallejo V.R., 1996. Siembra de herbáceas y aplicación de *mulch* para la conservación

de suelos afectados por incendios forestales. En: Vallejo, V.R. (ed.). La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. CEAM, Valencia. Pgs. 395-434.

Barral M.T. y Díaz-Fierros F. 1999. Los suelos de Galicia. En: Geografía General de Galicia. Tomo XVII. Hércules Ed. A Coruña.

Batjes N.H. y Sombroek W.G. 1997. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. Global Change Biology 3: 161-173.

Bellot J. y Escarré A. 1991. Chemical characteristics and temporal variations of nutrient in throughfall and stemflow of three species in a Mediterranean holm oak forest. Forest Ecology and Management 41: 125-135.

Bellot J., Bonet A., Sánchez J.R. y Chirino E. 2001. Likely effects of land use changes on the runoff and aquifer recharge in a semiarid landscape using a hydrological model. Landscape and Urban Planning 55(1): 41-53.

Berg B., Albrektson A., Berg M.P., Cortina J., Johansson M., Gallardo A., Madeira M., Pausas J., Kratz W., Vallejo R.y McClaugherty C. 1999. Amounts of litter fall in some pine forests in a European transect, in particular Scots pine. Annals of Forest Science 56: 625-639.

Binkley D. y Giardina C. 1997. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. En*:* Nambiar E.K.S. y Brown A. (eds.), Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forest, CSIRO/ACIAR, Canberra, Australia. pgs. 297-237.

Bol R., Bolger T., Cully R. y Little D. 2003. Recalcitrant soil organic material mineralize more efficiently at higher temperatures. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166, 300-307.

Bottner P., Coûteaux M.M. y Vallejo V.R. 1995. Soil organic matter in Mediterranean-type ecosystems and global climate changes: A case study - The soils of the Mediterranean basin. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (eds.). Global Change and Mediterranean Type Ecosystems. Ecological Studies 117, Springer Verlag, N.Y.

Bottner P., Coûteaux M.M., Anderson J.M., Berg B., Billès G., Bolger T., Casabianca H., Romanyà J. y Rovira P. 2000. Decomposition of ^{13}C-labelled plant material in a European 65-40° latitudinal transect of coniferous forest soils: simulation of climate change by translocation of soils. Soil Biology y Biochemistry 32, 527-543.

Bradshaw A.D. 1997. The importance of soil ecology in restoration science. In: Urbanska K.M, Webb N.R. y Edwards P.J. (eds.). Restoration Ecology and Sustainable Development. Cambridge University Press, Melbourne. Pgs. 33-65.

Calvo de Anta R., Macias F. y Rivero, A. 1992 Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña. Diputación Provincial de A Coruña. Coruña.

Camarero L., Masque P., Devos W., Ani-Ragolta, I., Catalán, J., Moor, H.C., Pla, S. y Sánchez-Cabeza, J. A. 1998. Historical variations in lead fluxes in the Pyrenees (Northeast Spain) from a dated lake sediment core. Water Air and Soil Pollution 105(1-2): 439-449.

Camarero L. y Catalán J. 1993. Chemistry of bulk precipitation in the central and eastern Pyrenees, northeast Spain. Atmospheric Environment Part A General Topics 27(1): 83-94.

Caravaca F., Alguacil M.M., Figueroa D., Barea J.M. y Roldán, A. 2003a. Re-establishment of *Retama sphaerocarpa* as a target species for reclamation of soil physical and biological properties in a semi-arid Mediterranean area. Forest Ecology and Management 182: 49-58.

Caravaca F., Figueroa D., Roldán A. y Azcón-Aguilar C. 2003b. Alteration in rhizosphere soil properties of afforested *Rhamnus lycioides* seedlings in short- term response to mycorrhizal inoculation with glomus intradices and organic amendment. Environmental Management 31(3): 412-420.

Caravaca F., García C., Hernández M.T. y Roldán A. 2002. Aggregate stability changes after organic amendment and mycorrhizal inoculation in the afforestation of a semiarid site with Pinus halepensis. Applied Soil Ecology 19(3): 199-208.

Carrera G., Fernández P., Grimalt J.O., Ventura M., Camarero L., Catalán J., Nickus U., Thies H. y Psenner R. 2002. Atmospheric deposition of organochlorine compounds to remote high mountain lakes of Europe. Environmental Science y Technology 36(12): 2581-2588.

Casals P., Romanya J., Cortina J., Bottner P., Couteaux M.M. y Vallejo V.R. 2000. CO_2 efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. Biogeochemistry: 48, 261-281.

Castro J., Zamora R., Hodar J. A. y Gómez J.M. 2002. Use of shrubs as nurse plants: A new technique for reforestation in Mediterranean mountains. Restoration Ecology 10(2): 297-305.

CEC (Commission of the Europen Communities), 1985. Soil map of the Europen Communities 1: 1.000.000. Directorate General for Agriculture 1985 Louxemburg.

Comisión Europea, 2002. Comunicación de la Comisión al Consejo, el Parlamento Europeo, el Comité Económico y social y el Comité de las regiones. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. COM (2002) 179 final. Bruselas, 39 pp.

Coûteaux, M.M., Bottner, P., Anderson, J.M., Bolger, T., Casals, P., Romanyà, J., Thiéry, J.M. y Vallejo, V.R., 2000. Decomposition of ^{13}C-labelled standard plant material in a latitudinal transect of European coniferous forests : Differential impact of climate on the decomposition of soil organic matter components. Biogeochemistry 54 (2) : 147-170.

Coûteaux M.M., Mousseau M., Célerier M.L. y Bottner P. 1991. Increased atmospheric CO_2 and litter quality: decomposition of sweet chestnut leaf litter with animal food web of different complexity. Oikos 61: 54-64.

Davidson E.A. y Ackerman I.L. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. Biogeochemistry. 20: 161-193.

De Angelis P., Chigwerewe K.S. y Scarascia Mugnozza G.E. 2000. Litter quality and decomposition in a CO_2-enriched Mediterranean forest ecosystem. Plant and Soil 224: 31-41.

De la Rosa D. (Coord.) 2001. SEISnet: Sistema Español de Información de Suelos en Internet. Edafología 8: 45-56.

De la Rosa D., Crompvoets J., Mayol F. y Moreno J.A. 1996. Land Vulnerability Evaluation and Climate Change Impacts in Andalucia, Spain. International Agrophysics Journal 10: 225-238.

De la Rosa D., Mayol F., Diaz-Pereira E., Fernández M. y De la Rosa D. Jr. 2004. A Land Evaluation Decision Support System (MicroLEIS DSS) for Agricultural Soil Protection. Environmental Modelling y Software: 19, 929-942. http://www.microleis.com.

Dexter A.R. 2004. Soil Physical Quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. Geoderma (en prensa).

Dirección General de Desarrollo Rural. 2001. Plan Nacional de Regadíos. Horizonte 2008. MAPA, Madrid.

FAO. 2002. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Roma.

FAO-CSIC. 2003. The Multilingual Soil Profile Database (SDBmPlus). FAO Land and Water Digital Media Series No. 23. CD-ROM. Rome.

Fernández-Sanjurjo M.J., Fernández Vega V. y García-Rodeja E. 1997. Atmospheric deposition and ionic concentration in soils under pine and deciduous forests in the river Sor catchment (Galicia, NW Spain). Science of the Total Environment 204(2): 125-134.

Freckman D.W., Blackburn T.W., Brussaard L., Hutchings P., Palmer M.A. y Snelgrove P.V.R. 1997. Linking biodiversity and ecosystem functioning of soils and sediments. Ambio 26: 556-562.

García C., Hernández T., Roldán A., Albadalejo J. y Castillo V. 2000. Organic amendment and micorrhizal inoculation as a practice in afforestation of soils with *Pinus halepensis* Miller: effect on their microbial activity. Soil Biology and Biochemistry 32: 1173-1181.

Gómez J. 1992. Ciencia y política de los montes españoles 1848-1936. ICONA, Madrid.

González-Pérez J.A., González-Vila F.J., Almendros G. 2004. The effect of fire on soil organic matter - a review. Environment International 30: 855-870.

González J.A., González-Vila F.J., Polvillo O., Almendros G., Knicker H., Salas F. y Costa J.C. 2002. Wildfire and black carbon in Andalusian Mediterranean forest. En: Viegas, D.X. (ed.). Forest Fire Research y Wildland Fire Safety. Millpress, Rotterdam.

González-Vila F.J. y Almendros G. 2003. Thermal transformation of soil organic matter by natural fires and laboratory-controlled heatings. En: Ikan R. (ed.). Natural and Laboratory Simulated Thermal Geochemical Processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Grande Covián, R. 1967. Las marismas del Guadalquivir y su rescate, vol. 5 29. Ministerio de Agricultura, Madrid.

Guntiñas E., Leiros M.C., Trasar-Cepeda C., García-Fernández F. y Gil Sotres F. 2000. Laboratory study of soil matter mineralization in a temperate forest soil. 10th International Humic Substances Society. Toulouse.

Harte J., Rawa A. y Price V. 1996. Effects of manipulated soil microclimate on mesofaunal biomass and diversity. Soil Biology y Biochemistry 28: 313-322.

Hontoria C., Rodríguez Murillo J.C. y Saa A. 1999. Relationships between soil organic carbon and site characteristics in peninsular Spain. Soil Science Society of America Journal 63: 614-621.

Hungate B.A., Holland E.A., Jackson R.B., Stuart Chapin III F., Mooney H.A. y Field C.B. 1997. The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment. Nature 388, 576-579.

Ibáñez J.J., Lledó M.J., Sánchez J.R. y Rodà, F. 1999. Stand structure, aboveground biomass and production. En: Rodà F., Retana J., Gracia C.A. y Bellot J. (eds). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Ecological Studies, vol. 137. Springer-Verlag, Berlin. Pgs. 31-45.

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 123: 1-22.

Lal R. y Kimble J.M. 1998. Soil Conservation for Mitigating the Greenhouse Effect. En: Blume H. *et al.* (eds.). Towards Sustainable Land Use. Vol. I. Advances in Geoecology 31, Catena Verlag. Reiskirchen. Pgs. 185-192.

Lal R., Kimble J., Follett R.F. y Cole C.V. 1998. The Potential for U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. Sleeping Bear Press, Ann Arbor, MI.

Levine J.S. 1996. FireSat and the global monitoring of biomass burning. En: Levine, J.S. (ed.). Biomass Burning and Global Change Volume 1.The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Macías F., Gil Bueno A. y Monterroso, C. 2001.Fijación de carbono en biomasa y suelos de mina revegetados con cultivos energéticos. En: Montes para la Sociedad del Nuevo Milenio. III Congreso Forestal Español. Mesas 1 y 2. 524-527. SECF, Granada.

Maestre F.T., Bautista S., Cortina J. y Bellot J. 2001. Potential for using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. Ecological Applications 11(6): 1641-1655.

Maestre F.T., Huesca M., Zaady E., Bautista S. y Cortina J. 2002. Infiltration, penetration resistance and microphytic crust composition in contrasted microsites within a Mediterranean semi-arid steppe. Soil Biology and Biochemistry 34(6): 895-898.

Marcos E., Calvo L. y Luis-Calabuig, E. 2003. Effects of fertilization and cutting on the chemical composition of vegetation and soils of mountain heathlands in Spain. Journal of Vegetation Science 14(3): 417-424.

Martínez Mena M., Alvarez J., Castillo V. y Albadalejo J. 2002. Organic carbon and nitrogen losses influnced by vegetation removal in a semiarid mediterranean soil. Biogeochemistry 61(3): 309-321.

McGee E.J. y Vallejo V.R. 1996. Long range transport and soil interception of atmophile elements on a transect across the Pyrenees. En: Borrell P.M., Cvitass, T., Kelly K. y Seiler W. (eds.). Proceedings of EUROTRAC Symposium '96. Computational Mechanics Publ., Southampton.

Millán, M., Estrela, M.J. y Miró, J. 2004 (In press). Rainfall components: variability and spatial distribution in a Mediterranean Area (Valencia Region). Journal of Climate.

Moreno F., Cabrera F., Andreu L., Vaz R., Martín-Aranda, J. y Vachaud, G. 1995. Water movement and salt leaching in drained and irrigated marsh soils of southwest Spain. Agricultural Water Management 27: 25-44.

Moreno G. y Gallardo J. F. 2002. Atmospheric deposition in oligotrophic Quercus pyrenaica forests: Implications for forest nutrition. Forest Ecology and Management 171(1-2): 17-29.

Moscatelli M.C., Fonck M., De Angelis P., Larbi H., Macuz A., Rambelli A. y Grego S. 2001. Mediterranean natural forest living at elevated carbon dioxide: soil biological properties and plant biomass growth. Soil Use and Management 17: 195-202.

Nearing M.A Pruski F.F. y O´Neal M.R. 2004. Expectated climate change impacts on soil erosion rates: a review. Journal of Soil and Water Conservation 59(1): 43-50.

Panikov N.S. 1999. Understanding and prediction of soil microbial community dynamics under global change. Applied Soil Ecology 11: 161-176.

Parshotam A., Saggar S., Tate K. y Parfitt R. 2001. Modelling organic matter dynamics in New Zealand soils. Environment Inernational 27(2-3): 111-119.

Paustian K., Elliott E.T., Peterson G.A. y Killian K. 1996. Modelling climate, CO_2 and management impacts on soil carbon in semi-arid agroecosystems. Plant and Soil 187: 351-365.

Peñuelas J., Filella I. Tognetti R. 2001. Leaf mineral concentrations of Erica arborea, Juniperus communis and Myrtus communis growing in the proximity of a natural CO_2 spring. Global Change Biology 7: 291-307.

Peñuelas J., Gordon C., Llorens L., Nielsen T., Tietema A., Beier C., Bruna P., Emmett B., Estiarte M. y Gorissen A. 2003. Non-intrusive field experiments show different plant responses to warming and drought among sites , seasons and species in a North-South European gradient. Ecosystems 7(6): 598-612.

Pérez-Trejo F., 1992. Desertification and land degradation in the European Mediterranean. Report EUR 14850, European Comission, Brussels.

Piñol J., Terradas J. y Lloret F. 1998. Climatic warming hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. Climatic Change 38: 345-357.

Pugnaire F.I., Haase P. y Puigdefábregas J. 1996. Facilitation between higher plants species in a semiarid environment. Ecology 75: 1420-1426.

Querejeta J.I., Roldán A., Albaladejo J. y Castillo V. 2000. Soil physical properties and moisture content affected by site preparation in the afforestation of a semiarid Rangeland. Soil Science Society of America Journal 64(6): 2087-2096.

Raupach M.R., Canadell, J.G., Bakker, D.C.E., Ciais, P., Sanz, M.J., Fang, J-Y., Melillo, J.M., Lankao, P.R., Santhaye, J.A., Schulze, E.-D., Smith, P., Tschirley, J. 2003. Interactions between CO2 Stabilization Pathways and requirements for a Sustainable Earth System, pp 131-162 in SCOPE 62: The Global Carbon Cycle: Interacting Humans, Climate, and the Natural World, Edited by Christopher B.F. y Michael R.R., Island Press.

Renard K.G. y Freidmund J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. Journal of Hydrology 157: 287-306.

Rey A., Pegoraro E., Tedeschi V., de Parri I., Jarvis P.G. y Valentini, R. 2002. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. Global Change Biology 8: 851-866.

Ringius L. 1999. Soil Carbon Sequestration and the CDM: Opportunities and challenges for Africa. CICERO Report. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment (UCCEE). Oslo.

Rodà F., Ávila A. y Rodrigo, A. 2002. Nitrogen deposition in Mediterranean forests. Environmental Pollution 118 (2): 205-213.

Rodríguez-Murillo J.C. 2001. Organic acrbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. Biology and Fertility of Soils 33: 53-61.

Rojo L. y Sánchez Fuster M.C. 1996: Red de Estaciones Experimentales de seguimiento y evaluación de la erosión y desertificación. LUCDEME (RESEL) Catálogo de Estaciones. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 121 pp.

Romanyà J. y Vallejo V.R. 1995. Nutritional status aned deficiency diagnosis of *Pinus radiata* plantations in Spain. Forest Science 422: 192-197.

Romanyà J. y Vallejo V.R. 2004. Productivity of *Pinus radiata* plantations in Spain in response to climate and soil. Forest Ecology and Management (en prensa).

Romanyà J., Casals P. y Vallejo V.R. 2001. Short term-effects of FIRE on soil nitrogen availability in Mediterranean grasslands and shurblands growing in old fields. Forest Ecology and Management 147: 39-53.

Romanyà J., Cortina J., Falloon P., Coleman K. y Smith P. 2000. Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils. European Journal of Soil Science 51: 627-641.

Rovira P. 2001. Descomposició i estabilització de la matèria orgànica als sòls forestals de la mediterrània: qualitat, protecció física i factor fondària. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona.

Sánchez B. y Dios R. (eds.) 1995. Estudio agrobiológico de la provincia de Ourense. C.S.I.C. Pontevedra.

Sánchez-Rodríguez F., Rodríguez-Soalleiro R., Español E., López C.A. y Merino A. 2002. Influence of eadphic factors and tree nutritive status on the productivity of *Pinus radiata* D.Don plantations in northwestern Spain. Forest Ecology and Management 171: 181-189.

Sanz M.J., Carratala A., Gimeno C. y Millan M.M. 2002. Atmospheric nitrogen deposition on the east coast of Spain: Relevance of dry deposition in semi-arid Mediterranean regions. Environmental Pollution 118(2): 259-272.

Scheu S. y Wolters V. 1991. Influence of fragmentation and bioturbation on the decomposition of 14C-labelled beech leaf litter. Soil Biology and Biochemistry 23: 1029-1034.

Serrasolses I. y Vallejo V.R., 1999. Soil fertility after fire and clear-cutting. En: Rodà F., Retana J., Gracia C.A. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer-Verlag, Berlin. Pgs. 315-328.

Setälä H. y Huhta V. 1990. Evaluation of the soil fauna impact on decomposition in a simulated coniferous forest soil. Biology and Fertility of Soils 10: 163-169.

Smith, P., 2004. Soils as carbon sinks: the global context. Soil Use and Management, 20: 212-218.

Soto B., Benito E. y Díaz-Fierros F. 1991. Heat-induced degradation processes in forest soils. International Journal of Wildland Fire 1(3): 147-152.

Soto B. y Díaz-Fierros F. 1998. Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. Catena 31: 257-270.

Squires V.R. 1998. Dryland Soils: Their potential as a sink for carbon and as an agent in mitigating climate change. En: Blume H. *et al.* (Eds.) Towards Sustainable Land Use. Vol. I. Advances in Geoecology 31, Catena Verlag. Reiskirchen. Pgs. 209-215.

Tinker P.B. y Ineson P. 1990. Soil organic matter and biology in relation to climate chance. En Soils on a warmer earth. Elsevier. Amsterdam.

UNEP-EEA. 2000. Down to Earth: Soil Degradation and Sustainable Development in Europe. Environmental Issue Series No. 16. European Environmental Agency Pub. Copenhagen.

USDA. 1987. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agrcultural Handbook, USDA. Washington, DC.

Valdecantos A. 2001. Aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la repoblación de zonas forestales degradadas de la Comunidad Valenciana Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

Vallejo V.R., Cortina J., Ferran A., Fons J., Romanyà J. y Serrasolsas 1998. Sobre els trets distintius dels sòls mediterranis. Acta Bot. Barc., 45 (Homenatge a Oriol de Bolòs): 603-632.

Vallejo V.R., 1999**.** Evaluation of soils for land use allocation. En: Golley F.B. y Bellot J. (eds.). Rural Planning from an environmental systems perspective. Springer-Verlag, New York. Pgs. 109-127.

Vallejo R., Cortina J., Vilagrosa A., Seva J. P. y Alloza, J. A. 2003. Problemas y perspectivas de la utilización de leñosas autóctonas en la restauración forestal. En: Rey J.M., Espigares T. y Nicolau J.M. (eds.). Restauración de ecosistemas mediterráneos. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá. Alcalá. Pgs. 11-42.

Van Veen J.A., Liljeroth E., Lekkerkerk L.J.A. y Van de Geijn S.C. 1991. Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO_2 levels. Ecological Applications 1: 175-181.

Vitousek P.M. 1992. Global environmental change: an introduction. Annual Review in Ecology and Systematics 23: 1-14.

Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schllesinger, W.H. y Tilman D.G. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. Ecologicl Applications 7: 737-750.

West N.E., Stark J.M, Johnson D.W., Abrams M.M., Wight J.R., Heggem D. y Peck S. 1994. Effects of climate change on the edaphic features of arid and semiarid lands of Western North America. Arid Soil Research and Rehabilitation 8, 307-651.ACCESS: Agro-climatic Change and European Soil Suitability. Science Research Development EUR 16826 EN, pgs. 1-28.

Zaller J.G. y Arnone J.A. 1997. Activity of surface-casting earthworms in a calcareous grasslands under elevated atmospheric CO_2. Oecologia (Berlin) 111: 249-254.

9. IMPACTOS SOBRE EL SECTOR FORESTAL

Carlos Gracia, Luis Gil y Gregorio Montero

Contribuyentes

J. Ezquerra, E. Pla, S. Sabaté, A. Sánchez, G. Sánchez-Peña, J. Vayreda

Revisores

J. Martínez Chamorro, S. Mutke Regneri, M. J. Sanz

RESUMEN

Los bosques ocupan en España cerca de 15 millones de hectáreas a los que hay que añadir otros 11.5 millones de hectáreas más de matorral diverso y pastos en terrenos forestales. Esta superficie forestal produce, en su conjunto, 1200 millones de euros anualmente (sin considerar la producción ganadera) de los que la madera supone cerca de 800 millones. La sociedad recibe del bosque otros bienes y servicios, hoy por hoy de difícil cuantificación económica, pero no por eso menos importantes, entre los que destacan la protección frente a la erosión, el control y regulación del ciclo hidrológico, la contribución a la conservación de la biodiversidad y el uso recreativo.

El origen de algunas especies de pinos o robles se remonta a millones de años y han superado varias fluctuaciones climáticas. Los árboles adultos son capaces de soportar un cierto grado de estrés ambiental pero su sensibilidad aumenta en las fases de regeneración de la masa forestal. Junto al cambio climático, la regresión del medio aumenta la sensibilidad de las especies, dado que muchos bosques no pueden reocupar hoy áreas que ocuparon con anterioridad, debido por ejemplo, a los problemas de erosión por falta de cubierta vegetal.

Plagas y enfermedades forestales pueden jugar un papel fundamental en la fragmentación de las áreas forestales. Algunas especies perforadoras o defoliadoras pueden llegar a completar dos ciclos biológicos en un año ó aumentar su área de colonización como consecuencia de los inviernos más benignos.

La fisiología de la mayor parte de especies forestales se puede ver profundamente afectada. Los caducifolios alargan su periodo vegetativo, La renovación foliar y de las raíces finas de los perennifolios se acelera, alterando el balance de carbono interno de la planta. El mayor consumo de carbono que el árbol debe invertir para renovar estas estructuras incrementa el consumo de carbohidratos de reserva y aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales. El retorno de materia orgánica al suelo en forma de hojarasca y raíces finas puede aumentar los aportes de materia orgánica al suelo a la vez que reduce la producción de madera. Existe un riesgo muy alto de que muchos de nuestros ecosistemas forestales se conviertan en emisores netos de carbono durante la segunda mitad del presente siglo. Las zonas culminales de las montañas, los ambientes más xéricos, y los bosques de ribera son algunas de las zonas que pueden resultar más vulnerables al cambio climático.

Ante los cambios previsibles, es aconsejable aplicar una gestión adaptativa. El resalveo de los montes bajos reduciendo la densidad de pies demuestra ser un eficaz tratamiento que mejora la respuesta de estos montes al cambio climático. El control y la adecuación de los turnos e intensidades de aprovechamiento, deben ser considerados para optimizar la respuesta del bosque. Igualmente resulta importante la cuidadosa selección de las procedencias de las semillas en las repoblaciones para una gestión adecuada de la diversidad genética.

Entre las necesidades más apremiantes para el futuro destacan la necesidad de disponer de un conocimiento más preciso sobre las biomasas subterráneas de nuestras especies forestales, dado el papel primordial que la fracción subterránea juega en la respuesta a las perturbaciones y con el fin de precisar los valores del carbono acumulado en nuestros bosques, el establecimiento o consolidación de redes de observación y análisis de los factores ecofisiológicos que determinan la regeneración y, en conjunto, la respuesta del bosque a los cambios ambientales y potenciar el desarrollo y aplicación de los modelos de crecimiento forestal, especialmente los basados en procesos fisiológicos, para prever las respuestas del bosque a cambios ambientales o patrones de gestión.

9.1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales constituyen una de las unidades de paisaje natural más complejas en cuanto a función, estructura y dinámica. Desde los albores de su existencia el hombre ha utilizado y se ha beneficiado de los diversos productos y servicios que los territorios forestales le han proporcionado: madera, leñas, frutos, resinas, hongos, cobijo y resguardo, esparcimiento, etc. Esta diversidad de productos es el mejor indicado de su propia complejidad.

En el pasado, los montes se aprovechaban de acuerdo a las necesidades de los pueblos y comunidades que vivían en el entorno, sin tener en cuenta su capacidad productiva. No existía el concepto de producción forestal sostenible, que aparece durante la primera mitad del siglo XIX, con la aplicación generalizada de la Ordenación de Montes y de las primeras bases de la técnica selvícola.

Actualmente, el mantenimiento, cuidado y mejora de las masas forestales no obedece a simples razones productivas, aún por importantes que éstas sean, sino que es fundamental considerar la necesidad que tienen los países de contar con superficies forestales abundantes y bien distribuidas, como base para el equilibrio biológico y social del territorio. En sociedades industrializadas, como la nuestra, ha arraigado fuertemente la idea del bosque multifuncional, estructura generadora de diversidad biológica, y fuente de múltiples productos, servicios y utilidades. La sociedad, demandante y receptora última de los productos y servicios generados por los territorios forestales, ya no exige que la producción maderera sea exclusiva en nuestros montes. En esta línea, los sistemas forestales y silvopastorales propios del medio mediterráneo constituyen un claro ejemplo de gestión multifuncional del territorio forestal.

El alcance e importancia del Sector Forestal en España queda reflejado en la extensión que ocupan los terrenos forestales en nuestro país; en la diversidad y valor de los productos y servicios que estos terrenos proporcionan a la sociedad; y, para aquellos productos donde se dispone de información suficiente, en la valoración de los sectores industriales asociados al sector.

9.1.1. Superficie Forestal Española

La Ley de Montes 43/2003 de 21 de noviembre de 2003 define en su artículo primero la superficie forestal o monte como "*...todo terreno en el que el vegetan especies forestales arbóreas, arbustivas, de matorral o herbáceas, sea espontáneamente o procedan de siembra o plantación, que cumplan o puedan cumplir funciones ambientales, protectoras, productoras, culturales, paisajísticas o recreativas ...*". Utilizando esta definición, el Plan Forestal Español estima que la superficie forestal nacional se cifra en 26.273.235 ha, lo que supone el 51.4% de la superficie nacional. Esta superficie puede clasificarse de acuerdo al tipo de cubierta vegetal que sustenta (tabla 9.1):

Tabla 9.1. *Distribución de la superficie forestal española según cubierta. (FCC=fracción de cabida cubierta).*

Tipo de cubierta	Superficie (ha)	Tipo de especie	Superficie (ha)
Forestal arbolado (FCC>5%)	14.732.247	Coníferas	5.833.970
		Frondosas	4.287.084
		Mixtas	4.581.729
Matorral diverso con arbolado (FCC<5%)	9.228.407		
Pastos forestales no arbolados	2.312.581		

La titularidad de estos territorios forestales corresponde al Estado, las CC.AA., entidades locales y propietarios particulares, en la proporción presentada en el gráfico siguiente:

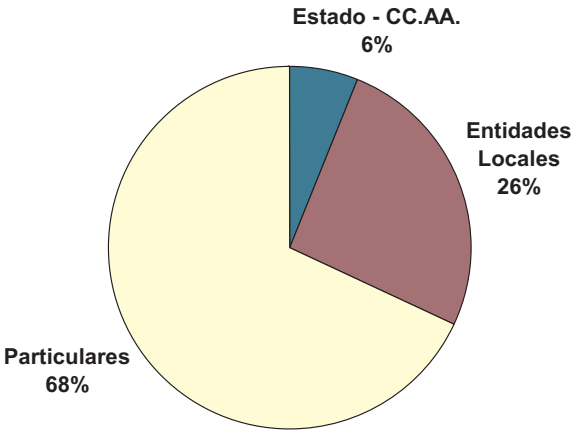


Fig. 9.1. *Titularidad de los territorios forestales en España.*

9.1.2. Producciones forestales: Cuantificación y valoración

La falta de una Fuente de Estadística Forestal exclusiva y la no existencia de mercados centrales de los productos forestales dificultan la cuantificación y valoración de los productos de interés comercial. Asimismo, es necesario incluir en las producciones forestales una serie de bienes y servicios que los montes proporcionan a la sociedad, cuya valoración y cuantificación se ha de desarrollar mediante métodos indirectos (encuestas, valoración contingente, etc.). Estos condicionantes dificultan la valoración y cuantificación de la producción forestal general.

9.1.2.1. Productos de interés comercial

El aprovechamiento de los productos forestales, de acuerdo a la vigente Ley de Montes, corresponde a los titulares del terreno forestal. La regulación de los mismos recae, sin embargo, en la administración forestal competente, lo que supone una garantía para la persistencia y sostenibilidad de las masas y sus producciones asociadas. La tabla 9.2 muestra la cuantificación y valoración anual de los distintos productos forestales, valorados en cargadero (extraídos del monte pero no transformados industrialmente). El total de la producción forestal no transformada asciende a 1200 millones de euros al año (sin considerar producción ganadera). Este cifra implica que la renta media anual de los terrenos forestales (considerando únicamente los productos de interés comercial) puede cifrarse en 45.67 €/ha.

Tabla 9.2. *Valoración y cuantificación de los productos forestales de interés comercial.*

Producto	**Categoría**	**Producción (10^3 tm/año)**	**Valoración (10^6 €/año)**
Madera	Coníferas	9082 *	396
	Frondosas	5696 *	253
	Sin clasificar	3289 *	143
Leñas	Gruesas	1250	40
	Biomasa	2000	
Corcho		85	90
Resina		4.2	2.5
Frutos	Bellota	400	19
	Castaña	20	13
	Piñón con cáscara	6	18
Hongos		9	30
Plantas medicinales		3	0.03
Caza		1326000 +	155
Pesca continental		834680+	25
Miel		0.02	0.06
Extracciones	Arena	1500	0.38
	Grava	1750	3
	Piedra	3000	1.6
Ganado		140000**	
Otros			9
Total madera			800
Total productos no maderables			400
TOTAL PRODUCTOS FORESTALES			1200

* 10^3 m^3 con corteza ; + licencias expedidas; ** toneladas en peso vivo, no valoradas económicamente. Fuente Anuario de Estadística Agraria (AEA).

9.1.2.2. Producción maderera

La principal producción de interés comercial obtenida en los terrenos forestales es la madera, cuyo valor se estima en 800 millones de euros al año. Las extracciones anuales de madera en España se cifran en 18.000.000 de m^3. Un indicador global de la sostenibilidad de la producción maderera es la comparación entre las extracciones y el crecimiento anual de las existencias maderables acumuladas en nuestros bosques. Según el Plan Forestal Español (PFE) los bosques españoles acumulan 675.000.000 de m^3 de madera, con un crecimiento anual cercano a 35.500.000 de m^3. Esto supone que únicamente se extrae el 50% del crecimiento anual de las masas forestales, lo que garantiza la compatibilidad entre la persistencia y expansión de la cubierta forestal y los aprovechamientos madereros.

El consumo aparente de madera en España (extracción + importación – exportación) se estima en 32.500.000 de m^3. El déficit entre la producción y el consumo se cubre actualmente a través de las importaciones, tanto de madera en rollo como de productos ya transformados (pasta de papel, madera aserrada, muebles, etc.). El consumo medio de madera por habitante y año en España es de 0.8 m^3. El hecho de que esta cifra sea inferior a la de los países de nuestro entorno, unido a la tendencia creciente que mantiene en los últimos años, hace suponer que en los próximos años se producirá un incremento en el consumo aparente de madera en nuestro país, que tendrá que ser cubierto bien mediante un incremento de la producción nacional bien de las importaciones.

9.1.2.3. Otros bienes y servicios producidos en los terrenos forestales

Fijación de CO_2

Los terrenos forestales, especialmente los arbolados, actúan como elementos fijadores del CO_2, principal gas que contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global del planeta. La fijación de CO_2 en los bosques y en los productos forestales derivados constituye un elemento fundamental del ciclo del carbono. En 2004, se estima que los bosques españoles (considerando únicamente el terreno forestal arbolado) acumulaban un total de 2050 millones de toneladas de CO_2, con un incremento neto anual de las fijaciones equivalente a unos 40 millones de toneladas (Montero *et al.* 2002, 2004). Esta cifra equivale aproximadamente a un 10% del total de CO_2 emitido a la atmósfera en España en el año 2002 (Anónimo 2004).

Protección frente a la erosión y control del ciclo hídrico

La erosión hídrica es el principal agente de desertificación en España. En España un 18,2% del territorio sufre pérdidas erosivas superiores a 50 tm/ha/año (Anónimo 2000). La erosión hídrica provoca la pérdida de suelos fértiles en zonas donde son necesarios para el mantenimiento del potencial biológico del territorio, y la posterior acumulación de estos materiales en otras áreas, con consecuencias muchas veces catastróficas (inundaciones, avenidas...). De entre las posibles cubiertas del territorio, las formaciones arboladas forestales son las que ejercen la función protectora con mayor eficacia, favoreciendo la regulación y calidad del agua, la prevención de inundaciones y alargando la vida de los embalses.

Conservación de la biodiversidad. Espacios naturales protegidos.

En España se han incluido más de 12 millones y medio de hectáreas de terreno en la Red Natura 2000, bien como *Lugares de importancia comunitaria* (LIC) o *Zonas de especial protección de Aves* (ZEPA). En estos territorios, la normativa obliga a que se incorporen a la gestión las medidas y mecanismos necesarios que garanticen la conservación de la biodiversidad. Más del 70% de los territorios incluidos en la Red (cerca de 9 millones de hectáreas) se clasifican como terrenos forestales, lo que indica que los bosques constituyen el elemento del territorio de mayor importancia en la conservación de la biodiverisidad. Los activos ambientales de no uso (protección y conservación de la biodiversidad) se valoran en 1220 millones de euros al año (Anónimo 2003).

Uso recreativo y paisaje

Los terrenos forestales constituyen un elemento básico del paisaje, así como una zona de esparcimiento y expansión de la población. La gestión de los montes españoles incluye entre sus objetivos el disfrute controlado y racional de los mismos, compatible con los aprovechamientos tradicionales. Una de las herramientas básicas en el cumplimiento de estos objetivos ha sido la creación y mantenimiento de zonas de concentración (áreas recreativas, áreas de acampada y refugios) y de centros de interpretación y aulas de la naturaleza, instalaciones que facilitan el acercamiento, comprensión e integración del ciudadano en el medio forestal. El uso recreativo y paisajístico de los terrenos forestales ha sido valorado mediante métodos de valoración contingente en 640 millones de euros al año (Anónimo 2003).

9.1.3. Valoración económica de los distintos productos y servicios obtenidos en los terrenos forestales

La tabla 9.3 presenta el valor anual total y por hectárea asignado a los diferentes productos y servicios obtenidos en los terrenos forestales. Estas cifras están infravaloradas, al no haber considerado la producción ganadera e incluir únicamente el valor del carbono neto fijado anualmente por los terrenos arbolados (sin considerar el fijado en los terrenos no arbolados, ni asignar un valor por el carbono acumulado).

Tabla 9.3. *Valoración de servicios y productos.* (Fuente: Anónimo 2003)**.**

Servicio o producto	Valor anual (10^6 €)	Valor anual (€/ha)
Madera	800	30.45
Productos forestales no madereros	400	15.22
Fijación neta anual CO_2*	220	8.37
Activos ambientales (protección, conservación)	1220	46.45
Uso recreativo y paisaje	640	24.36
TOTAL	**3280**	**124.85**

* (únicamente terreno forestal arbolado, usando como referencia un valor de 5.5€/ t CO_2)

9.1.4. Inversión pública en el sector forestal

La inversión pública en el sector forestal supone el 20% del total de la inversión pública en medio ambiente, alcanzando un valor en 2002 superior a 820 millones de euros (ASEMFO 2002). La inversión pública en el sector forestal se ejecuta principalmente desde las Administraciones Autonómicas (580 millones de €) y la Administración Central del Estado (240 millones €). Las administraciones autonómicas financian tanto actuaciones en los terrenos forestales cuya gestión controlan (normalmente de titularidad pública) como subvenciones para la intervención en terrenos forestales de titularidad privada. Las inversiones procedentes de la Administración Central del Estado se centran tanto en el mantenimiento de servicios integrados (protección frente a incendios forestales y agentes nocivos, Banco de Datos de la Naturaleza), gestión de Parques Nacionales y actuaciones cofinanciadas con las CCAA (FEOGA, medidas complementarias PAC).

Considerando la superficie forestal española, la inversión media por hectárea y año, financiada a través de fondos públicos, se estima en 31.53 €.

Tabla 9.4. *Resumen Programa de Forestación de Tierras Agrarias (1994-1999)(Anónimo 2003).*

AYUDA A LA FORESTACIÓN	
Expedientes aprobados tras ejecución trabajo	34 981
Superficie subvencionable	451120 ha
Coste total (FEOGA+Estado)	608 10^6 €
Superficie media por beneficiario	12.9 ha
Coste medio forestación	1348 €/ha
PRIMA DE MANTENIMIENTO DE SUPERFICIES FORESTADAS	
Número de beneficiarios con solicitud aceptada	34 697
Superficie subvencionable	439923 ha
Coste total subvencionable	421 10^6 €

El principal destino de inversión forestal en España durante los últimos años ha sido el Programa de Forestación en Tierras Agrarias, ejecutado como medida de acompañamiento a la PAC, en el marco del reglamento comunitario 2080/92. Esta actuación, financiada principalmente a través de fondos comunitarios, ha supuesto una inversión media, entre 1994 y 1999, superior a los 200 millones de euros. El principal resultado de este plan ha sido el aumento de 450000 ha en la superficie forestal nacional. La tabla 9.4 resume los resultados del Programa para el quinquenio 1994-1999.

9.1.5. Balance producción-inversión en los terrenos forestales

Considerando la valoración anual de los productos, bienes y servicios producidos por una hectárea de terreno forestal español en un año, que se ha estimado en 124.85 €, y las inversiones públicas asignadas, valoradas en 31.53 € / hectárea.año, se obtiene un claro balance positivo, superior a los 90 € / hectárea.año. Considerando que en esta valoración no se ha incluido la producción ganadera forestal, ni la valoración del carbono acumulado (únicamente se ha considerado el carbono neto fijado cada año), y a la vista del resultado obtenido, se concluye que el mantenimiento, gestión y aprovechamiento sostenible de los terrenos forestales es una actividad netamente positiva para la sociedad.

9.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

Para las principales especies forestales, las que definen el paisaje y son un complemento a las economías rurales, los cambios climáticos no son un fenómeno reciente. El origen de algunas especies de *Pinus* o *Quercus* se remonta a millones de años, por lo que han superado varias fluctuaciones climáticas. Por su longevidad, el cambio se da en su propio ciclo, razón por la que obligadamente han superado los valores extremos que se han dado en los últimos siglos. Los estudios filogeográficos muestran como linajes localizados en refugios glaciales situados en la Península Ibérica tuvieron suficiente variación genética para adaptarse al cambio. Bajo el calentamiento del Holoceno, las especies forestales remontaron las montañas o se desplazaron hacía al norte conforme se retiraban los casquetes glaciares. Tal ha sido el caso de los robles blancos, uno de los grupos mejor estudiados en Europa (Petit *et al.* 2002).

Los árboles adultos son capaces de soportar niveles de estrés ambiental importante, si bien su sensibilidad es mayor cuando la masa forestal se encuentra en fase de regeneración. Esta requiere el éxito continuado en varios procesos ecológicos sucesivos, desde la polinización hasta el establecimiento de las plántulas. Estos procesos son, muchos de ellos, poco conocidos en las especies forestales, y se han de situar en un régimen de perturbaciones que crea oportunidades diferenciales para la coexistencia de varias especies arbóreas; situación que es general en nuestro país.

El cambio climático no es el único factor al que se enfrentan las especies forestales. La sensibilidad al clima actual es mayor por la regresión del medio que pueden ocupar. Muchos bosques no pueden recuperar terrenos que ocuparon con anterioridad. El efecto de la degradación del hábitat es más intenso en territorios de topografía abrupta, ahora con suelos rejuvenecidos en su perfil y con problemas de erosión por falta de cubierta vegetal, o bajo climas poco favorables para la regeneración por la baja pluviometría. Entre otros procesos, destaca la sobreexplotación de acuíferos que ha eliminado la capa freática próxima a la superficie y colocado en situaciones de extinción a numerosas poblaciones, entre los que se encuentran alcornocales, encinares o quejigares afectados por la denominada “seca”, así como manifestaciones de gran singularidad como la población de *Pinus sylvestris* de Coca (Segovia), localizada entre pinares de *Pinus pinaster* gracias a la existencia en el pasado de un freático accesible. La severa reducción a la que se ha visto sometida esta población ha influido de forma sustancial en el sistema reproductivo de una especie anemófila y alógama (Robledo-

Arnuncio *et al.* 2004). El último evento regenerativo de la población ocurrió hace casi un siglo y una población adaptada a las características térmicas de la Meseta Norte, más severas que en las laderas de la Sierra del Guadarrama, está en trance de desaparecer.

La capacidad de adaptación a los cambios ambientales va unida, a corto plazo, a una mayor plasticidad fenotípica, que es más elevada en las especies que superan el medio milenio (*Pinus nigra, P. canariensis, P. sylvestris, Quercus ilex* o *Q. petraea*) y con áreas de distribución extensas. En ellas, la variabilidad intrapoblacional es alta, pues el flujo genético impide la selección disruptiva y la especiación. La selección natural es poco eficiente por ser el ambiente heterogéneo y el componente de variación dentro de las poblaciones es mucho mayor que el existente entre poblaciones. En las especies de mayor nivel evolutivo, como robles y encinas, cabe esperar una diversidad genética intrapoblacional mayor; en particular, si son indiferentes edáficos, pues soportan mayor heterogeneidad ambiental en espacio y tiempo. En especies heliófilas, como los pinos, la variabilidad es más reducida, pues colonizan espacios vacíos y sólo adquieren la condición de permanentes en terrenos rústicos, donde la pobreza de suelo no permite medrar con éxito a encinas y robles, pudiendo, entonces, las coníferas superarlas por su mayor crecimiento.

A medio plazo, la sensibilidad de las especies forestales dependerá de su capacidad de dispersión y de la existencia de variabilidad genética en el seno de sus poblaciones. El hombre las ha eliminado o ha fragmentado su área de distribución y degradado su hábitat. La posible velocidad de respuesta se ha reducido, pues los terrenos más aptos están destinados a un uso agrícola y son más extensos los propicios a las especies pioneras. En habitas secos, abiertos y contrastados, los valores extremos del clima se manifiestan con mayor rigor y se dispersan con más facilidad las especies diseminadas por el viento. Especies con fructificaciones frecuentes facilitan su coincidencia con años adecuados para el establecimiento del regenerado; pero una mayor longevidad permite la aparición de eventos favorables en las especies veceras.

A igualdad de otras causas, la sensibilidad al clima actual está relacionada con el efectivo demográfico de las poblaciones, también con la existencia de eventos reproductivos recientes de origen sexual y que han sido sometidos a la presión selectiva del medio. Procesos que favorecen la diversidad genética, en particular, en los caracteres afectados por el cambio climático, como puede ser el sobrecalentamiento foliar, al que los pinos son menos vulnerables que las especies de hoja ancha, por tener sus hojas aciculares y enfriarse con mayor eficacia. Se asume que los lugares donde aparecen más de una especie se debe a una diversidad espacial y a la fluctuación temporal de las variables climáticas. Esta situación favorece la ocupación de los nichos existentes por poblaciones de elevada plasticidad y diversidad intraespecífica. La competencia en el ecotono entre estirpes de distinta significación ecológica es responsable de valores de diversidad más elevados, si se compararan con los poseídos en territorios de mayor homogeneidad.

Otro aspecto a considerar, positivo y que caracteriza el último medio siglo, son las repoblaciones forestales y el abandono de las prácticas agropastorales tradicionales, extensivas y marginales. El bosque ha recuperado superficies importantes, lo que permite que se manifieste gran parte del potencial adaptativo de sus especies por el incremento de sus efectivos demográficos.

9.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

9.3.1. Plagas y enfermedades forestales

El impacto previsible del cambio climático tiene una especial incidencia en los ecosistemas forestales, tanto directamente como a través de los diversos elementos que forman este universo, y entre ellos las plagas y enfermedades pueden llegar a jugar un papel relevante en

la fragmentación de áreas forestales, la rarificación de especies y la simplificación de la biodiversidad inherente a estos espacios, coadyuvando en casos extremos a la desaparición de la vegetación. Cambio, simplificación y riesgo de desaparición son consecuencias previsibles a corto y medio plazo.

La presencia de plagas y enfermedades forestales está indisolublemente asociada a los ecosistemas forestales. Como un elemento más de la red trófica contribuye, actuando de forma endémica o epidémica, al rejuvenecimiento y a la dinámica de la vegetación existente. Puntualmente, son elementos clave en la sucesión de formaciones vegetales y pueden ser utilizadas como un indicador de la variabilidad climática: la poiquilotermia inherente a la mayoría de los artrópodos los convierte en bioindicadores del clima y sus variaciones. Por tanto la importancia de las plagas y enfermedades ante un escenario de cambio climático debe conceptuarse bajo dos enfoques radicalmente diferentes:

- su presencia o ausencia como indicadores de alerta temprana de variaciones climáticas en el medio
- el impacto asociado al daño que provocan, elemento que acelera la ruptura del equilibrio planta-sistema ambiental y a menudo enmascara otros agentes precursores o inductores del desequilibrio (en este caso la variación climática).

El incremento de las temperaturas, y el consiguiente alargamiento de condiciones óptimas para el desarrollo de plagas y enfermedades, tienen como consecuencia un mayor y más duradero impacto sobre la vegetación de la que se alimentan. Por ejemplo: los perforadores de coníferas, *Ips acuminatus* e *Ips sexdentatus,* pueden llegar a completar más de dos generaciones en el año, si el movimiento de imagos se puede adelantar un mes por la bonanza térmica y alargarse durante el otoño; defoliadores, como *Diprion pini,* pueden desarrollar dos ciclos completos de forma habitual, o la procesionaria del pino, *Thaumetopoea pityocampa*, incrementa el área susceptible de ser colonizada, al poder subir en altitud ante inviernos más benignos y colonizar de forma natural pinares de pino silvestre hasta ahora libres de su impacto.

En todos estos casos, los insectos no son sino meros indicadores de las condiciones climáticas, y su impacto enmascara el papel jugado por estos agentes precursores. Junto a esto, los vegetales, sometidos a un mayor estrés hídrico o térmico, ven afectada su capacidad de resistencia ante su ataque.

Pero sin duda el mayor peligro lo constituyen las plagas y enfermedades exógenas al medio, los denominados *alien species* u organismos de cuarentena. La combinación de la introducción de estas especies, fruto indeseado del comercio internacional, frente a unos hospedantes desprovistos de mecanismos de atenuación del impacto o adaptación, y una climatología óptima para el desarrollo del nuevo patógeno, tiene como consecuencia el desarrollo exponencial de daños ante los cuales la vegetación no tiene apenas defensa. El desarrollo de *Lymantria dispar* en el continente norteamericano, la presencia de escolítidos y otros perforadores alóctonos en cualquier sistema forestal, o el desarrollo de síndromes como la *Seca* en el sudoeste europeo o el *Sudden oak death* en Norteamérica, donde interaccionan hongos como *Phythopthora*, *Bothryosphaeria*, bacterias como *Brennia*, escolítidos y el impacto de continuados déficits hídricos y olas de calor que impiden la recuperación de las reservas hídricas del suelo, plantean un panorama que en el mejor de los casos pasa por la sustitución de unas especies forestales por otras mejor adaptadas a las nuevas condiciones, o en el más pesimista, por la progresiva fragmentación y desaparición de algunas especies forestales. La preocupante situación de *Abies alba* en algunas zonas del Pirineo o de *Quercus suber* en el cuadrante sur-oeste peninsular pueden ser un indicador de este complejo proceso.

9.3.2. Fenología foliar: La vida media de las hojas de los perennifolios se reducirá en el futuro

La renovación foliar, que se puede representar por la vida media de las hojas, está muy ligada a la temperatura (Aussenac y Vallette 1982, Mohren y Kramer 1997). Se ha observado, en el caso de árboles de hoja perenne, como es el caso de la encina y los pinos, cómo un aumento de la temperatura puede acelarar su dinámica foliar disminuyendo la duración de las hojas en las copas, lo que se acelera aún más en el caso de condiciones de sequía. La vida media de las hojas de encina es de 2.8 años en el Montseny, donde la temperatura media es de 10º C y llueven 700 mm anuales y de 1.7 años en Sevilla, donde la temperatura media es de 18.8º C y llueven 535 mm anuales (Gracia *et al.* 2001). Estas observaciones también pueden ser válidas para las raíces finas que, en promedio duran poco más de 100 días en el encinar de Prades y que, en condiciones de sequía desaparecen (López *et al*. 1997, 1998, 2000, 2001a, 2001b). Por tanto, ambas estructuras requieren más carbono móvil de reserva para hacer frente a su renovación. Si el cambio climático apunta hacia un incremento de las temperaturas, se deduce que la renovación foliar y de las raíces finas se verá acelerada. Por otro lado, en el caso de los árboles que pierden la hoja en invierno (como hayas y robles), la duración de las hojas se alarga: adelantan el momento de la brotación y retrasan el momento de la caída lo que se traduce en un periodo vegetativo más largo y por tanto mayor periodo de producción. Ahora bien, si estas especies han de afrontar periodos de sequía estival más acentuados por el cambio climático, pueden pasarlo mal (McClaugherty *et al.* 1982, 1984). No hay que olvidar que las hojas de un caducifolio son, en general, menos esclerofilas y más sensibles a las pérdidas de agua que las de un perennifolio de hoja dura, como la encina, y que, por lo tanto, podrán resistir peor las pérdidas de agua ante un episodio prolongado de estrés hídrico.

El impacto del cambio climático sobre la duración de la hoja, y sus efectos fisiológicos derivados se ha evaluado utilizando los datos de 147 parcelas de especies perennifolias procedentes del Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (Gracia *et al*. 1992, 2000). El valor medio de la variable para las 147 parcelas analizadas resulta ser de 2.6 años con la mayor parte de los valores comprendidos entre 2 y 3 años y sólo en algunos enclaves, todos ellos en zonas de montaña ya sea en los Pirineos, en los Puertos de Beceite o en el Montseny, se dan valores superiores a los tres años. En el año 2040, la distribución prevista en los resultados de las simulaciones cambia notablemente, con un valor medio resultante de 1.9 años, lo que representa una reducción del 27 por ciento de la vida media de las hojas. Esta reducción de la vida de las hojas se traduce en un aumento de la producción de hojarasca, que pasa de los 205 g de C m^{-2}·$año^{-1}$ actuales a valores de 377 g de C m^{-2}·$año^{-1}$ en el año 2040. Este aumento de casi el 80 por ciento de la materia orgánica que llega al suelo tiene su repercusión en las tasas de respiración. Como respiración total entendemos aquí la suma de la respiración autotrófica de los árboles (la respiración de mantenimiento más la respiración de crecimiento invertida en la formación de nuevos tejidos del árbol) más la respiración heterotrófica procedente principalmente de la descomposición de materia orgánica del suelo. La cantidad de carbono devuelto anualmente a la atmósfera por los bosques de Cataluña es, en promedio, de 1462 g de C m^{-2}·$año^{-1}$ y este valor aumenta hasta 2307 g de C m^{-2}·$año^{-1}$ en el año 2040, lo que supone un aumento del 70 por ciento respecto a los valores actuales.

9.3.3. Distribución de reservas: El mayor consumo de Carbohidratos móviles incrementará la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales

En las encinas, la formación de los nuevos rebrotes se produce gracias a la movilización de una considerable cantidad de carbohidratos de reserva almacenados en las estructuras subterráneas (Breda *et al.* 1995). El almidón representa más del 95 por ciento de carbono de reserva. La figura 9.2 muestra el contenido de almidón en la corteza y en la madera de las estructuras subterráneas.

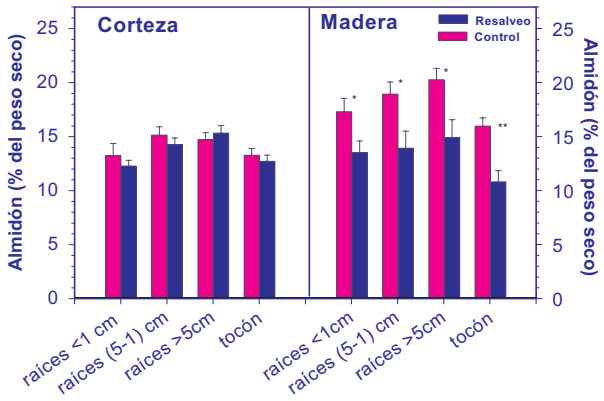


Fig. 9.2. *Porcentaje de almidón en diferentes fracciones del sistema radical de las encinas de las parcelas control y resalveadas medido un año después de efectuado el resalveo. El porcentaje de almidón en la madera de las parcelas resalveadas es un cinco por ciento inferior al de las parcelas control. La diferencia se debe al almidón movilizado tras el resalveo para recuperar la estructura de las copas y formar los nuevos rebrotes. Este porcentaje representa, en términos absolutos una cantidad que ronda las 10 toneladas de carbono que se movilizan tras el resalveo. Este resultado pone de manifiesto la importancia de las reservas de carbono móvil en los árboles.*

El almidón representa aproximadamente el 15 por ciento de la biomasa del tocón y de las raíces y no experimenta cambios significativos tras el resalveo (Gracia *et al.* 1994, 1996, 1999a). En los tejidos leñosos el almidón supone entre un 15 y un 20 por ciento de la biomasa subterránea, lo que equivale a 21.2 Mg/ha. De esta cantidad acumulada en la biomasa subterránea, un año después de producirse el resalveo se habían movilizado, en el tratamiento al que hace referencia la figura 9.2, 6.1 Mg/ha, que supone cerca del 30 por ciento de las reservas acumuladas en las raíces.

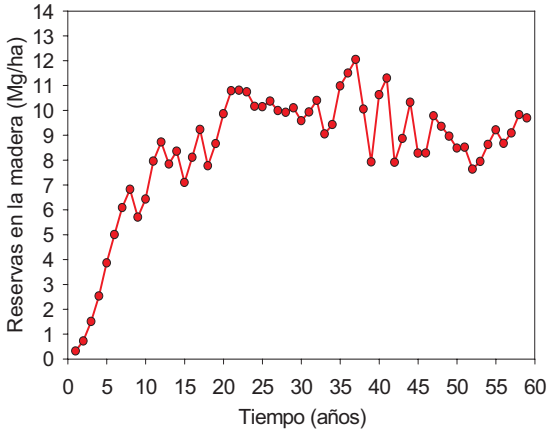


Fig. 9.3. *La movilización de almidón tras el resalveo o tras un incendio o cualquier otra perturbación, debe de ser compensada con el carbono fijado en la fotosíntesis. Cuando se movilizan cantidades importantes, como en el experimento de resalveo que se comenta, el tiempo que tarda el árbol en reponer la reserva puede ser considerable. Durante todo ese tiempo la planta puede resultar más sensible a otras perturbaciones a las que no pueda hacer frente por la falta de reservas de carbono móvil. La recuperación de las diez toneladas movilizadas tras el resalveo, requiere un tiempo aproximado de 20 a 25 años, como muestra la gráfica.*

En la movilización de esta considerable cantidad de carbono de reserva descansa la capacidad de la encina para regenerar las estructuras que se han visto alteradas por una perturbación. Sin embargo, este consumo de la reserva deja temporalmente a la planta en condiciones de cierta precariedad, al impedirle hacer frente a perturbaciones que se presenten con una recurrencia demasiado elevada. Por ello resulta pertinente preguntarse acerca del tiempo que requiere la planta para volver a situar sus reservas a los niveles anteriores al resalveo. La figura 9.3 muestra la evolución del almidón de reserva en la madera de la biomasa subterránea. De la consideración de estos resultados se desprende que el tiempo necesario para acumular los 6.1 Mg/ha movilizados en el resalveo es de unos 20 años. Este resultado coincide con el tiempo que tradicionalmente ha mediado entre dos carboneos sucesivos en el aprovechamiento tradicional de estos encinares, lo que vendría a justificar en términos de la fisiología del árbol una cierta optimización empírica de la explotación tradicional de estos bosques. El aumento de la sequía estival en los ambientes de tipo mediterráneo predicho por los modelos de cambio climático contribuirá a aumentar el consumo de carbohidratos de reserva incrementando a su vez la vulnerabilidad de muchas especies forestales a los episodios adversos (Aussenac y Granier 1988, Ball *et al.* 1987, Brix y Mitchell 1986, Jarvis 1998).

9.3.4. Régimen hídrico del suelo: La Reserva hídrica de los suelos forestales se reducirá dificultando la superación de los episodios de sequía estival

El contenido de agua en un suelo forestal varía ampliamente desde valores muy próximos a cero durante la sequía estival hasta valores máximos durante periodos de pluviosidad más o menos abundante y continua. Según los análisis llevados a cabo sobre las 147 parcelas forestales a las que hemos hecho referencia anteriormente, la reserva hídrica del suelo en los bosques de Cataluña (promediada a lo largo del año) resulta ser de 32 mm. Las simulaciones muestran que el incremento de temperatura y la mayor demanda evaporativa de la atmósfera hacia el año 2040 reducirán este valor promedio anual de la reserva a 24 mm, lo que representa una disminución del 25 por ciento del contenido actual de agua en los suelos forestales (Gracia *et al*. 2001, 2002).

En aquellos enclaves en los que el bosque dispone de agua suficiente para compensar la mayor demanda hídrica asociada al aumento de temperatura y evapotranspiración potencial, se puede prever un aumento de la producción forestal. Ahora bien, en los lugares con déficit hídrico, que son frecuentes entre los ecosistemas forestales de España, se pueden esperar cambios importantes que van desde la reducción de la densidad de árboles hasta cambios en la distribución de las especies. En casos extremos, áreas actualmente ocupadas por bosques pueden ser sustiutídas por matorral y áreas actualmente ocupadas por matorral pueden quedar expuestas a importantes impactos erosivos.

De ahí que resulte importante tratar de anticipar los cambios a los que estamos expuestos y el posible papel de la gestión adaptativa para tratar de reconducir en lo posible, y en todo caso, optimizar la respuesta de nuestros bosques al cambio climático.

9.3.5. Ciclo del carbono: Nuestros bosques se transformarán en emisores netos de carbono en la segunda mitad del presente siglo

Los mapas de la figura 9.4, que representa la producción neta de los ecosistemas forestales europeos y los mapas de las figuras 9.5 y 9.6, referidos a la Península Ibérica, representan un intento de explorar el efecto del cambio climático sobre algunas variables consideradas especialmente sensibles para el ciclo del carbono. Para ello se ha utilizado el modelo GOTILWA+ (Gracia *et al.* 1997, 1999b, 2001, Kramer *et al.* 2002, Mohren 1999, Mohren *et al.* 1997, 2000), habiéndose referenciado los datos a un pixel de 10 minutos x 10 minutos. El clima

de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (Carter *et al.* 2000, IPCC 2001 Watson 2001). Los resultados de la figura 9.5 representan la producción neta del ecosistema en los bosques europeos en los años 1990, 2020, 2050 y 2080. Los resultados son elocuentes y coinciden, a grandes rasgos, con los patrones que predicen otros modelos (Aubinet *et al.* 1998, Ceulemans y Mousseau 1994, Epron y Dreyer 1993a, 1993b, Medlyn y Dewar 1996, Medlyn y Jarvis 1997). A pesar de que, en la Península Ibérica, los bosques pueden aumentar transitoriamente su efecto sumidero durante algunas décadas, hacia la segunda mitad del presente siglo invertirán su papel de sumideros para transformarse en emisores netos de carbono a la atmósfera. En cuanto a la reserva de agua en el suelo, los resultados de la figura 9.6 ponen de manifiesto que, en la Península Ibérica, la reserva de agua en el suelo durante los meses de verano, disminuye progresivamente. La falta de agua en el suelo en la época estival supone un grave riesgo para la supervivencia de algunos bosques.

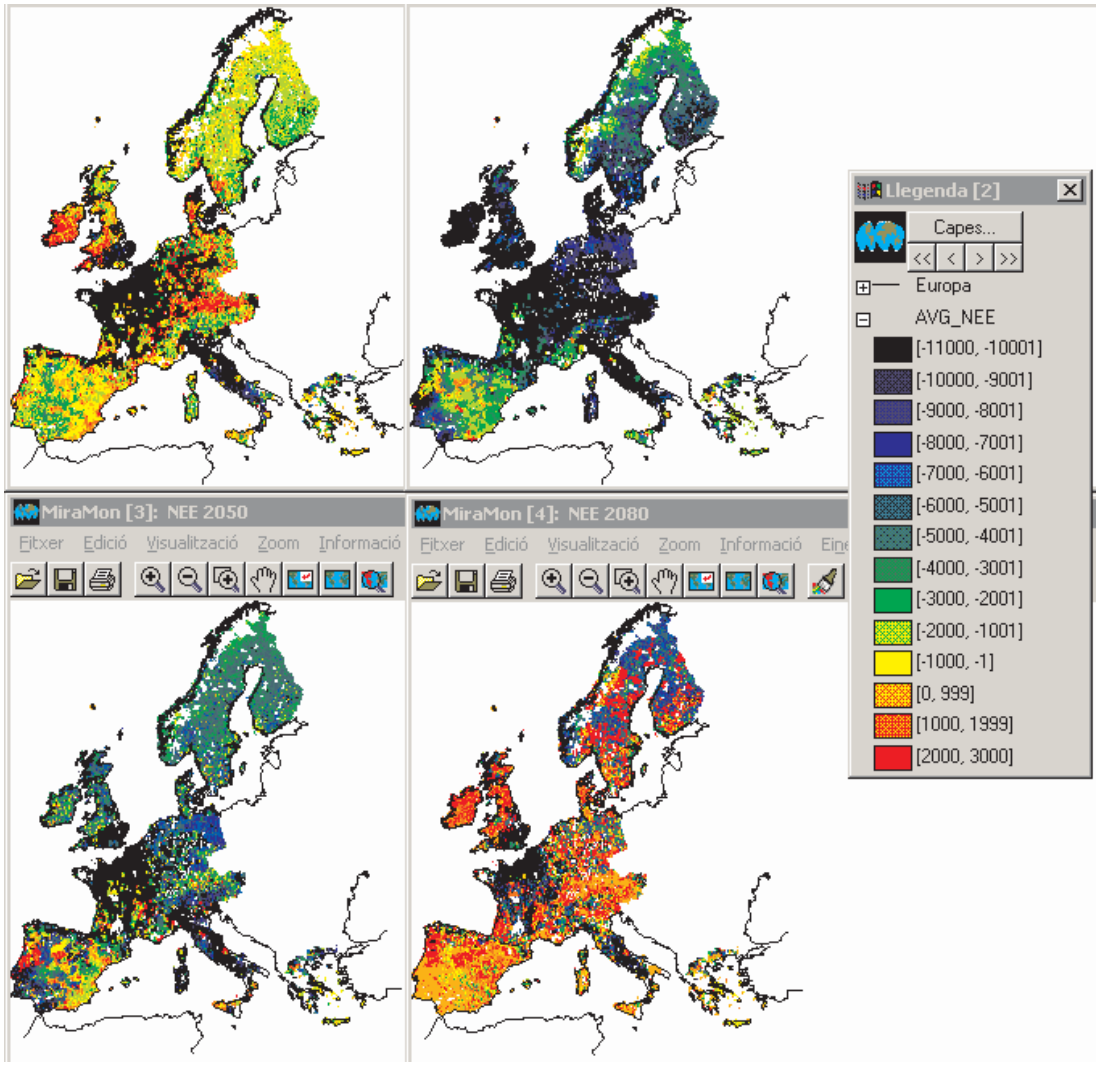


Fig. 9.4. *Estimación de la Producción neta del ecosistema en los bosques europeos. Los mapas representan la situación en los años 1990, 2020, 2050 y 2080 según las simulaciones del modelo GOTILWA+ para el crecimiento de los bosques europeos bajo diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático definidos por el IPCC. Los mapas de la figura se han obtenido utilizando un pixel de 10 minutos x 10 minutos. El clima de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (IPCC 2001). Los resultados ponen de manifiesto que, en la Península Ibérica, los bosques pueden aumentar transitoriamente su efecto sumidero durante algunas décadas pero hacia la segunda mitad del presente siglo los bosques de la Península invertirán su papel de sumideros para transformarse en emisores netos de carbono a la atmósfera.*

9.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Las poblaciones con su límite meridional en las partes altas de los sistemas montañosos serán las más afectadas. En particular si coexisten con especies más termófilas, o si son poseedoras de una variabilidad genética reducida. En general las denominadas procedencias de área restringida, recogidas por Martín *et al.* (1998), tanto por situarse fuera del área principal de distribución, como por los problemas derivados de la deriva genética, o de su susceptibilidad a perturbaciones naturales o debidos a la intervención humana, son más vulnerables. Las amenazas serán determinantes si van ligadas a cambios del régimen de precipitaciones.

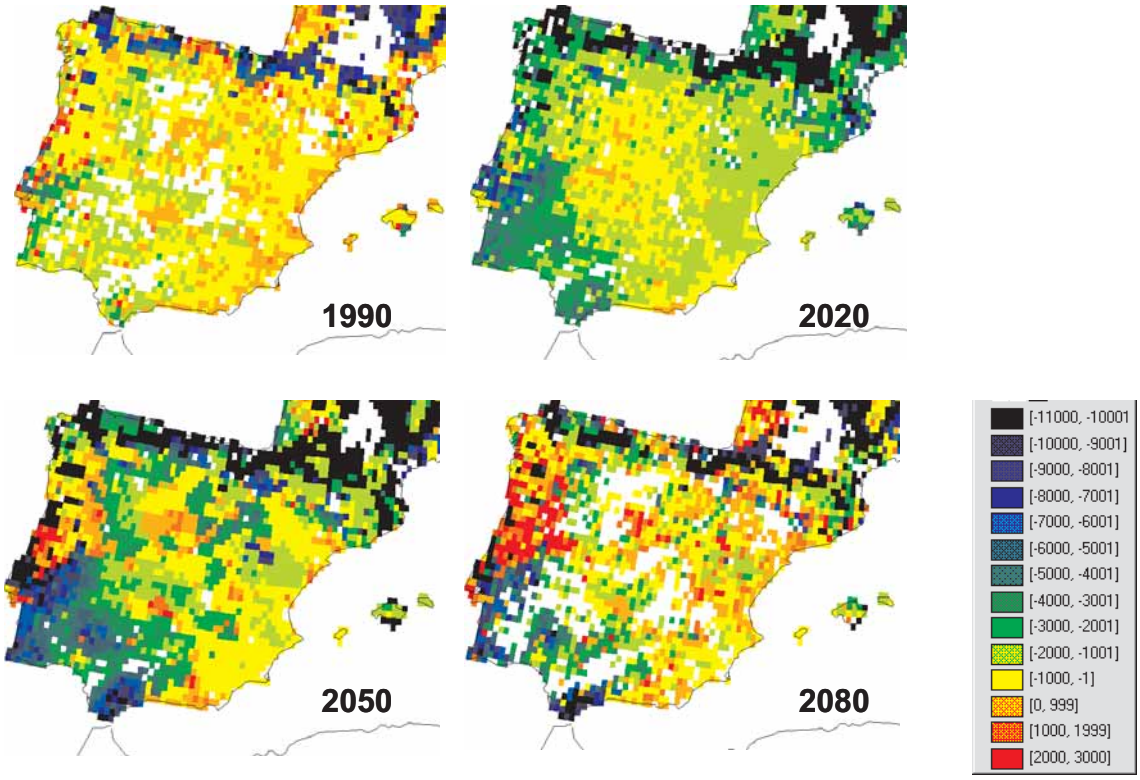


Fig. 9.5. *Estimación de Producción neta del ecosistema en los bosques de la Península Ibérica. Los mapas representan la situación en los años 1990, 2020, 2050 y 2080. En el proyecto ATEAM se está utilizando el modelo GOTILWA+ para simular el crecimiento de los bosques europeos bajo diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático definidos por el IPCC. Los mapas de la figura se han obtenido utilizando un pixel de 10 minutos x 10 minutos. El clima de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (IPCC, 2001). Ver figura 9.11.*

En la Península Ibérica el espacio forestal, no necesariamente arbolado, aparece como un continuo que recorre todos los sistemas orográficos, en general conectados entre ellos por alineaciones de menor entidad. La posibilidad de su funcionamiento como corredores es aceptable en un buen número de situaciones para las especies rústicas, como las coníferas del género *Pinus*. Un incremento de las temperaturas y la irregularidad de lluvias harán menos frecuentes situaciones favorables para el establecimiento y consolidación de la vegetación arbórea. Una menor capacidad de acumular reservas va ligada también a una mayor vulnerabilidad a las perturbaciones (fuegos, plagas, enfermedades), al no poder superar procesos renovadores.

El debilitamiento por falta de adecuación a las nuevas condiciones climáticas ha de dar lugar a una mayor disponibilidad trófica a plagas y enfermedades, que cumplirán su papel

de iniciadores del ciclo de descomposición de la materia orgánica. Si el calentamiento global va ligado a un incremento de la aridez es de esperar una mayor proliferación de insectos, por la mayor sensibilidad de hongos y otros microorganismos a los periodos secos. La falta de vigor de las poblaciones vegetales actuales en un área extensa permitiría incrementos destacados de las poblaciones de patógenos. Las perturbaciones serán aceleradores del cambio de las poblaciones actuales, que serán renovadas por un regenerado más adaptado a la nueva situación o sustituidas por otras especies más termófilas y que soportan mejor la aridez. Tal es el caso de la sustitución de *Pinus pinaster* por *Pinus halepensis* en las montañas del interior valenciano, o la del alcornoque y el quejigo por la encina.

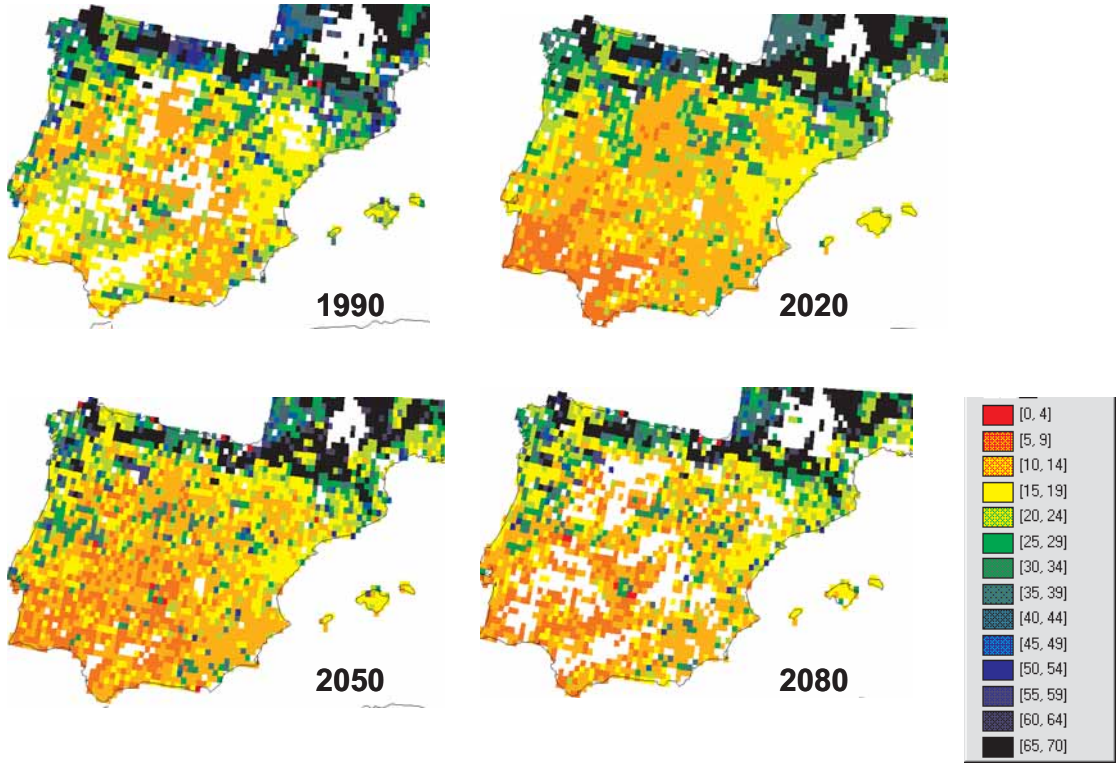


Fig. 9.6. *Estimación de la reserva media de agua en el suelo durante los meses estivales en los bosques de la península Ibérica. Los mapas representan la situación en los años 1990, 2020, 2050 y 2080. En el proyecto ATEAM se está utilizando el modelo GOTILWA+ para simular el crecimiento de los bosques europeos bajo diferentes escenarios socioeconómicos de cambio climático definidos por el IPCC. Los mapas de la figura se han obtenido utilizando un pixel de 10 minutos x 10 minutos. El clima de cada pixel corresponde al estimado por el modelo HadCM3 utilizando el escenario socio-económico A2 (IPCC, 2001). Los resultados ponen de manifiesto que, en la Península Ibérica, la reserva de agua en el suelo disminuye progresivamente. La falta de agua en el suelo durante la época estival supone un grave riesgo para la supervivencia de algunos bosques.*

9.4.1. Zonas de cumbres

Si el área de distribución abarca el último tramo de los sistemas orográficos, sin que exista límite natural del bosque como en la mayoría de las sierras levantinas o las de la mitad sur peninsular, a excepción de Sierra Nevada no es posible el ascenso altitudinal tras un incremento de las temperaturas. Las amenazas se ciernen sobre las escasas manifestaciones de *Abies pinsapo*. También se verán afectadas las poblaciones de *Pinus sylvestris* en la Sierra de Baza, las de *Pinus nigra* en las Sierras Béticas o las de *Pinus uncinata* en la Sierra de Gúdar. En todos estos casos, las poblaciones señaladas poseen efectivos demográficos bastante reducidos, por lo que son más sensibles al cambio y están en peligro de extinción. En

particular, las andaluzas por estar asociados a una baja variabilidad genética, motivada por problemas de deriva genética asociada a la intervención humana histórica.

9.4.2. Ambientes xéricos

El calentamiento global asociado a cambios en el régimen de precipitaciones, puede suponer la desaparición de la vegetación arbolada en los territorios que están en su límite de adaptación a la sequía, dando paso a formaciones de herbáceas cuya aparición está ligada a la presencia de lluvias esporádicas. Un ejemplo con efectos económicos por ser uno de los productos no maderables más típicos del bosque mediterráneo, se encuentra en las poblaciones de *Pinus pinea* de los arenales de la Meseta Norte, pero es extensible a otras localizaciones. Este pino genera una semilla de gran tamaño dispersada por animales frente a las otras especies poseedoras de semilla alada. La variación interanual de la producción provincial de piña en Valladolid durante 40 años muestra el descenso continuado de la media móvil de los últimos 20 años figura 9.7. Esta tendencia se agudiza en los pinares con producciones de piña más reducidas, y que se convierten en incapaces de asegurar la reproducción de la especie (Gordo 2004).

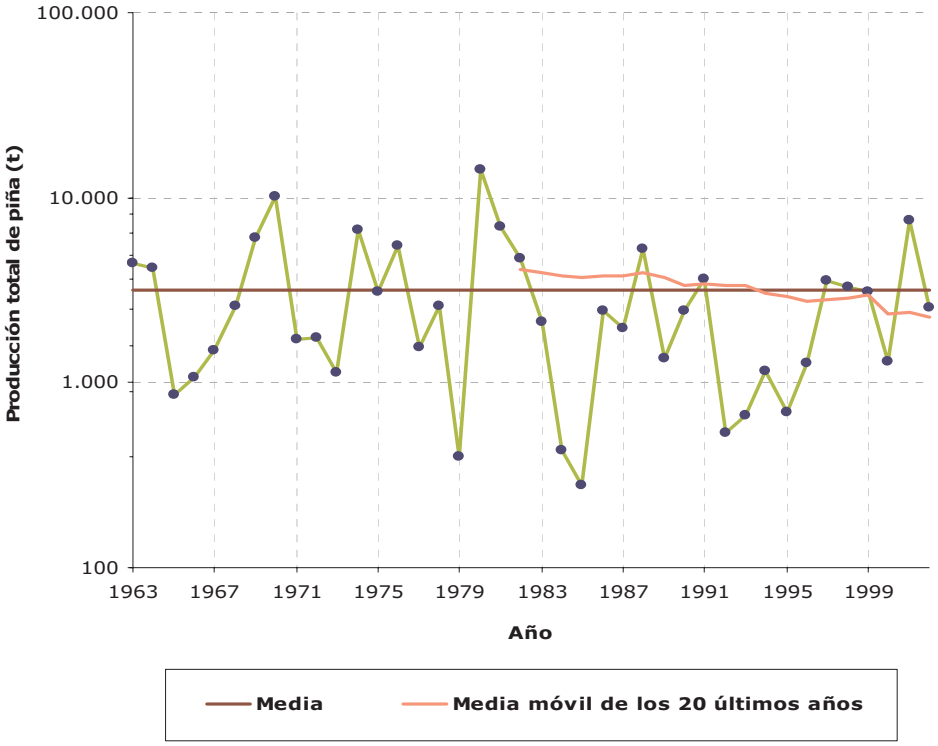


Fig. 9.7. *Irregularidad de las cosechas provinciales de piña (toneladas) de Pinus pinea en montes públicos de la provincia de Valladolid, en la que se observa un descenso continuado de la media móvil de los últimos 20 años. Fuente: Gordo 2004.*

Pese a su adaptación a las zonas más cálidas y con marcada aridez estival, la regeneración natural del pino piñonero está comprometida. Bajo las tendencias climáticas actuales figura 9.8, cada vez será más improbable coincidir una cosecha buena y unas condiciones ambientales favorables en años sucesivos para permitir el establecimiento de las plántulas y su supervivencia en sus primeras edades. Una cosecha buena satura a los predadores que actúan como dispersores y con variabilidad genética suficiente para expresar un potencial adaptativo capaz de superar las nuevas condiciones. La regresión superficial ocurrirá pese a la adaptación a medios muy pobres que exigen bosques muy abiertos. Interpretación que se deduce por ser un pino cuya copa esférica es resultado de su adaptación a condiciones de desarrollo a plena luz, sin competencia lateral por la presencia de otros árboles. Esta

morfología es resultado de la falta de vigor de los meristemas apicales del tallo y de las ramas principales.; pues este hábito de crecimiento permite maximizar el número de ejes codominantes. Sólo ramas de cierto grosor son capaces de sostener conos de 0,3 kg de peso (Mutke *et al.* 2004).

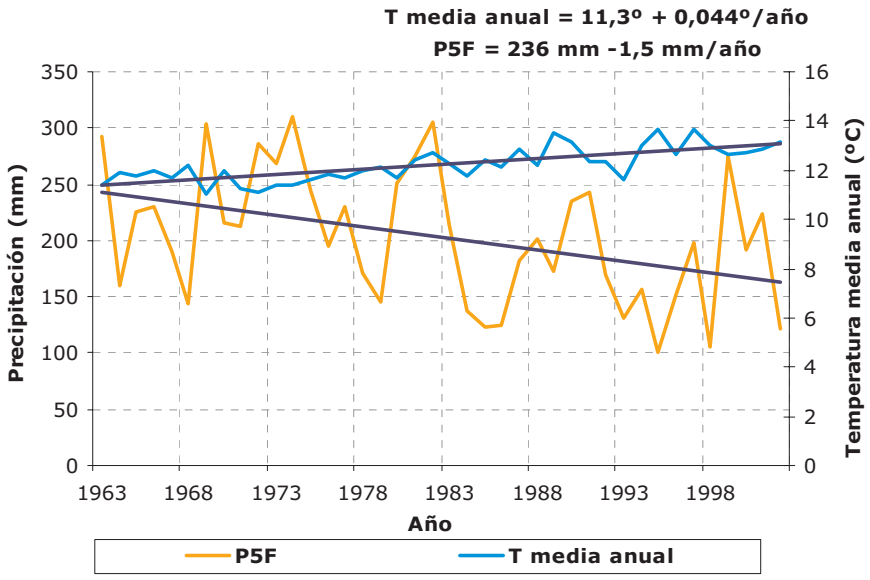


Fig. 9.8. *Evolución de la temperatura media anual y de la precipitación de los cinco meses anteriores a la floración de Pinus pinea L en el observatorio de Valladolid. Fuente: Gordo 2004.*

La disponibilidad de la serie productiva en un área típica de la especie ha permitido conocer los factores que determinan la magnitud de las cosechas; estableciendo un modelo que explica el 75 % de la variación y muestra tendencias significativas hacia un clima más cálido y seco (Gordo 2004). La variable climática más determinante en la importancia de las cosechas se corresponde con la suma de las precipitaciones de enero a mayo (P5F, figura 9.8) del año en que se produce la formación de los estróbilos femeninos y su polinización. Su seguimiento, a partir de los datos del observatorio de Valladolid, muestra una tendencia que reduce la precipitación en este período en 15 mm cada década. Descenso relacionado con la aparición de cosechas más pequeñas, que reducen la base genética del regenerado expuesto a temperaturas estivales mayores. La especie es vulnerable en las localizaciones más áridas de su distribución actual y quedará unida a condiciones ambientales menos extremas, como los enclaves donde exista un freático que asegure un aporte hídrico que permite la constancia en el tamaño de las cosechas.

9.4.3. Bosques de ribera

Los bosques riparios constituyen uno de los sistemas más afectados por la acción humana, que los ha fragmentado de manera drástica y reducido su variabilidad al usar la capacidad clonal de sus especies como forma de reproducción exclusiva en detrimento de la vía sexual. La construcción de embalses, la regulación del curso de los ríos, el establecimiento de escolleras o la transformación de sus márgenes para cultivos agrícolas, o forestales como las choperas, ha fragmentado sus alineaciones y reducido a mínimos sus manifestaciones espontáneas, con la extinción de corredores ecológicos de gran singularidad. Saucedas (*Salix* spp.), alisedas (*Alnus* sp.), pobedas y alamedas (*Populus* spp.), fresnedas (*Fraxinus* spp.), olmedas (*Ulmus* spp.) y tamarizales (*Tamarix* spp.) son formaciones ligadas a la existencia de una capa freática más o menos permanente. Un aumento de las temperaturas medias irá unida a un incremento de la demanda evaporativa, lo que exigirá una mayor regularidad de la capa

freática. Los cambios en el régimen de precipitaciones incrementarán la torrencialidad de nuestros cursos de agua y los hará más irregulares. Un carácter más esporádico de la lámina de agua puede suponer el cambio de la vegetación ribereña y aumentará la vulnerabilidad de la mayoría de los freatófitos. En el caso de las olmedas el peligro de extinción por el cambio global es mayor por la aparición de la grafiosis. Enfermedad que afectó severamente al tamaño de sus poblaciones a finales del siglo pasado. La rápida difusión del hongo estuvo propiciada por la baja diversidad de la especie, tanto en nuestro territorio como en otros países europeos. Su domesticación por el uso extensivo que se hizo en el mundo romano de forma clonal (Gil *et al.* 2004), muestra la necesidad de poseer altos niveles de diversidad genética para poder responder a las perturbaciones. Es obligado tomar medidas que favorezcan la conservación dinámica de nuestras especies para asegurar el mantenimiento de su potencial adaptativo.

9.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

9.5.1. El resalveo de los montes bajos y la conversión a monte alto: un eficaz tratamiento que mejora la respuesta del monte al cambio climático

Una buena parte de las especies forestales mediterráneas son rebrotadoras y algunas, como la encina, desarrollan grandes lignotubers en los que la biomasa subterránea se acumula mientras la aérea se quema o se corta más frecuentemente. Estas diferencias originan una preponderancia de la biomasa subterránea (más del 50 por ciento de la biomasa total) frente a la biomasa aérea (Canadell *et al.* 1997, 1999). Cuando el tratamiento silvícola de estas masas se abandona, el bosque crece muy lentamente dado que la elevada densidad de resalvos de pequeño diámetro conduce a una situación muy próxima al estancamiento (Djema *et al.* 1994, Rodà *et al.* 1999, 2003, Hilbert y Canadell 1995, Sabaté 1993, Sabaté *et al*. 1992, 1994, 1995).

Fig. 9.9. *Parcela experimental resalveada en el encinar de Prades. La reducción de la densidad de pies modifica el balance de agua y de carbono del bosque y ha permitido analizar algunos de los posibles efectos que cambios ambientales análogos inducidos por el cambio climático pueden provocar en los bosques mediterráneos. Más explicación en el texto.*

En experimentos de campo llevados a cabo sobre encinares de las montañas de Prades (Tarragona) se puso de manifiesto que, en estas condiciones, la biomasa acumulada es la responsable de que, durante una parte del año, la respiración sea superior a la producción bruta dando lugar a producciones netas negativas (Albeza *et al*. 1996, Djema 1995). Los árboles superan estas condiciones utilizando para su mantenimiento una fracción del carbono móvil de reserva.

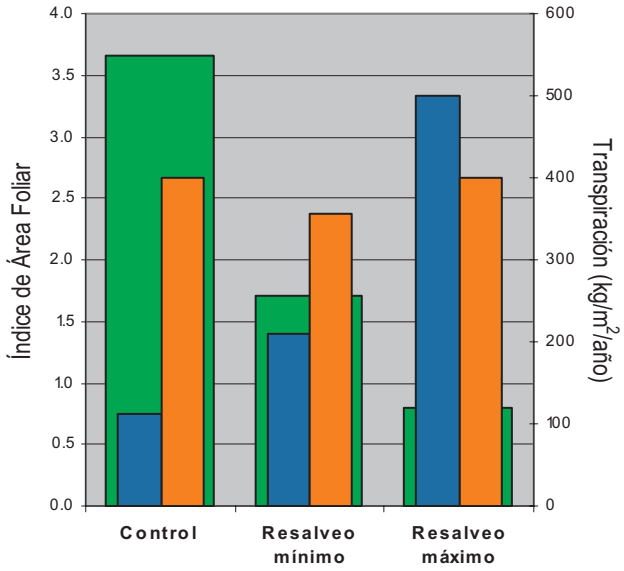


***Fig. 9.10**. La respuesta del encinar de Prades a diferentes intensidades de resalveo (ver figura 9.9) pone de manifiesto el papel primordial del agua en la respuesta del bosque a los cambios estructurales o ambientales y permita anticipar algunas de las respuestas que cabe esperar en el marco del cambio climático. La reducción del índice de área foliar (verde) según la intensidad del resalveo no tiene efecto sobre la tasa de transpiración referida a toda la copa (naranja, kg·m^{-2} de suelo·año^{-1}). La reducción del índice foliar se compensa por un aumento de la tasa de transpiración por unidad de superficie foliar (azul, kg·m^{-2} de hoja·año^{-1}). El resultado, que tiene profundas repercusiones en la fisiología de los árboles, pone de manifiesto la restricción que impone la escasez de agua al crecimiento de los bosques mediterráneos que condiciona todas las respuestas de los bosques mediterráneos al cambio climático.*

Si el periodo desfavorable se prolonga, la reserva puede consumirse hasta su agotamiento provocando primero la destrucción de las raíces finas y defoliación y más tarde la muerte de los árboles. La reducción de la biomasa aérea que supone el resalveo tiene profundas consecuencias sobre los balances de agua y carbono del bosque (Tello *et al.* 1994). La reducción de la superficie foliar mejora considerablemente el estado hídrico de los pies remanentes. La transpiración medida por unidad de suelo fue, en el tratamiento experimental de Prades, de unos 400 kg·m^{-2} ·año^{-1} en todas las parcelas, independientemente de la densidad de árboles, lo que significa que aumenta la tasa de transpiración de los árboles (transpiración por unidad de área foliar) en las parcelas resalveadas lo que reduce las tasas de mortalidad durante los periodos desfavorables.

9.5.2. Gestión adaptativa: cómo optimizar la respuesta de los bosques al cambio climático

El papel de la gestión en el control de la respuesta de los bosques al cambio climático se ha explorado en profundidad en el proyecto SilviStrat. Sucintamente, el proyecto adopta tres escenarios climáticos que se corresponden básicamente a las condiciones actuales y dos escenarios de cambio climático previstas por dos modelos de circulación atmosférica general (ECHAM4 y HadCM2). El crecimiento del bosque se analiza combinando dichos escenarios con un conjunto de escenarios alternativos de gestión. El objetivo es dilucidar el papel de la gestión en el marco de diferentes escenarios climáticos. Para definir los escenarios de gestión se parte en cada región del régimen de gestión que se aplica habitualmente por los gestores. A partir de esta base se aumenta y reduce en una proporción determinada el valor de dos variables: el periodo de tiempo que media entre dos intervenciones y la intensidad de las mismas. Reduciendo el intervalo de corta, se aumenta la frecuencia de los aclareos lo que

supone una mayor intervención sobre el bosque. La intensidad de la intervención se define de acuerdo con la proporción del área basal presente en el bosque en el momento del aclareo que no es cortada. Paralelamente se han analizado los efectos de entresacar los árboles mayores, menores o una combinación de diferentes clases diamétricas.

En el caso de los bosques mediterráneos se han analizado los efectos sobre los encinares de Prades (Tarragona) y Puechabon (Montpellier, Francia) y el pinar de pino albar de Montesquiu (Barcelona). Los resultados que se discuten a continuación analizan el efecto de incrementar o decrementar un 33 por ciento el intervalo de tiempo entre aclareos sucesivos. El intervalo base sobre el que se aplica la variación del 33 por ciento fue, de acuerdo con la opinión de los gestores, de 15 años en el pinar y de 20 en el encinar. Análogamente la intensidad de la corta en cada ocasión, expresada como el porcentaje de área basal de la masa que se extrae, se incrementó y decrementó en un valor del 30 por ciento respecto de las prácticas habituales que son, así mismo específicas para cada especie forestal.

Tabla 9.5. *Carbono en la biomasa aérea (CAB, Mg/ha), carbono en el suelo (CS, Mg/ha), madera extraíada en un periodo de 100 años (Y, Mg/ha) y fracción del agua disponible no utilizada por el bosque (WY, mm/year) en el encinar de PRADES. Las tablas recogen los resultados de cada variable bajo los tres escenarios climáticos explorados en el proyecto SilviStrat en las nueve combinaciones de gestión que se definen en la matriz de gestión. Ref representa las prácticas de gestión actuales, 7 and Δ representan el decremento y el incremento respectivamente de los componentes de gestion (intervalo entre entresacas e intensidad del aclareo) que se discuten en el texto.*

Intensidad de aclareo

Intervalo entre cortas		CRU			ECHAM			HadCM2		
		∇	ref	—	∇	ref	—	∇	ref	—
CAB	∇	34.9	31.0	27.3	39.3	35.3	31.9	38.0	36.0	31.1
	ref	35.5	33.2	29.1	40.7	35.6	32.5	41.7	38.5	34.8
	—	35.2	32.8	30.1	39.5	38.4	33.7	42.7	38.9	35.6
CS	∇	74.2	73.4	73.4	78.9	79.2	77.7	89.2	87.8	81.2
	ref	74.0	73.6	71.5	78.8	81.6	81.6	87.8	86.3	86.9
	—	74.7	75.1	74.7	80.0	77.9	79.4	88.4	90.5	90.0
Y	∇	76.6	102.8	124.4	105.1	126.1	172.6	137.4	149.4	200.4
	ref	71.6	86.9	109.9	92.6	106.6	110.8	118.5	48.3	143.6
	—	62.6	82.1	93.8	79.6	103.4	95.3	120.2	100.6	116.0
WY	∇	170.2	171.5	172.7	149.4	149.6	149.2	182.7	184.0	188.9
	ref	169.8	170.9	173.9	149.0	149.2	148.8	183.0	184.6	183.6
	—	169.7	171.3	170.7	148.4	149.7	148.1	183.1	182.2	182.6

Por lo que concierne a la gestión, se pone de manifiesto que el efecto de retirar más o menos área basal es mucho más importante que el efecto que se deriva de modificar los intervalos entre cortas sucesivas. En los escenarios climáticos futuros (ECHAM4 y HadCM2), aumenta la temperatura y la precipitación media se mantiene aproximadamente constante mientras incrementa su variabilidad. En estos escenarios, los bosques boreales y templados presentan una respuesta positiva: aumenta el carbono acumulado en el suelo, si bien muy ligeramente, del mismo modo que aumenta la producción anual y, por tanto, el carbono acumulado en la biomasa. Sin embargo, en las condiciones mediterráneas, en las que el agua resulta el factor limitante más importante, se producen los efectos contrarios. Del análisis de los resultados se desprende que la respuesta de los bosques al incremento de temperatura depende estrechamente del agua disponible. En aquellas condiciones en las que la evapotranspiración potencial es menor que la precipitación, el incremento de temperatura origina un aumento de la tasa de crecimiento y del carbono almacenado en el sistema. Por el contrario, en aquellos

bosques en los que la evapotranspiración potencial supera a la precipitación, el aumento de temperatura tiende a reducir la cantidad de carbono almacenada en los diferentes compartimentos del bosque.

Tabla 9.6. *Carbono en la biomasa aérea (CAB, Mg/ha), carbono en el suelo (CS, Mg/ha), madera extraíadaen un periodo de 100 años (Y, Mg/ha) y fracción del agua disponible no utilizada por el bosque (WY, mm/year) en el pinar de Pinus sylvestris de Montesquiu (Barcelona). Las tablas recogen los resultados de cada variable bajo los tres escenarios climáticos explorados en el proyecto SilviStrat en las nueve combinaciones de gestión que se definen en la matriz de gestión. Ref representa las prácticas de gestión actuales, ∇ and Δ representan el decremento y el incremento respectivamente de los componentes de gestion (intervalo entre entresacas e intensidad del aclareo) que se discuten en el texto.*

Intensidad de aclareo

Intervalo entre cortas		CRU			ECHAM			HadCM2		
		∇	ref	—	∇	ref	—	∇	ref	—
CAB	∇	64.4	60.1	47.8	51.2	48.8	42.4	60.8	58.6	48.1
	ref	67.9	61.4	51.0	54.3	51.5	43.3	64.7	58.5	50.1
	—	70.0	63.8	55.3	57.6	52.9	51.5	65.3	61.5	53.1
CS	∇	47.7	46.7	46.3	43.4	43.0	41.7	51.3	50.3	48.4
	ref	47.4	47.2	46.3	42.9	42.5	41.5	50.6	50.0	48.4
	—	47.6	46.9	46.1	42.5	43.2	41.0	51.2	51.1	49.4
Y	∇	188.7	244.7	298.9	10.3	69.2	145.5	112.2	159.0	342.8
	ref	158.7	192.7	268.3	0.0	22.0	142.4	75.9	166.4	248.1
	—	105.1	191.6	237.6	0.4	0.0	121.4	36.7	11.7	115.9
WY	∇	449.3	450.8	454.9	348.8	349.9	352.6	364.3	366.7	369.2
	ref	448.1	449.8	453.7	350.5	351.6	354.2	365.8	366.4	369.8
	—	447.3	450.9	453.0	350.4	349.8	352.8	365.9	366.9	370.5

Las figuras 9.11 y 9.12 resumen los resultados obtenidos al analizar 7 especies diferentes en 17 localidades de toda Europa. El crecimiento se ha simulado bajo los tres escenarios climáticos y aplicando todos los casos de la matriz de gestión ya descritos. La gestión de base corresponde a la gestión actual de modo que, en cada caso particular, se reproduce la práctica habitual. Al aumentar la intensidad de corta y/o decrecer el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (1 a 4) y, por el contrario, decrementando la intensidad de corta y/o incrementando el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (6 a 9). Un análisis conjunto de la capacidad de las técnicas de gestión forestal para modificar la respuesta de los bosques europeos al cambio climático, llevada a cabo en el marco del proyecto SilviStrat, pone de manifiesto que las diferentes alternativas de gestión apenas tienen efecto cuando se aplican a bosques europeos que se localizan en condiciones de crecimiento restrictivas, representadas por las localidades mediterráneas en un extremo, limitadas por falta de agua, y los bosques boreales, limitados por las bajas temperaturas (figura 9.12).

9.5.3. Otras opciones adaptativas

Que la madera sea prácticamente en un 50 por ciento de su composición carbono, evidencia la facilidad de su secuestro mediante su acumulación en los árboles. Entre las técnicas que lo permiten se encuentran las que mejoran la productividad de la estación, como puede ser el control de la capa freática, y su recuperación cuando haya descendido por un uso agronómico. El alargamiento de los turnos de aprovechamiento, en particular de las especies con rotaciones cortas como chopos, eucaliptos o pino radiata, permitiría lograr incrementos destacados por

sus periodos muy reducidos que contrastan con los de las especies ibéricas; pues estos árboles suponen el mayor porcentaje de la madera que se corta anualmente. Una actuación similar sería el establecimiento de reservas forestales con las coníferas ibéricas de montaña como *Pinus sylvestris*, en la actualidad con edades de corta muy inferiores en relación a su longevidad natural. Bien al contrario, las mismas alternativas de gestión aplicadas a los bosques centroeuropeos se traducen en respuestas mucho más diferenciadas.

Mediante el empleo de la mejora genética se debe promocionar en las especies más productivas el uso de material forestal de reproducción selecto, como pueden ser genotipos, procedencias o especies más eficaces en la formación de madera. Asimismo, en otras especies arbóreas, se debería considerar la utilización de un material con sus patrones de almacenamiento de carbono alterados hacia una localización en los sistemas radicales; por ejemplo, el uso de *Quercus pyrenaica*, dada su capacidad de rebrotar de raíz, supone una adaptación que permite incrementar biomasa subterránea.

La recuperación de la gran extensión de terrenos degradados y desarbolados, mediante la repoblación forestal, constituye una actuación prioritaria. Para ello, se han de elegir las especies y procedencias adecuadas a los objetivos de la repoblación. Frente a la "matorralización" de los sistemas forestales, la implantación de árboles rústicos y heliófilos permite una estratificación horizontal, que alcanza las mayores acumulaciones de biomasa. La mejora respecto de la situación de partida exige la aplicación posterior de técnicas selvícolas que controlen la densidad del rodal y se prevengan perturbaciones catastróficas como incendios forestales, plagas y enfermedades. Actuaciones extensibles a las masas ya creadas.

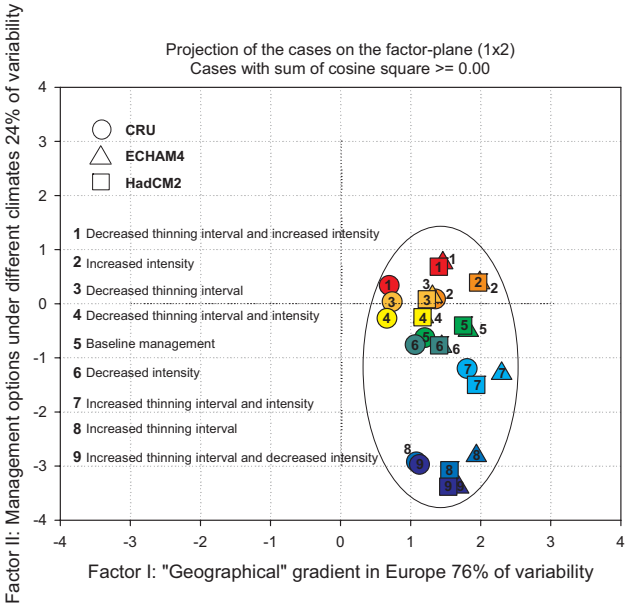


Fig. 9.11. *Ejemplo de un conjunto completo de simulacines del hayedo de Fabrikschleichach en Alemania. La gestión de base corresponde a la gestión actual de modo que, en cada caso particular, se reproduce la práctica habitual. Al aumentar la intensidad de corta y/o decrecer el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (1 a 4) y, por el contrario, decrementando la intensidad de corta y/o incrementando el intervalo de corta conduce a estrategias de gestión más severas (6 a 9). Estas estrategias de gestión se explóran bajo tres escenarios climáticos diferentes: CRU, ECHAM4 y HadCM2.*

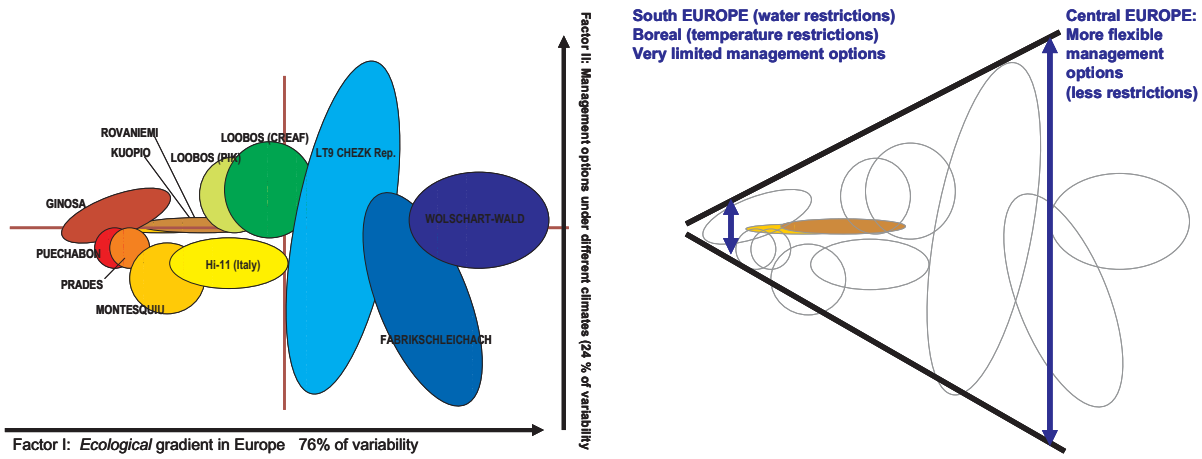


***Fig. 9.12**. Un análisis conjunto de la capacidad de las técnicas de gestión forestal para modificar la respuesta de los bosques europeos al cambio climático, llevada a cabo en el marco del proyecto SilviStrat, pone de manifiesto que las diferentes alternativas de gestión apenas tienen efecto cuando se aplican a bosques europeos que se localizan en condiciones de crecimiento restrictivas (representadas por las localidades mediterráneas en un extremo, limitadas por falta de agua, y los bosques boreales , limitados por las bajas temperaturas. Bien al contrario, las mismas alternativas de gestión aplicadas a los bosques centroeuropeos se traducen en respuestas mucho más diferenciadas.*

Finalmente, el uso de la madera como material base de productos manufacturados o para su empleo estructural en la construcción civil, constituye otra más de las opciones para reducir los efectos del cambio climático. Las maderas con duramen o las enteadas en el caso de los pinos, en particular *Pinus canariensis*, deben ser promovidas por proporcionar productos con ciclos de vida de gran durabilidad y de calidad estética elevada. Adicionalmente, en su proceso de fabricación, la madera además de ser un producto natural renovable, consume menos energía que otros materiales como ladrillos, cristal, acero, aluminio, o plástico. En este sentido destaca la promoción del empleo del corcho frente a alternativas cada vez mayoritarias de derivados plásticos.

9.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

El Sector Forestal como generador de bienes y de riqueza ambiental influye en las industrias ligadas con sus producciones comerciales. Las funciones ecológicas, recreativas y paisajísticas ligadas a estos sistemas, y relacionadas con el ocio de las sociedades urbanas y el turismo rural, no sufrirán cambios significativos cuya valoración sea sencilla. El paisaje es un concepto subjetivo y el que hoy observamos es un producto de nuestra cultura.

9.6.1. Industrias de la madera

Ester sector abastece a varios sectores industriales como las de aserrado, tableros, pasta y papel y mueble. El aserrado, por su carácter local, podrá ser el más afectado. En particular el que depende de las especies ibéricas de montaña, como el pino silvestre (*Pinus sylvestris*) o el haya (*Fagus sylvatica*), cuyos aprovechamientos son en la actualidad importantes. En el resto de sectores, la materia prima que se consume procede en un porcentaje muy elevado de las especies de crecimiento rápido, localizadas en la Cornisa Cantábrica o en plantaciones clonales situadas en zonas con aportes suplementarios de agua. Un déficit de estos productos

sería superado por las importaciones dada la escasa valoración en pie de estos productos y el importante valor añadido que se consigue en el proceso de transformación.

9.6.2. Efectos sobre la caza

La actividad cinegética resulta hoy día esencial en la socioeconomía de gran parte del país. Como las especies principales son animales herbívoros, no parece que a nivel global el conjunto de este sector se vea muy afectado por el cambio climático, pero sí son de esperar cambios de cierta entidad en el comportamiento y distribución de numerosas especies objeto de caza, con las consiguientes repercusiones a nivel regional.

En concreto, las influencias atribuibles al cambo climático, a su vez, pueden producirse a consecuencia de varios procesos diferentes:

- Cambio en las áreas de distribución de las especies objeto de caza, en función de sus demandas ecológicas directas.
- Cambio en las áreas de distribución de las especies objeto de caza, en función del cambio operado en la estructura de los ecosistemas en que habitan.
- Cambio en la etología de las especies objeto de caza, especialmente en el caso de las migradoras.

El primero de los factores citados operaría de forma directa en base a las disponibilidades hídricas y a los regímenes térmicos, motivando en líneas generales una expansión de las especies más ligadas a ámbitos mediterráneos (por ejemplo, la perdiz moruna) a costa de las ligadas a ámbitos atlánticos (por ejemplo, la perdiz pardilla). De forma local, especialmente con grupos animales “en límite de área”, esto puede llevar a la desaparición de determinadas piezas de la zona, afectando de forma determinante a la biodiversidad por extinción de subespecies o variedades, como pudiera ser el caso del corzo en los montes de alcornocal de las serranías subbéticas.

Otro rango de influencias puede venir de los cambios previsibles en la estructura de los ecosistemas en que habitan las piezas objeto de caza. En los últimos decenios, el abandono general de las prácticas propias del sistema agrario tradicional, traducido en incremento de masas arboladas en detrimento de áreas de pastizal-matorral, está deparando un incremento notable de las especies de caza mayor, frente a una rarefacción acusada de las de caza menor, salvo en las áreas de actividad agrícola intensa. Las limitaciones que el nuevo régimen climático puede imponer a la recuperación de espacios abiertos por parte del arbolado o a la consecución de doseles arbóreos cerrados en algunas áreas mediterráneas, puede contribuir a paliar o invertir esta tendencia, favoreciendo a las especies de caza menor ligadas a estructuras abiertas.

El último de los niveles de cambio hace referencia a los cambios operados por la variación climática general en los regímenes migratorios de numerosas especies. Algunas aves que apenas pasaban tres meses en verano en nuestra Península, como tórtolas o codornices, irán incrementando progresivamente su periodo de estancia, llegando a permanecer como estantes en algunas áreas más templadas, como se ha constatado ya para la codorniz en algunos enclaves andaluces. Por el contrario, es posible que se asista a una disminución de efectivos en las migratorias estivales ligadas a zonas húmedas, a consecuencia de la rarefacción de éstas. En cuanto a las migratorias invernantes, igualmente se debería asistir a una modificación a la baja, aunque de modo fuertemente condicionado a los cambios climáticos esperables en sus países de procedencia. Por último, son de esperar cambios difícilmente predecibles en las pautas migratorias generales, como el abandono de los pasos tradicionales de palomas en el Pirineo e Ibérico Norte, probablemente atribuible a la frecuencia de borrascas otoñales precoces en dichas áreas.

9.6.3. Efectos sobre la actividad micológica

Los cambios esperables en las actividades relacionadas con la recogida de setas irán también ligados a los cambios directos de los regímenes térmicos e hídricos y a los cambios operados en los ecosistemas forestales en que se desarrollan. Parece previsible que el efecto más inmediato provenga de las variaciones de las disponibilidades hídricas en la época otoñal, lo que reduciría el área vital de numerosas especies asociadas a otoños lluviosos. Sin embargo, no es de menospreciar el posible efecto de los regímenes térmicos, en especial a causa de la irregularidad de los mismos: los fríos extemporáneos y bruscos del inicio del otoño están limitando el periodo de fructificación en gran parte del norte de especies tan apreciadas como la *Amanita cesarea*, mientras que las fases calurosas en otoño, invierno y primavera favorecen una rápida descomposición de muchos de los cuerpos generados y rápidas colonizaciones por parte de parásitos que deprecian el producto. En general, si los cambios se producen de forma suficientemente gradual y si existe una cierta continuidad de las masas arboladas, es previsible una migración hacia el norte o en altitud de los principales grupos, en busca de condiciones más semejantes a las que existen actualmente en sus áreas de distribución.

9.6.4. Efectos sobre el sector corchero

Las influencias en éste campo pueden resultar variables a su vez en función de los aspectos considerados:

- Distribución y estado de las masas de alcornocal.
- Repercusiones en el proceso de aprovechamiento.
- Características comerciales del producto.

La mayor influencia ha de venir motivada por el primero de estos puntos, en concreto por la posible reducción de la superficie de alcornocal existente, que reduciría drásticamente las existencias comercializables del producto. No es posible ignorar las mortandades de alcornoques que en su día, hacia 1995, se atribuyeron al episodio complejo de “la seca”, pero que han seguido actuando con inusitada virulencia durante todos estos años en algunas áreas de alcornocal de Cádiz, deparando la muerte de laderas enteras. Además de esta influencia cabe destacar la posible reducción de la época de aprovechamiento condicionada por las últimas lluvias de primavera y por la aparición del parón vegetativo estival. Finalmente, la tendencia del producto en mercado será la de una disminución general de los calibres disponibles, lo que puede suponer en algunas zonas un alargamiento de los turnos.

9.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

El conjunto de resultados que hemos comentado, ponen de manifiesto algunas posibles consecuencias adversas del cambio climático sobre los ecosistemas forestales. Evidentemente existe un grado de incertidumbre considerable asociado a los complejos análisis que se requieren para explorar los efectos de un cambio complejo en sí mismo, del que aún no conocemos los detalles, sobre sistemas tan complejos a su vez como son los ecosistemas forestales cuya biología es el resultado de las interacciones de un elevado conjunto de procesos.

Necesitamos herramientas que nos ayuden a refinar los análisis y, en este sentido, las administraciones implicadas deberían dedicar un esfuerzo especial a la recopilación y puesta a punto de las bases de datos necesarias. Un ejemplo paradigmático lo constituye la falta de información sobre la biomasa subterránea de nuestros bosques. Hemos visto que, en algunos casos, esta biomasa es, superior a la biomasa aérea y, por tanto, su contribución a los balances de carbono es primordial. Sin embargo apenas se dispone de información sobre la

biomasa del compartimento subterráneo de nuestros bosques y mucho menos sobre su dinámica. Pero, en contra de lo que sería deseable, la posibilidad de que sea financiado un proyecto de investigación competitivo dedicado a cuantificar extensivamente la biomasa subterránea de los bosques es remota.

Otro ejemplo de necesidades no cubiertas lo constituyen los inventarios forestales. El diseño tradicional de los inventarios forestales nacionales dedicados tradicionalmente a cuantificar las *existencias de volumen maderable*, sin considerar el papel de los restantes componentes (hojas, ramas, corteza, raíces gruesas, raíces finas) que de modo grotesco se han calificado de la "basura del bosque" por algunos técnicos desinformados, deben de dejar paso a diseños basados en una concepción más moderna del bosque como ecosistema en el que la producción de madera va dejando paso, en algunos casos, a otros servicios alternativos como el efecto ampliamente comentado de sumidero de carbono, aunque solo sea temporalmente.

9.7.1. Los Factores de expansión de la biomasa

A la hora de realizar los inventarios nacionales de carbono acumulado en los bosques se pone de manifiesto la necesidad de disponer de valores de los llamados factores de expansión de la biomasa.

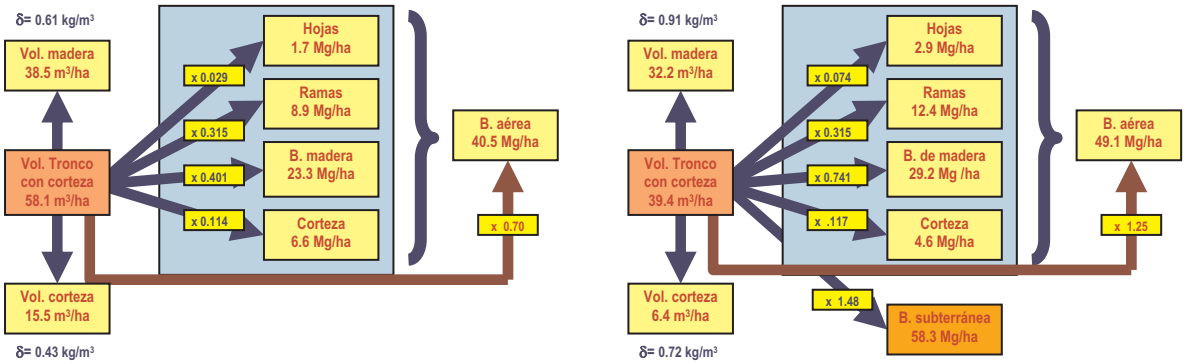


Fig. 9.13. *Componentes de los factores de expansión de la biomasa en dos especies: Quercus ilex (izquierda) y Pinus halepensis (derecha). Los datos se basan en el análisis de 1666 parcelas de encinar y 2045 parcelas de pino carrasco. La variable más frecuente en los inventarios forestales es el volumen del tronco con corteza y sus dos componentes: el volumen de madera y el volumen de corteza. Las densidades específicas de madera y corteza permiten calcular su biomasa. La biomasa de los restantes componentes del árbol se puede obtener multiplicando el volumen del tronco por los factores correspondientes de cada fracción. Multiplicando el volumen del tronco con corteza por el factor 1.25 de la encina (ó 0.70 del pino carrasco) se puede estimar la biomasa total aérea del árbol que es la base de la estimación del carbono.*

Dado que la mayor parte de los inventarios forestales se orientan principalmente a la determinación del volúmen o biomasa del tronco, para extender estas medidas a la determinación de otros componentes importantes del balance de carbono del bosque tales como raíces, ramas, hojas, hojarasca o carbono presente en el suelo, se han adoptado los llamados factores de expansión de la biomasa (BEF). Con frecuencia los valores que se utilizan en el momento actual suponen una nueva fuente de incertidumbre y de posibles errores ya que desgraciadamente, las bases de datos conteniendo medidas extensivas de los componentes del árbol antes mencionados son muy limitadas (FAO 2000, 2001). Más allá de este problema, la conversión de los datos de biomasa a valores de carbono también requiere atención ya que

la proporción de carbono puede diferir entre diferentes componentes del árbol o diferentes especies.

El detalle con que se han muestreado las 10644 parcelas del Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña (IEFC) (Gracia *et al.,* 1992, 2000) ha proporcionado información acerca de la biomasa de los diferentes componentes de los árboles de las 95 especies muestreadas. La base de datos resultante representa la imagen más completa existente de los bosques de la región mediterránea en sus más de dos millones de registros. Se puede consultar en http://www.creaf.uab.es/iefc.

A partir de esta base de datos se han determinado los factores de expansión de la biomasa de las principales especies. La figura 9.13 resume los valores de cada uno de los componentes que intervienen en la determinación de los factores de expansión de la biomasa en el caso de la encina y el pino carrasco. Una estimación del valor del factor de expansión de la biomasa aérea (ABEF) de las principales especies de la península se puede consultar en Sabaté *et al.* (enviado).

9.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

9.8.1. Las Plagas como bioindicadores de variaciones climáticas

La presencia de plagas y enfermedades endémicas está íntimamente asociada a ciertas formaciones forestales: defoliadores de quercíneas como *Tortrix viridana* están asociadas al género *Quercus*, y su eclosión suele coincidir con el desarrollo de las yemas primaverales en las especies hospedantes. La modificación del ciclo fenológico anual de la planta puede incidir en la presencia y abundancia de esta especie, y en su concurrencia y competencia con otros defoliadores respecto a los que su ciclo biológico está ligeramente adelantado, como *Lymantria dispar* o *Catocala* sp.

Del mismo modo algunos insectos perforadores (especies del género *Ips* en coníferas) necesitan el mantenimiento de ciertos niveles de humedad en la madera decrépita donde se desarrollan sus galerías larvarias y de alimentación. La rápida desecación del material vegetal inhabilita su detección por parte de los imagos, que ven reducido su posibilidad de desarrollo.

9.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

9.9.1. Gestión selvícola basada en el fomento de la diversidad intra e interespecífica

En términos generales la selvicultura se ha identificado tradicionalmente con la actividad que tiene por objeto el establecimiento, la conservación y el aprovechamiento económico de los montes. La cuestión, por tanto, puede parecer hoy poco importante desde el punto de vista ambiental, pero el objetivo actual de la selvicultura, sin renunciar al aprovechamiento económico, reside en la necesidad de la intervención por parte del hombre para mantener o restablecer la eficacia funcional de los sistemas forestales actuales – bosques intervenidos.
Según la teoría del bosque permanente es el bosque el que debe marcar al forestal su nivel de intervención y no al contrario. Es decir, los fines del hombre no deben prevalecer sobre las exigencias del bosque. Esta forma de entender el bosque y la selvicultura consideran al monte como sujeto del aprovechamiento selvícola y no como objeto del mismo.

Por otra parte, la consideración que se debe al bosque como espacio de utilidad pública, por el insustituible papel de productor de bienes y servicios de interés público, no es condición suficiente para postular el abandono, la no intervención o el no uso. Si por un lado es necesario anteponer los intereses a largo plazo a los más inmediatos y comerciales, es también verdad que la persistente y preconcebida hostilidad hacia la aplicación de la selvicultura como principal

actividad de gestión del bosque, preconizando el no uso como forma más eficaz de conservación, no tiene razón de ser, porque además de no sustentarse en argumentos científicamente coherentes y conformes a la realidad de los hechos, puede no ser legítima y comprensible en el plano técnico, pues no permite observar al microcosmos forestal tal y como realmente es, distinto a veces a como nos gustaría que fuese.
Es justamente en el engarce entre el mantenimiento y la mejora de la funcionalidad biológica de los sistemas forestales y el aprovechamiento de sus bienes, comerciales o no, donde encuentra su espacio la selvicultura.

Si, como se ha dicho antes, las condiciones ecológicas imponen la intensidad y el tipo de tratamiento selvícola que deben aplicarse a un bosque, se desprende fácilmente que si estas condiciones específicas cambiasen debería producirse también un cambio de la selvicultura aplicada. La idea general es intuitiva y fácilmente asumible, pero en la práctica, las relaciones clima-selvicultura se mueven en un intervalo relativamente amplio y no bien cuantificado. A efectos de la vegetación se produce un cambio climático significativo, cuando las condiciones del clima cambian en cuantía tal que sus efectos producen modificaciones en las estrategias de vida de las especies forestales, pudiendo llegar a modificarse la dinámica y la composición florística del bosque. Es decir, cuando la vegetación existente, adaptada al clima anterior, tiene dificultades para perpetuarse en el nuevo clima.

Los estudios sobre cambio climático son numerosos pero pocos tienen en cuenta la significación fitológica de esos cambios que es el aspecto más interesante cuando se trata de diseñar estrategias para la amortiguación de sus efectos. El conocimiento de la vegetación y el estudio del clima en el pasado permiten identificar las condiciones de partida. Sin embargo, existe un cierto grado de incertidumbre sobre las características del clima final al que ha conducido o podrían estar conduciendo los aparentes cambios actuales.

En general, la tendencia del cambio apunta hacia una mayor aridez como resultado de una elevación de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones. Esta tendencia o cambio, cuando se produce, se considera perjudicial para la vegetación en las zonas con climas mediterráneos áridos o semiáridos. Por el contrario, en zonas donde las variaciones termopluviométricas no tengan efectos limitantes, la vegetación puede verse favorecida y como consecuencia puede producirse un aumento de la productividad e incluso de la diversidad.

9.9.2. Promover las intervenciones selvícolas con capacidad para mitigar el cambio

Durante la última época de sequía, que duró hasta 1994-95, se hicieron numerosas observaciones visuales sobre las masas forestales para intentar establecer relaciones entre el grado de mortalidad de los árboles por sequía y el tratamiento selvícola que se estaba aplicando. En ocasiones puntuales parecían establecerse relaciones de causaefecto, que pocas veces aguantaban una generalización mayor (Fernández y Montero 1993) . Los estudios generalistas que establecen tendencias, en general débiles, entre la densidad de la masa en un momento dado y su comportamiento ante un posible y no bien determinado cambio climático, son indicativas y útiles para orientar futuros comportamientos pero, por supuesto, no garantizan una relación causa-efecto cuantificada, siquiera fuese en un amplio intervalo de densidad de la masa forestal para responder a una oscilación o cambio climático cuantificado en términos similares.

Parece que el cambio climático no implica todavía un cambio de vocaciones biológicas a gran escala (Allué 1995a, b). Sólo en algunos emplazamientos, con climas áridos y semiáridos, pueden estarse produciendo avisos de cambio futuro. En estos casos, podría estar justificado iniciar tratamientos selvícolas tendentes amortiguar los efectos del cambio climático.

Para diseñar acciones selvícolas cuya aplicación pueda estar justificada, es necesario tener evidencias de que se ha producido un cambio de clima, que éste se mantendrá en el futuro y que además se considera incompatible con la existencia de la vegetación actual. Además debemos tener en cuenta, si es posible, la preservación de especies de especial interés, ayudándolas durante un periodo transitorio a acelerar su adaptación, cambiando, por ejemplo, la regeneración vegetativa por la sexual, modificando las densidades en proporción al cambio producido, etc. Si la cuantía, la persistencia y/o la velocidad del cambio no permiten la readaptación de la vegetación a las nuevas condiciones climáticas, la selvicultura por sí sola no podrá amortiguar el proceso de cambio, si no es con la incorporación de grandes aportes de energía, como riegos, fertilizaciones y otras protecciones, tal como se hace en agricultura. En nuestra opinión las técnicas de amortiguación de efectos producidos por este u otro proceso deben tener un horizonte temporal limitado al periodo tiempo que duren esos efectos cuyas causas habrán de ser combatidas por otros procedimientos.

Para finalizar, decir que en nuestra opinión las incertidumbres de futuro pueden ser abordadas, siempre que se mantengan las expectativas de duda. La selvicultura, actuando sobre los sistemas forestales puede ser una herramienta para amortiguar, transitoriamente los efectos del cambio. El aclarado de las masas puede amortiguar el efecto de la sequía durante cortos periodos. Si el cambio persiste, sería necesario aplicar técnicas selvícolas más complejas que incluyan la programación espacio-temporal de las mismas, adaptando las intervenciones a determinados momentos del ciclo vital de las especies que se desea mantener o preservar de los efectos del nuevo clima.

Si el cambio es trascendente y persiste de manera estable en el tiempo, se hará necesario definir una nueva selvicultura adaptada a las nuevas condiciones climáticas y a la nueva dinámica evolutiva de las comunidades vegetales instaladas como consecuencia del cambio. Habrá de aplicarse, como siempre, una selvicultura adecuada a un medio ecológico, que acompaña y ayuda en ocasiones, a la evolución de la vegetación natural y no pretende ningún efecto amortiguador de los factores naturales que afectan sobre ese medio.

9.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

9.10.1. Líneas prioritarias de investigación para el conocimiento del cambio climático y amortiguación de sus efectos en los sistemas forestales

A. Aspectos básicos

- Cuantificación, estructura y dinámica del carbono acumulado en las formaciones boscosas y matorrales. Partes aérea, radical y carbono en el suelo.
- Medición de fotosíntesis y flujo de carbono en sistemas forestales.
- Modelos de simulación del crecimiento de biomasa en sistemas forestales, con especial énfasis en modelos de procesos.
- Balance actual del carbono en los principales sistemas forestales y posible influencia del cambio climático en el mismo. Consecuencias para la gestión forestal.
- Identificación de los principales factores eco-fisiológicos que limitan la regeneración natural de las masas forestales.
- Influencia del cambio climático sobre el desplazamiento de la vegetación y modificaciones de la cubierta vegetal.
- Evaluación de la variación adaptativa entre procedencias.
- Efecto del cambio climático sobre los bosques. Elaboración de indicadores de detección del cambio para la puesta a punto de sistemas de alerta temprana.

B. Aspectos aplicados

- Métodos experimentales de estimación de biomasa aérea y radical de las principales especies forestales, para su valoración rápida como sumideros de carbono. Adaptación al Inventario Forestal Nacional.
- Cuantificación de los factores de expansión de biomasa para las principales especies forestales. Aplicación al Inventario Forestal Nacional.
- Desarrollo de metodologías para la estimación de biomasa en matorrales y sotobosques.
- Optimización de las prácticas de gestión para potenciar la eficiencia de los bosques como sumideros. Selvicultura del carbono.
- Aplicación de técnicas selvícolas para mitigar los efectos del cambio climático sobre las masas forestales.
- Estudio para la sustitución parcial de materiales de construcción obtenidos a partir de procesos altamente contaminantes por otros procedentes de recursos naturales renovables.
- Estimación de la vida media de los diferentes productos forestales y su valoración como almacenes temporales de carbono.
- Posibilidades económicas de aprovechamiento energético de los residuos forestales (restos de corta y otros).
- Desarrollo de técnicas de cultivo y selección de especies y clones destinados a la producción de biomasa para su aprovechamiento energético.
- Técnicas de cultivo agroforestales (cultivos agrícolas intercalados con plantaciones de frondosas) como instrumento para cumplir con el Protocolo de Kioto.
- Estudio de los factores que limitan la utilización de los mecanismos de flexibilidad forestales previstos en el Protocolo de Kioto. Comercio de emisiones, proyectos MDL y de AC. Valoración socioeconómica, metodología y asignación de créditos.

9.10.2. Identificación de futuros proyectos integrados

El Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 incluye líneas prioritarias adicionales en el Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias, a fin de facilitar e impulsar la contribución del Sector Agrario a la reducción de los gases de efecto invernadero.

Estas líneas de investigación deben ser estudiadas conjuntamente por grupos de investigadores y técnicos desde los ministerios de Educación y Ciencia, Medio Ambiente, Agricultura Pesca y Alimentación, Industria y Tecnología, etc. La idea sería definir proyectos conjuntos conservados en su contenido y comprometiéndose en su financiación así la Comunidad Científica trabajará en líneas orientadas a resolver problemas concretos y bien identificadas por los especialistas responsables de políticas económicas y gestión de recursos energéticos.

Las grandes empresas energéticas, o grandes consumidoras de energía deben de participar necesariamente con la ccomunidad científica y con las Administraciones implicadas.

9.11. BIBLIOGRAFIA

Albeza E., Sabaté S. y Gracia C.A. 1996. A long term thinning experiment on a *Quercus ilex* forest. In Ecosystem Manipulation Experiments. En: Jenkins A., Ferrier R.C. y Kirby C. (eds.). Ecosystems Research Report nº 20. ECSC-EC-EAEC. Pgs. 200-208.

Allué, J.L. 1995a. El cambio climático y los montes españoles. Cuadernos de la S.E.C.F. nº2, 35-64.

Allué, J.L. 1995b. Naturaleza, efectos y amortiguamientos del cambio climático en los montes españoles. Montes nº 40, 21-28.

Anónimo 2000. Estrategia Forestal de España. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Anónimo 2003. Plan Forestal Español. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Anónimo 2004. Inventario de Gases de Efecto Invernadero: Informe de España 1990-2002. Dirección General de Calidad Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.

ASEMFO (Asociación Nacional De Empresas Forestales). 2002. III Estudio de Inversión y Empleo en el Sector Forestal.

Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik Ü., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer Ch., Clement R., Elbers J., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R. y Vesala T. 1998. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. Advances in Ecological Research 30: 113-175.

Aussenac G. y Granier A. 1988. Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research 18: 100-105.

Aussenac G. y Vallette J.C. 1982. Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manettl, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Will. et de divers pins dans le Mont Ventoux. Annales des Sciences Forestieres 39: 41-62.

Ball J.T., Woodrow I.E. y Berry J.A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. En: Binggins I.J. (ed.). Progress in photosynthesis research. Vol IV 5, Martinus Nijhoff, Dordrecht, Netherlands. Pgs. 221-224.

Breda N., Granier A. y Aussenac G. 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Tree Physioloy 15: 295-306.

Brix H. y Mitchell A K 1986 Thinning and nitrogen fertilisation effects on soil and tree water stress in a Douglas-fir stand. Canadian Journal of Forest Research 16: 1334-1338.

Canadell J. y López-Soria L. 1997. Lignotuber reserves support regrowth following clipping of two Mediterranean shrubs. Functional Ecology 12(1): 31-38.

Canadell J., Djema A., López B., Lloret F., Sabaté S., Siscart D. y Gracia C.A. 1999. Structure and dynamics of the root system. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer, Berlin. Pgs. 48-59.

Carter T.R., Hulme M., Crossley J.F., Malyshev S., New M.G., Schlesinger M.E. y Tuomenvirta H. 2000. Climate Change in the 21st Century. Interim Characterizations based on the new IPCC Emissions Scenarios. Finnish Environment Institute.

Ceulemans R. y Mousseau M. 1994. Tansley Review No. 71. Effects of elevated atmospheric CO_2 on woody plants. New Phytologist 127: 425-446.

Djema A., López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 1994. A Long-Term Thinning Experiment on a *Quercus ilex* L. Forest: Changes in root biomass and nutrient contents. Noticiero de Biología 2(3):21, Santiago de Chile, Chile.

Djema A. 1995 Cuantificación de la biomasa y mineralomasa subterránea de un bosque de *Quercus ilex* L. Master Thesis. Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza, Zaragoza.

Epron D. y Dreyer E. 1993a. Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petrea* (Matt.) Liebl.) and *Quercus robur* L.] in a natural stand. New Phytologist 125: 381-389.

Epron D. y Dreyer E. 1993b. Photosynthesis of oak leaves under water stress: maintenance of high photochemical efficiency of photosystem II and occurrence of non-uniform CO_2 assimilation. Tree Physiology 13: 107-117.

FAO. 2000. Forest Resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate/boreal countries), UN-ECE/FAO Contribution to the Global Forest Resources Assessment 2000, Main Report. United Nations, New York and Geneve. 445 pgs.

FAO. 2001. State of The World's Forests 2001. FAO, Rome. 159 pgs.

Fankhauser R. 1994. The social cost of greenhouse gas emisions: an expected value approach. The Energy Journal 152: 157-184.

Fernández, J.A. y Montero, G.1993. La seca de *Quercus* en Extremadura y La Mancha. Montes 32: 32-36.

Gil L., Fuentes-Utrilla P., Soto A., Cervera M.T. y Collada C. 2004. English elm (*Ulmus procera*) is a 2000-year-old Roman clone. Nature 431: 1035.

Gordo Alonso J. 2004. Selección de grandes productores de frutos de *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte. Tesis Doctoral ETS Ingenieros de Montes, UPM. Madrid. 153 pgs.

Gracia C.A., Abril M., Barrantes O., Burriel J.A., Ibàñez J.J., Serrano M.M. y Vayreda, J., 1992. Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Mètodes. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, Generalitat de Catalunya, Barcelona. 104 pgs.

Gracia C.A., Sabaté S., Albeza E., Djema A., Tello E. Martínez J.M., López B., León B. y Bellot J. 1994. Análisis de la respuesta de *Quercus ilex* L. a tratamientos de aclareo selectivo: Producción, biomasa y tasa de renovación de hojas y raíces durante el primer año de tratamiento. Reunión de coordinación del Program de restauración de la cubierta Vegetal de la Comunidad Valencia. Alicante.

Gracia C.A., Bellot J., Sabaté S., Albeza E., Djema A., León B., López B., Martínez J.M., Ruíz I. y Tello E. 1996. Anàlisis de la Respuesta de *Quercus ilex* L. a tratamientos de aclareo selectivo. En: Restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. Fundación CEAM. Pgs. 547-601.

Gracia C.A., Sabaté S. y Tello E. 1997. Modelling the response to climate change of Mediterranean forest managed at different thinning intensities: effects on growth and water fluxes. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Pgs. 243-252.

Gracia C.A., Sabaté S., Martínez J.M. y Albeza E. 1999a. Functional responses to thinning. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer, Berlin. pgs. 329-338.

Gracia C., Tello E., Sabaté S. y Bellot J. 1999b. GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer, Berlin. pgs. 163-180.

Gracia C.A., Burriel J.A, Mata T. y Vayreda J. 2000, Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Centre de Recerca Ecológica i Aplicacions Forestals. 9 volúmenes.

Gracia C.A., Sabaté S., López B. y Sánchez A. 2001. Presente y futuro del bosque mediterráneo: balance de carbono, gestión forestal y cambio global. En: Zamora R. y Pugnaire F. (eds.). Ecosistemas mediterráneos: Análisis funcional. CSIC y AEET. Pgs. 351-372.

Gracia C.A., Sabaté S. y Sánchez A. 2002. El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. Ecosistemas 2. http://www. aeet.org/ecosistemas /022/investigacion 4.htm.

Hilbert D.W. y Canadell J. 1995. Biomass partitioning and resource allocation of plants from Mediterranean-type ecosystems: possible responses to elevated atmospheric CO_2. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (eds.). Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems. Springer, Berlin. Pgs. 76-101.

IPCC 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press. 994 pgs.

Jarvis P.G. (ed.). 1998 European Forests and Global Change: The likely impacts of Rising CO_2 and temperature. Cambridge University Press. Cambridge. 380 pgs.

Kramer K., Leinonen I., Bartelink H.H., Berbigier P., Borghetti M., Bernhofer Ch., Cienciala E., Dolman A.J., Froer O., Gracia C., Granier A., Grünwald T., Hari P., Jans W., Kellomäki S., Loustau D., Magnani F., Matteucci G., Mohren G.M.J., Moors E., Nissinen A., Peltola H., Sabaté S., Sanchez A., Sontag M., Valentini R. y Vesala T. 2002. Evaluation of 6 process-based forest growth models based on eddy-covariance measurements of CO_2 and H_2O fluxes at 6 forest sites in Europe. Global Change Biology 8: 1-18.

López B., Sabaté S., Ruiz I. y Gracia C.A. 1997. Effects of elevated CO_2 and decreased water availability on holm-oak seedlings in controlled environment chambers. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). Impacts of global change on tree physiology and forest ecosystems. Kluwer, Dordrecht. pgs. 125-133.

López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 1998. Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: Effects of drought and stem density. Tree Physiology 18: 601-606.

López B. 2000. The fine root system of a mediterranean Holm Oak forest. General aspects and effects of Thinning. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona. 296 pgs.

López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 2001a. Annual and seasonal changes of fine roots biomass of a *Quercus ilex* L. forest. Plant and Soil 230: 125-134.

López B., Sabaté S. y Gracia C.A. 2001b. Fine root longevity of *Quercus ilex*. New Phytologist 151(3): 437-441.

Martín S., Díaz-Fernández P. y De Miguel J. 1998. Regiones de procedencias de las Especies Forestales Españolas. Géneros *Abies*, *Fagus*, *Pinus* y *Quercus*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

McClaugherty C.A., Aber J.D. y Melillo J.M. 1982. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. Ecology 63:1481-1490.

McClaugherty C.A., Aber J.D. y Melillo J.M. 1984. Comparative root and soil dynamics on a white pine watershed and in the hardwood forest in the Coweeta Basin. Oikos 42: 378-386.

Medlyn B.E. y Dewar R.C. 1996. A model of long-term response of carbon allocation and productivity of forests to increased CO_2 concentration and nitrogen deposition. Global Change Biology 2: 367-376.

Medlyn B.E. y Jarvis P.G. 1997. Integration of results from elevated-CO_2 experiments on European forest species: the ECOCRAFT project. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). Impacts of global change on tree physiology and forest ecosystems Kluwer Academic Publishers. Forest Sciences 52, 273-279.

Mohren G.M.J. y Kramer K. 1997. Simulation of direct effects of CO_2 and temperature increase on forest growth: the LTEEF project. En: Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). Impacts of global change on tree physiology and forest ecosystems. Kluwer Academic Publishers. Forest Sciences 52: 307-317.

Mohren G.M.J., Kramer K. y Sabaté S. (eds.). 1997. Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 372 pgs.

Mohren G.M.J. 1999. Long-term effects of CO_2-increase and climate change on European Forests. En: Valentini R. y Brüning C. (eds.). Greenhouse gases and their role in climate change: the status of research in Europe. European Commission DG XII/B.I EUR (19085 EN. pgs. 20-31.

Mohren G.M.J, Bartelink H.H, Kramer K., Magnani F., Sabaté S. y Loustau D. 2000. Modelling long term effects of CO_2 increase and Climate Change on European Forests, with emphasis on Ecosystem Carbon Budgets. En: Ceulemans R.J.M., Veroustraete F., Gond V. y Van Rensbergen J.B.H.F. (eds.). Forest ecosystem modelling, upscaling and remote sensing. SPB Academic Publishing bv, La Haya, The Netherlands. Pgs. 179-192.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Cañellas, I., Candela, J.A. y Pavón, J. 2002. La fijación de CO_2 por las masas de pino piñonero de Andalucía". Forestalia, 7 - 12-23.

Montero, G., Muñoz, M., Donés, J. y Rojo, A. 2004. Fijación de CO2 por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Wild. En los montes "Pinar de Balsaín y Matas de Balsaín". Investigaciones Agrarias (Sistemas y Recursos Forestales) 13(2):399-415.

Mutke S., Sievänen R., Nikinmaa E., Perttunen J. y Gil L. 2004. Crown architecture of grafted Stone pine (*Pinus pinea* L.): shoot growth and bud differentiation. Trees (en prensa, online http://dx.doi.org/10.1007/s00468-004-0346-7).

Petit R.J., Brewer S., Bordacs S., Burg J.,Cheddadi R., Coart E., Cottrell J., Csaikl U., Deans D., Fineschi S., Finkelday R., Goicoechea P.G., Jensen J., Konig A., Lowe A.J., Madsen S.F., Matyas G., Oledska I., Popescu F., Slade D., Van Dam B. de Beaulieu J.-L. y Kremer A. 2002. Identification of postglacial colonisation routes of European white oaks based on chloroplast and fossil pollen evidence. Forest Ecology and Management 156: 49-74.

Robledo-Arnuncio, J.J., Alía R. y Gil L. 2004. Increased selfing and correlated paternity in a small population of a predominantly outcrossing conifer, *Pinus sylvestris*. Molecular Ecology 13(9): 2567-2577.

Rodà F., Ibáñez J. y Gracia C. 2003. L'estat dels boscos. A: L'estat del Medi Ambient a Catalunya. Generalitat de Catalunya (en prensa).

Rodà F., Mayor X., Sabaté S. y Diego V. 1999. Water and nutrient limitations to primary production. En: Rodà F., Retana J., Gracia C. y Bellot J. (eds.). Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. Springer, Berlin. pgs. 183-194.

Sabaté S., Calvet S. y Gracia C.A .1992. Preliminary results of a fertilization-irrigation experiment in a *Quercus ilex* L. forest in relation to leaves and twigs characteristics. Vegetatio 99-100: 283-287.

Sabaté S 1993 Canopy structure and nutrient content in a *Quercus ilex* L. forest of Prades Mountains: Effects of natural and experimental manipulation of growth conditions. PhD thesis dissertation. University of Barcelona.

Sabaté S y Gracia C 1994 Canopy nutrient content of a *Quercus ilex* L. forest: fertilization and irrigation effects. Forest Ecology and Management 68: 31-37.

Sabaté S., Sala A., Gracia C.A. 1995 Nutrient content in *Quercus ilex* canopies: seasonal and spatial variation within a catchment. Plant and Soil 168-169: 297-304.

Sabaté S., Gracia C., Vayreda J. e Ibáñez J. (enviado). Differences among species in aboveground biomass expansion factors in Mediterranean forests.

Tello E., Sabaté S., Bellot J. y Gracia C. 1994. Modelling the Responses of Mediterranean Forest to Climate Change: The role of canopy in water fluxes. Noticiero de Biología 2(3):55. Santiago de Chile, Chile.

Watson R. (ed.) 2001. Climate Change 2001: Synthesis Report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra.

10. IMPACTOS SOBRE EL SECTOR AGRARIO

Mª Inés Mínguez Tudela, Ángel Ruiz Mantecón y Agustín Estrada Peña

Contribuyentes

C. Hernández Díaz-Ambrona, M. P. Lavín González, M. Quemada Sainz-Badillos, M. Ruiz-Ramos, F. Sau Sau

Revisores

A. Iglesias Picazzo

D. J. Connor

RESUMEN

El incremento en la concentración de CO_2 y en la temperatura del aire así como los cambios en las precipitaciones estacionales tendrán efectos contrapuestos y no uniformes en las regiones españolas. El efecto positivo del incremento de CO_2 sobre las tasas fotosintéticas puede verse compensado por altas temperaturas o menores precipitaciones. Por otro lado las temperaturas más suaves en invierno permitirán mayores tasas de crecimiento de los cultivos, si la disponibilidad de agua es adecuada, y una mayor productividad en determinadas zonas. Mayores temperaturas pueden aumentar la demanda evapotranspirativa de los cultivos, fundamentalmente en verano, incrementándose las necesidades de riego en algunos casos. En el sur y sureste de España la demanda de agua se incrementaría siendo el estrés térmico más frecuente.
Los modelos de simulación de cultivos que utilizan los datos de los modelos regionales de clima son la herramienta más efectiva para el análisis de impactos, pudiendo cuantificar los efectos no lineales del cambio climático. La identificación de zonas con diferentes niveles de impacto es una prioridad.

Las estrategias de adaptación a corto plazo pueden basarse en sencillas prácticas agrícolas relacionadas con cambios en las fechas de siembra o en las variedades. Sin embargo a largo plazo es necesario adaptar los sistemas agrícolas a las nuevas condiciones climáticas. Las implicaciones que esto tiene en plantaciones frutales, olivares y vid tienen que ser abordadas específicamente para identificar estrategias de adaptación de mínimo coste.

El incremento de la frecuencia de años extremos complicará el manejo de cultivos y requerirá un mayor análisis del impacto sobre la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. La distribución y alcance de plagas y enfermedades de los cultivos de importancia económica puede presentarse diferente. Su control natural por las heladas y bajas temperaturas del invierno, en zonas como las Mesetas, podría disminuir, necesitando una adaptación de las secuencias de los cultivos. También la modificación de las temperaturas puede producir el desplazamiento a latitudes mayores de otras enfermedades.

La implicación del cambio climático sobre la ganadería es compleja por la diversidad de sistemas ganaderos. La variación en temperatura y precipitaciones que implica el cambio climático puede afectar a los aspectos relacionados con la reproducción, metabolismo, y la sanidad de los procesos productivos.

Las enfermedades parasitarias producidas por artrópodos o por helmintos pueden tener drásticas variaciones en su distribución, abundancia poblacional e intensidad, de pronóstico diferente según la región de España que sea considerada. La regulación epidemiológica y la gravedad y extensión del proceso transmitido dependen exclusivamente de las relaciones hospedador-vector-ambiente, por lo que caben esperar evidentes efectos sobre sus delicados ajustes biológicos. Los inviernos más suaves y húmedos provocan un marcado incremento de la supervivencia de los parásitos. Estos inviernos más suaves también provocan un adelanto en el momento del año en que comienzan su actividad. Los veranos secos y cálidos incrementarán la mortalidad de los artrópodos por la pérdida de agua.

La investigación necesaria para poder predecir el efecto del cambio climático pasa por conocer el efecto de las variaciones del clima sobre la capacidad de ingestión y los parámetros indicativos de bienestar animal. Con esta información y la ya disponible de experiencias previas sería posible la construcción de modelos dinámicos. Es asimismo necesaria la confección de mapas de riesgo por las diversas parasitosis, así como los cambios de distribución debidos a la influencia del clima.

10.1. INTRODUCCIÓN

10.1.1. Sistemas agrarios en España. Distribución, superficie actual y productividad

La producción agrícola de España representa el 12.1 % de la producción total de la Unión Europea, detrás de Francia (23.1%) y de Alemania e Italia (ambas 15.4%) (MAPYA, 2003, http://www.mapya.es/es/agricultura/pags/hechoscifras/cifras.htm), siendo la producción hortofrutícola, el viñedo, el olivar y el cereal los sectores más destacados. Los productos agrícolas significan más de 50% de la Producción Final Agraria española y los productos ganaderos en torno a un 40%.

Aproximadamente un 30% de la superficie de España (50 Mha) se cultiva o se dedica a pastos. La diversidad de los sistemas de producción se refleja en el amplio intervalo de rendimientos en los cereales, que contrasta con las elevadas producciones en los cultivos hortícolas, obtenidos normalmente en condiciones de riego y bajo invernadero. Las productividades referidas al uso del agua y nutrientes son todavía bajas en grandes zonas del país debido al manejo de los cultivos – manejo de suelo, del agua, rotaciones o secuencias de cultivos, sistemas de riego, etc. – y existen vías para mejorarla.

10.1.2. Influencia de la Política Agraria Común (PAC) en los sistemas agrarios

La influencia de la PAC se plasma en la elección de las secuencias de cultivos de las rotaciones de secano y regadío. Esta elección no siempre es la más adecuada en términos agronómicos, y en particular con relación al clima y al suelo, pudiéndose cuestionar la sostenibilidad de estos sistemas agrarios. La progresiva disminución de las ayudas de la UE empezará a afectar a los olivares no reconvertidos y a la distribución geográfica de olivares y viñedos. Los cambios ocurridos en los últimos años en las zonas de producción ganadera tradicional en cuanto a una disminución del número de explotaciones y aumento de tamaño llevará cambios en la gestión del uso del territorio de estas áreas, especialmente en las zonas de montaña.

10.1.3. Componentes del cambio climático y principios básicos de los impactos

10.1.3.1. Influencia del cambio climático en los distintos sistemas agrícolas

Los posibles efectos del cambio climático sobre los sistemas agrarios se han abordado en el informe del IPCC (1997, 2001a) e indican impactos importantes en general. Los cambios en las concentraciones de CO_2, en los valores de las temperaturas del aire (y de suelo), así como las variaciones en las precipitaciones estacionales, tendrán efectos contrapuestos y no uniformes en la Península Ibérica y en particular en España. Es decir, si trasladamos los estudios generales a España, los efectos podrían ser beneficiosos o dañinos para los diferentes sistemas agrarios (Rosenzweig y Hillel 1998).

En efecto, el incremento de CO_2 puede llevar consigo el incremento de las tasas fotosintéticas de los cultivos (por ej. Amthor y Loomis 1996) y una disminución de las tasas de transpiración si las conductancias estomáticas responden a este incremento (Rodríguez *et al.* 2001). Estas dos respuestas implicarían, en principio, un incremento en la productividad y en la eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, el incremento de temperaturas puede contrarrestar lo anterior al incrementarse la demanda evapotranspirativa en los cultivos, y, en las zonas más calurosas afectarían negativamente a las tasas fotosintéticas. En efecto, en el sur y sureste de España, la demanda de agua se incrementaría, y el estrés térmico sería más frecuente.

Las variaciones en las precipitaciones totales anuales y estacionales es uno de los aspectos más importantes a estudiar en los sistemas de secano (sin riego) y en el diseño de los regadíos

y planificación de riegos. La demanda de agua tendrá que ajustarse a la disponibilidad o al suministro de agua. Cuando la disponibilidad del agua sea insuficiente, harán falta diferentes variedades (cultivares) o cultivos en secano y riegos estratégicos para estabilizar la producción hortofrutícola de diferentes zonas.

Estas consideraciones esquematizan la complejidad del impacto asociado al cambio climático y la necesidad de evaluar qué factores son los que inclinarán la balanza, en un sentido o en otro, de las productividades de los sistemas agrícolas españoles. Si se mantienen las mismas prácticas agrícolas, los ciclos de los cultivos se acortarán, y las fechas de floración y madurez cambiarán. La productividad y el uso del agua se incrementarán o disminuirán en función de los factores que interaccionan. Esto implica la necesidad abordar estudios y análisis individuales sobre los cultivos hortícolas, plantaciones frutales, olivares y viñedos para identificar las estrategias de adaptación de menor coste, asi como para establecer el manejo y secuencias de los cultivos. Se hace patente la interdependencia con otros sectores, como el hidrológico, el de seguros (agrarios), energético (generación de energía eléctrica versus uso para riego), mantenimiento o incremento de espacios para ecosistemas “naturales”, etc.

10.1.3.2. Influencia del cambio climático en los distintos sistemas ganaderos

La implicación del cambio climático sobre la ganadería (explotación productiva de los animales) es, sin duda, compleja por la diversidad de sistemas ganaderos y en los cuales el impacto de las variaciones climáticas puede tener distintos resultados. A pesar de la diversidad de sistemas de explotación ganadera se pretende aunar el efecto del cambio climático en parámetros comunes a todos ellos, tratando de establecer algunas peculiaridades de los sistemas intensivos (explotación donde las condiciones ambientales pueden ser mucho más controladas) y los extensivos (explotación dependiente de los recursos vegetales disponibles y donde la influencia de la climatología es mucho más directa sobre la disponibilidad de alimento para el ganado).

La variación en temperatura y precipitaciones que implica el cambio climático puede afectar a la ganadería de múltiples formas (reproducción, metabolismo, sanidad, etc.), si bien pueden resumirse estos efectos en dos parámetros (ingestión y bienestar animal) que pueden ser utilizados como indicadores del cambio climático en los distintos sistemas de explotación animal y por su influencia directa en la rentabilidad de las ganaderías.

10.1.4. Análisis de las posibles herramientas para evaluar la repercusión del cambio climático en las explotaciones ganaderas

Es preciso tener en cuenta que son muy escasos, y prácticamente nulos en nuestro país, los trabajos realizados sobre la influencia del cambio climático en los parámetros indicados (ingestión y bienestar animal). Si bien existe información científico-técnica sobre la influencia de la temperatura sobre la nutrición y el estrés en los animales y estos resultados podrían ser utilizados como una referencia inicial del trabajo.

De manera directa, el efecto más claro del cambio climático es sobre la disponibilidad de recursos forrajeros a lo largo del año, lo cual condiciona la ingestión y la rentabilidad de las explotaciones ganaderas. En este sentido, un cambio en la distribución de las precipitaciones en las zonas de pastoreo llevaría a una menor cantidad de pasto y, lo que es más importante, a una reducción en la tiempo de aprovechamiento potencial y, en consecuencia, a una menor carga animal (cabezas/ha). En estos sistemas extensivos, las variaciones en la materia vegetal en oferta a lo largo del año y la carga animal serían dos de las herramientas para evaluar el efecto del cambio climático.

En sistemas intensivos, las herramientas a utilizar podrían ser los parámetros indicativos del grado de estrés de los animales (niveles de cortisol, adrenalina, equilibrio iónico, etc.) y su efecto sobre los parámetros productivos de las explotaciones.

10.1.5. Datos sobre los ecosistemas ibéricos, extensión y tipos y su idoneidad para la patología animal

Existen dos puntos principales de las enfermedades de los animales domésticos especialmente sensibles a los efectos del cambio climático y con una clara distribución en cuanto al ecosistema o hábitat. Uno de ellos radica en algunas enfermedades parasitarias, debido a la especial biología que tienen ciertos parásitos. En efecto, todos los artrópodos (fundamentalmente moscas, mosquitos y garrapatas) dependen totalmente del clima ambiental para modular su ciclo biológico. Un área dada puede ser apropiada o no para un determinado artrópodo (y de esta forma aparecer la enfermedad o no) en función del delicado ajuste de determinadas variables climáticas que se revisan más abajo. Otros parásitos, como los helmintos o vermes (agentes etiológicos de enfermedades ampliamente distribuidas en España) tienen algunas fases de vida libre. Toda la epidemiología de estas helmintosis se ve regulada por las variables de temperatura y humedad, resultando los ciclos vitales, de nuevo, a partir de las condiciones prevalecientes (Soulsby 1982). Por otro lado, no hay que olvidar que los artrópodos son vectores de un buen número de otros procesos, tanto parasitarios como infecciosos, con graves repercusiones económicas en la salud animal. La regulación epidemiológica y la gravedad y extensión del proceso transmitido dependen exclusivamente de las relaciones hospedador-vector-ambiente, por lo que caben esperar evidentes efectos sobre los delicados ajustes biológicos que tienen lugar en procesos complejos (Lindgren 1998).

De esta forma, cabe esperar que los efectos del cambio climático se observen en todas aquellos procesos parasitarios e infecciosos cuyos agentes etiológicos o sus vectores, tengan una estrecha relación con el clima. Los artrópodos son parásitos temporales. Ello implica que la fase parasitaria constituye una pequeña fracción de la duración total del ciclo vital del parásito. Bajo estas circunstancias, el clima tiene un efecto regulador predominante. Cada especie de artrópodo tiene un número variable de fases en su ciclo vital, según la especie o incluso el grupo taxonómico en el que se encuadre. Así, los Díptera (moscas y mosquitos) suelen tener una forma larvaria que eclosiona de un huevo. La velocidad de desarrollo del huevo depende exclusivamente de la temperatura reinante. Por debajo y encima de unas determinadas temperaturas críticas, el desarrollo se interrumpe. Por otro lado, la mortalidad en esta fase se deriva de la humedad relativa, o, en mejores términos, del déficit de saturación atmosférico. Un déficit alto implica una mortalidad alta, responsable de cuantiosas pérdidas poblaciones. Al igual que en los Díptera, puede afirmarse que esta regulación de la fase embrionaria es idéntica para las garrapatas, que constituyen un grupo de Artrópodos separado de los anteriores, pero con importantes implicaciones sanitarias en los animales domésticos (Estrada-Peña 2001). En ambos grupos se produce el desarrollo del huevo que produce la eclosión de la larva. En algunas casos esta larva se desarrolla en el agua (algunos mosquitos) en otros puede ser parásita de los animales (algunas moscas) y en otros se desarrolla en el ambiente y parasita solo temporalmente al hospedador (caso de las garrapatas). Es en estas últimas donde cabe esperar mayores efectos del cambio climático sobre su ciclo, por dos circunstancias. Por una lado, las larvas de las garrapatas se exponen al clima ambiental durante casi el 99% de la duración de tal estadio. Además, la fase larvaria en las garrapatas es la responsable de toda la compleja regulación poblacional numérica del resto del ciclo de la garrapata (Gray 1982). La existencia de una alta mortalidad en el estadio larvario sería la causa de una drástica disminución de las poblaciones de garrapatas. De la misma forma, el aumento desmesurado de los efectivos de este estadio, sería responsable de un dramático aumento de los efectivos del parásito en el campo.

Todos estos efectos deben de contemplarse no solamente bajo al mera perspectiva del aumento o disminución poblacional, sino en los efectos sobre el estado sanitario de los animales y en el potencial de transmisión de diversas enfermedades a los animales (Randolph *et al.* 2002). En efecto, no puede contemplarse una enfermedad parasitaria sin observar la respuesta inmune del hospedador, que se ajusta explícitamente a la presión parasitaria que soporta. Cambios en esta presión deben de ir acompañados en sutiles pero profundas variaciones en la respuesta que el animal presenta al entorno hostil provocado por el parásito.

Uno de los efectos más obvios cabe observarse en la adaptación del parásito a su hábitat. La llamada idoneidad de hábitat viene producida por la adecuación de una serie de variables climáticas a las preferencias que el Artrópodo pueda tener. El otro efecto viene derivado de los cambios en la dinámica estacional que se deben de esperar como consecuencia de la aclimatación del agente patógeno (parásito) a la cambiante situación climática. Estudios llevados a cabo con garrapatas, que son idóneos marcadores del cambio climático, han demostrado dos detalles fundamentales de los efectos del cambio climático. Por un lado, los inviernos más suaves y húmedos provocan un marcado incremento de la supervivencia de ciertos estadios del ciclo vital del parásito. Estos inviernos más suaves también provocan un adelanto en el momento del año en que la garrapata comienza su actividad, ya que las temperaturas frías que impiden la actividad del artrópodo duran menos tiempo, y por lo tanto extienden en el tiempo la duración de su ciclo vital (Randolph *et al.* 1999). Sin embargo, hay otro efecto que cabe ser comentado aquí, relativo a los veranos secos y cálidos. Tales periodos estivales se cree que incrementarán la mortalidad de las garrapatas por una simple cuestión de pérdida de agua. Queda por saber cuál es el efecto que el cambio climático va a tener sobre dos niveles importantes para las garrapatas: el suelo y la vegetación, ya que es ahí donde sus ciclos vitales tienen lugar, y donde todos los efectos del clima son modulados. En otras palabras, los efectos sobre los ciclos biológicos de estos artrópodos van a ser complejos y van a dar lugar, como se expondrá en el capítulo de “Impactos” a toda una nueva relación entre las garrapatas, el clima y los animales.

Como se ha comentado, existen otros parásitos que también tienen una alta influencia del clima sobre sus ciclos vitales. Normalmente, varias fases larvarias de los conocidos como nematodos (vermes parásitos internos de los animales domésticos, silvestres, y del hombre) se exponen durante largos periodos de tiempo a las condiciones climáticas ambientales, entre el pasto (Almería 1994). Al igual que en el caso de los artrópodos y del ejemplo concreto de las garrapatas que se ha mencionado, los nematodos tienen unas temperaturas óptimas, diferentes para cada especie, a las cuales el desarrollo de la especie es máximo. Por encima y debajo de esas temperaturas, la velocidad de desarrollo es menor o puede llegar a detenerse. Es el caso de las temperaturas invernales y de las larvas de estos nematodos entre el pasto. Las bajas temperaturas de invierno hacen que el desarrollo de estos nematodos se decelere o hasta se detenga. Aunque en algunas zonas de España existen temperaturas invernales lo suficientemente altas como para que este desarrollo sea pequeño pero superior a cero, y aunque cada especie prefiere un intervalo óptimo diferente, se puede afirmar que estos procesos invernales provocan un ajuste del ciclo de forma que el desarrollo de las formas infestantes coincidan con la salida a pastos de los animales en primavera.

Otras entidades parasitarias que se esperan sean moduladas por los efectos del cambio climático se engloban dentro de los helmintosis transmitidas por caracoles de agua dulce. Aunque las formas larvarias de los agentes que producen estos procesos se encuentran menos ligadas al ambiente como fases libres que los Artrópodos o los helmintos mencionados anteriormente, el hecho de ser vehiculadas por caracoles de agua dulce, implica que las modificaciones en las manchas de agua dulce afecten profundamente a los ciclos de transmisión de estas helmintosis. En efecto, los caracoles vectores de tales entidades necesitan asimismo una serie de factores ambientales finamente ajustados para su desarrollo. De la misma forma, el parásito no puede desarrollarse en el interior del caracol reservorio si no aparece la combinación de temperaturas adecuadas para su ciclo de desarrollo.

Independientemente de las variaciones geográficas que pueden aparecer en el mantenimiento de las manchas de agua necesarias para la supervivencia de los caracoles (ver capítulo de aguas continentales) es de esperar que los cambios de temperatura del agua provoquen variaciones actualmente no cuantificadas en el desarrollo, expansión y distribución de estas helmintosis.

10.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

10.2.1. Sostenibilidad de sistemas y estabilidad. Indicadores de impactos en la agricultura. Estado actual de los recursos base (suelo, agua, información genética)

Los estudios generales sobre el sector agrario se han hecho a petición de organismos oficiales como el *United States Department of Agriculture* (USDA) (Reilly *et al.* 2001) y en ellos se hace hincapié no sólo en la estimación cuantitativa de los cambios en las producciones, uso del agua, etc., sino en el problema de la variabilidad. En el caso de la Península Ibérica, y en España en particular, este es uno de los puntos críticos ya que la estabilidad y la sostenibilidad de cualquier sistema están influidas por las variaciones interanuales y estacionales de las precipitaciones, disponibilidades de agua en los regadíos, o bien, la aparición o disminución de heladas en primavera o las lluvias torrenciales que afectan al sector hortofrutícola.

10.2.2. Variabilidad en el suministro de agua (secano y regadío)

Los sistemas agrícolas de secano y los pastizales no sólo abarcan la mayor parte de la superficie cultivada, sino que son la base de los recursos de la agricultura nacional. Es imprescindible mantener la base de los recursos para corregir cualquier efecto negativo que puedan tener las prácticas de uso del suelo. Conforme vaya cambiando el clima, se hará necesario no sólo un cambio en el manejo de los cultivos sino también en el uso del suelo, bien sea hacia una mayor extensificación, hacia la forestación, o bien, hacia una intensificación en régimen de regadío. La variabilidad en el suministro de agua de lluvia o de riego, puede iniciar, en estos sistemas, una tendencia que desconocemos actualmente.

La disponibilidad de agua para las plantaciones frutales, los olivares y viñas es uno de los temas cruciales a estudiar, también en conexión con los otros sectores involucrados en el presente proyecto. Un paso fundamental es la estimación de las necesidades de agua o evapotranspiración (ET) de los cultivos en clima futuro. Una de las cuestiones más difíciles es la traslación de las previsiones de variación en las precipitaciones, al suministro de agua que dispondrán los cultivos, en particular los hortícolas.

10.2.3. Importancia de los años y eventos extremos (agua, plagas, enfermedades)

El incremento de la frecuencia de años extremos, en nuestro caso años más secos, o con más fenómenos tormentosos, o con olas de calor más largas (ver capítulo 1) no sólo afectará en mayor medida a las cuestiones tratadas más arriba sino que dificultará la planificación del manejo de los sistemas agrícolas por parte de los agricultores. La ayuda o el apoyo económico dentro de la PAC presenta una rigidez en las normas de solicitud de las subvenciones que debería adaptarse a las nuevas situaciones.

La distribución y alcance de plagas y enfermedades de los cultivos de mayor importancia económica será diferente. Los cambios en las temperaturas y en la humedad relativa o precipitaciones afectarán a la manera de hacerlas frente, y se ha descrito de manera genérica en anteriores estudios (IPCC, 2001a). El control natural por las bajas temperaturas del invierno en algunas zonas, por ejemplo las Mesetas, podría disminuir necesitando una adaptación de

las secuencias de los cultivos. También la modificación de las temperaturas puede producir el desplazamiento a latitudes mayores de otras enfermedades.

10.2.4. Importancia y evolución de los distintos sistemas ganaderos en relación con el uso del territorio

En términos generales, los cambios en los sistemas ganaderos de nuestro país han llevado, en las últimas décadas, hacia sistemas cada vez más intensivos dado que durante las décadas de los años 50 a 80 los objetivos en producción animal pasaban por lograr la máxima cantidad de producto, de la forma más rápida posible y al menor costo. Este objetivo era lógico, en esos años, para tratar de cubrir las necesidades de productos de origen animal (carne y leche, fundamentalmente) de la población. Este planteamiento de maximizar la producción es más fácil de lograr en sistemas intensivos con explotaciones con un gran número de animales y que pueden dar lugar a productos más homogéneos en cantidad. Además, en estas décadas se produjo el abandono de la población de zonas tradicionales de pastoreo (por ejemplo, las áreas de montaña) lo que supuso una disminución del número de explotaciones ganaderas y cambios en el uso tradicional (sostenible) del territorio ya que de los integrantes del sistema productivo, el factor tierra dejó de ser limitante para ser el factor humano (mano de obra) el más importante.

Del trabajo realizado en la Montaña de León (Serrano *et al.* 2002) se han caracterizado y cuantificado los cambios indicados en los sistemas ganaderos de esta zona y evidenciado la viabilidad de alternativas productivas cuando la producción ganadera de estas zonas logra unos productos de calidad garantizada, cada vez más demandados en la actualidad. Si bien, la dependencia económica de las subvenciones hace que la viabilidad de alguna de las explotaciones pueda estar en peligro, salvo que las ayudas recibidas estuvieran ligadas a un uso racional del territorio para evitar una competencia desleal de otros sistemas de producción que, recibiendo ayudas económicas, no realizan ningún beneficio medio ambiental.

Tradicionalmente, en las zonas de montaña coexistieron sistemas ganaderos en los cuales intervenían distintas especies de herbívoros (ganado vacuno, ovino, caprino y caballar) con unas producciones mixtas (leche, carne, lana, trabajo, etc.). Los cambios de los últimos años han llevado a un incremento importante de los sistemas ganaderos de producción de carne de vacuno y la práctica desaparición de los otros sistemas, con el efecto directo sobre el uso del territorio y cambios en la cubierta vegetal.

10.2.5. Datos sobre principales rasgos ambientales y tendencias actuales del clima que implican la presencia/ausencia de un proceso patológico

(Véase el apartado 10.3.3.)

10.2.6. Pautas y ciclos estacionales relativamente estables, que cambian drásticamente en cortos periodos de tiempo

(Véase el apartado 10.3.3.)

10.2.7. Calidad alimentaria

No existen en la actualidad evaluaciones sobre el efecto en la calidad alimentaria. Estos efectos podrían estar relacionados por ejemplo con: las traslaciones de periodos de temperaturas elevadas y la calidad proteínica de los trigos duros (producción de pasta), cambios en el patrón de precipitaciones durante la maduración de la uva, mayor lavado de

nutrientes en sistemas intensivos con riego como son los cultivos hortícolas. Aunque si se conoce el efecto que las temperaturas de helada producen sobre la calidad de los productos agrarios y las consecuencias de las temperaturas extremadamente altas o golpes de calor sobre la producción, como lo ocurrido con la ola de calor del verano de 2003. Conocemos las consecuencias que pueden tener, pero ahora nos interesa saber si en un escenario de cambio climático la frecuencia con la que ocurren estos fenómenos se va a modificar.

10.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

10.3.1. Sistemas agrícolas de secano y regadío

Los primeros estudios sobre impacto del cambio climático en agrosistemas españoles se basaron en la utilización de Modelos Generales de Circulación (GCM) como datos de entrada en modelos de simulación de cultivos. Los GCMs considerados provenían de: *Goddard Institute for Space Studies* (GISS), *Geofluids Dynamics Laboratory* (GFDL), y *UK Meteorological Office* (UKMO). Esto permitió realizar el primer análisis en España de impacto del cambio climático en la generación de biomasa y rendimiento, y en los consumos de agua y necesidades de riego de determinados cultivos (Iglesias y Mínguez 1995, Mínguez e Iglesias 1996). Sin embargo la baja resolución de los GCMs no permitía plasmar en los cultivos las diferencias que existen ya en clima actual entre comarcas próximas.

La segunda etapa se inició con la utilización de modelos GCM con acoplamiento atmósfera-océano (AOGCM, en concreto HadCM2) junto con a un modelo regional de clima (PROMES) con mayor resolución (ver Capítulo de Clima). Los modelos de simulación de cultivos utilizados están incluidos en el *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT) v. 3.1. (Tsuji *et al.* 1994)

Son los modelos del grupo, *Crop Estimation through Resources and Environment Síntesis* (Ritchie y Otter 1985; Jones y Kiniry 1986; Otter-Nacke *et al.* 1991). Estos cultivos se utilizaron como cultivos de referencia al cubrir sus ciclos todas las estaciones del año y tener sistemas fotosíntéticos diferentes, C3 y C4, por lo que se abarcarían las diferentes respuestas al incremento de CO_2.

El impacto del cambio climático se refirió a cambios en el uso del agua y rendimientos en cultivos de invierno y de verano, es decir se evaluó el impacto estacional. La metodología empleada así como parte de los impactos en los consumos de agua se describen en Guereña *et al.* (2000). Este trabajo es el primero realizado en España en el que se han utilizado datos de un RCM en modelos de simulación de cultivos y el primero que hace un estudio comparativo entre impactos derivados de modelos de baja (AOGCM) y de alta resolución (RCM). En este trabajo se describen los cambios en rendimientos, biomasa, evapotranspiración (ET) y necesidades de riego de cultivos “referencia”.

Actualmente se está participando en el proyecto de investigación, PRUDENCE: *Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeaN Climate change Risks and Effects* (EVK2-2001-00156) (ver también Capítulo de CLIMA). En este trabajo se pretende evaluar las incertidumbres asociadas a las previsiones de cambio en los parámetros climáticos, y evaluar si las previsiones se trasladan o son reflejadas por los modelos de impacto. Los modelos de impacto son bien modelos de simulación de cultivos (DSSAT, Tsuji *et al.* 1994) o bien modelos de sistemas, CropSyst (Stöckel y Nelson 1994).

Los trabajos se están realizando fundamentalmente para cultivos de cereales de invierno y verano, sin o con riego. En la Fig.10.1 se muestra la simulación de impactos a través de los cambios en el rendimiento de un cultivar (variedad) tipo de cebada de invierno en secano, sin riego, en escenarios de clima actual (“*current*”) y A2, futuro, generados por el modelo de

simulación de sistemas CropSyst conectado a diferentes modelos de clima regionales: RCM, ETH, GKSS, Promes, HIRHAM (ver capítulo 1). El cultivar o variedad comercial utilizada es una variedad con necesidades de vernalización (es decir de exposición a bajas temperaturas para inducir la floración), cultivada en las zonas norte y centro de España, por lo que en la zona sur tanto en clima actual como en futuro aparecen fallos en los rendimientos. Esto nos permite testar la sensibilidad de los modelos en clima actual.

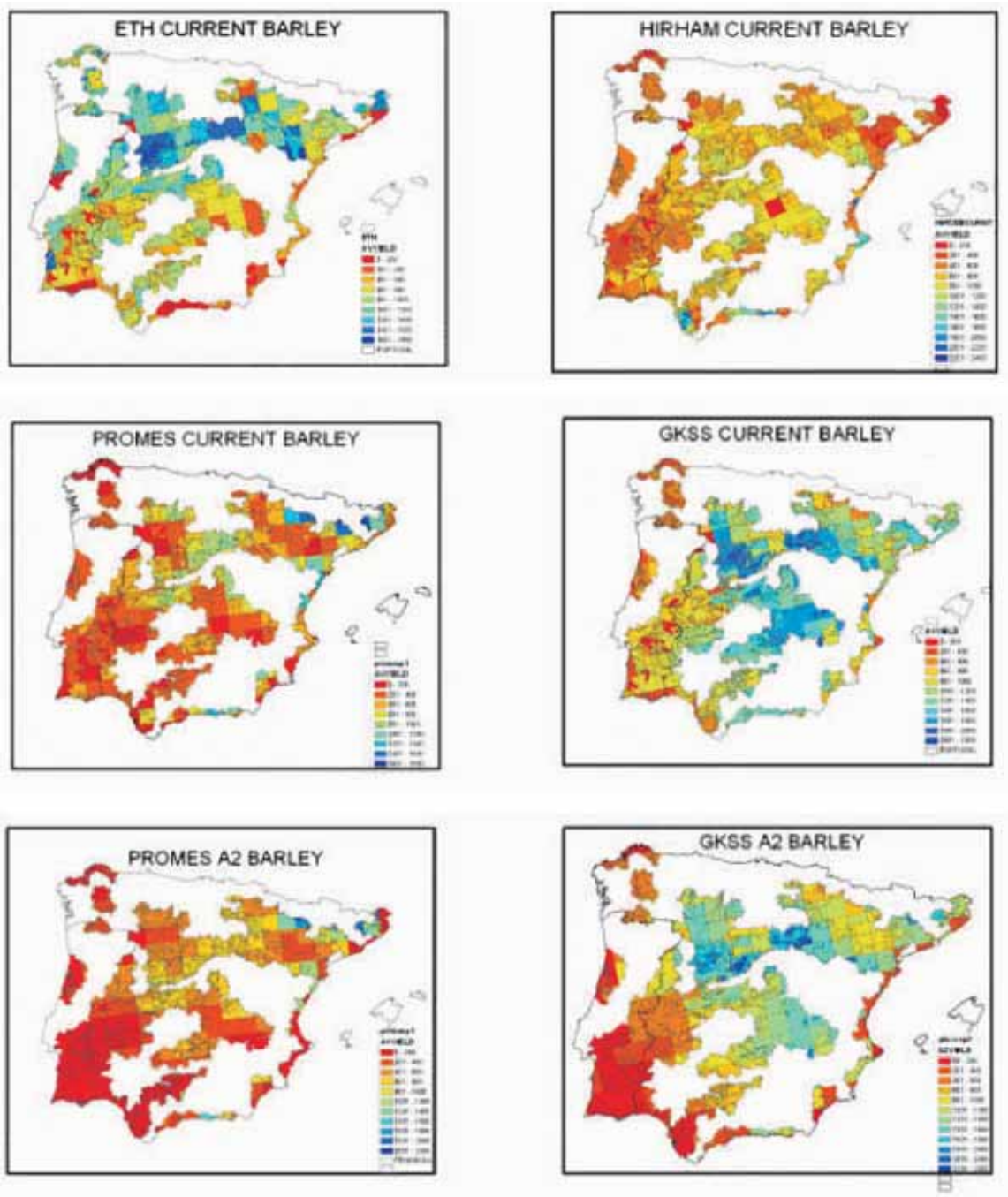


Fig. 10.1. *Simulación de impactos a través de los cambios en el rendimiento de la cebada ("barley") en secano, sin riego, en escenarios de clima actual ("current") y A2, futuro, generados por el modelo de simulación de sistemas CropSyst conectado a diferentes modelos de clima regionales.*

10.3.1.1. Utilización de los Modelos de Circulación General (GCM) de clima, de baja resolución y de simulación de cultivos (DSSAT). (Trabajos para el Plan Hidrológico Nacional)

Durante los años 1998 y 1999 se realizaron unos primeros estudios para el Centro de Estudios y Desarrollo Experimental (CEDEX) sobre el impacto del cambio climático en los regadíos (Mínguez *et al.* 1998; Mínguez *et al.* 1999). La importancia a la hora de diseñar el Plan Hidrológico Nacional de poder acotar en un futuro las tendencias de la demanda de agua por el Sector Agrícola nos motivó para iniciar esta colaboración. En esos estudios se mostraba la utilidad de los modelos de clima y de cultivos como herramientas de evaluación, resaltándose la variación espacial de los impactos y la necesidad trabajar en entornos de alta resolución (RCM+Modelos de impacto).

La evaluación del impacto del cambio climático se estimó a través de las necesidades de riego del maíz, como cultivo de verano, y del trigo, como cultivo de invierno. Los escenarios eran generados por el Modelo de Circulación General (HadCM2) para cuadrículas de 250x250 km. Esta primera aproximación demostró la necesidad de mayores resoluciones para la Península ya que las respuestas a unas condiciones de más elevada temperatura y variación en la precipitación, supuso, en algunos casos, la triplicación del rendimiento del maíz, muy elevadas producciones de biomasa y anormalmente bajos índices de cosecha. Las necesidades de agua de riego en el maíz eran menores en clima futuro, pese al aumento de temperatura, debido al acortamiento del ciclo de cultivo y a las altas precipitaciones previstas por el modelo de circulación general de clima, que en algún caso superaban los 1000 mm anuales.

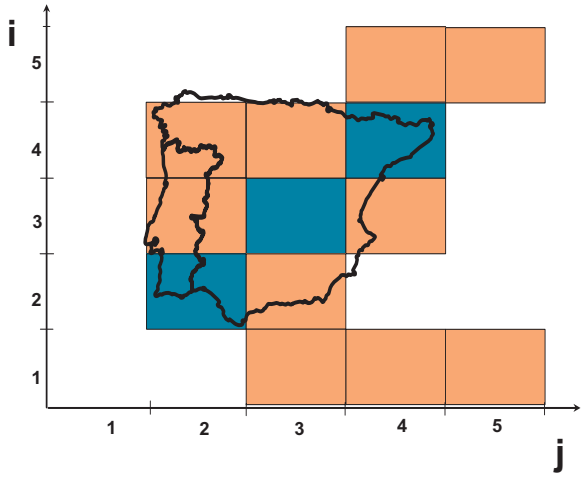


Fig. 10.2. *Celdas (i, j) mostrando la resolución de los modelos AOGCM de baja resolución utilizados en la mayoría de los estudios previos, incluidos los realizados por el IPCC.*

10.3.1.2. Impacto en la fenología, y, en el rendimiento y biomasa de los cultivos

Dentro de estos estudios previos, y en ausencia de estrategias de adaptación por parte del agricultor, los resultados obtenidos pueden sintetizarse como sigue: los cultivos muestran un acortamiento significativo en el ciclo vegetativo acelerándose su desarrollo fenológico. Los rendimientos en grano de los cultivos y la producción de biomasa varían entre las zonas.

Si los modelos son de baja resolución (ver Fig. 10.2) es difícil inferir tendencias. En algunas zonas, los rendimientos y producción de biomasa en regadío se mantienen en torno a la producción potencial, aumentando en algunos casos en el cereal de invierno. El aumento de temperatura en zonas actualmente con inviernos fríos y la mayor radiación solar en la mayoría de los casos, unido a unas altas precipitaciones, contribuye a que no se produzca una caída en los rendimientos.

Por ejemplo, en la Fig. 10.2, en las celdas azules el cultivo de maíz sufre un adelanto en la fecha de madurez del grano de entre 13 y 44 días, con gran variación entre celdas. El rendimiento en grano disminuye en la celda 2-2, mientras que se triplica en la 4-4 y muestra un aumento del 20% en la 3-3.

Los estudios que se están llevando a cabo actualmente, el empleo de modelos de clima de mayor resolución (Fig. 10.3) nos permitirá delimitar las zonas afectadas positivamente y negativamente por los cambios en las precipitaciones y temperaturas.

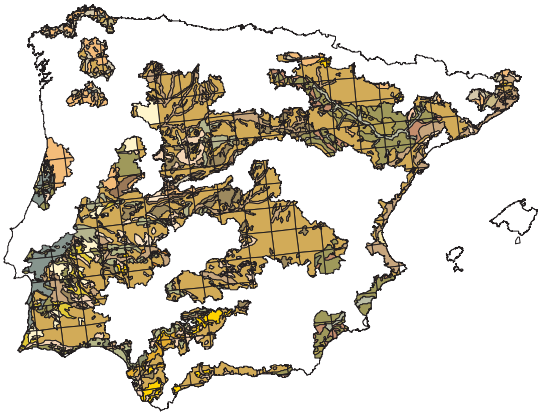


Fig. 10.3. *Mapa de suelos de las zonas agrícolas actualmente en estudio. La malla superpuesta muestra las celdas que corresponden al Modelo Regional de Clima (RCM) PROMES.*

10.3.1.3. Consumo de agua de los cultivos

La evaluación de los cambios en los consumos de agua por los cultivos se realizó para el CEDEX (ver este Capítulo, apto 3.1.1). En la Fig. 10.4 se resaltan las disminuciones en el riego, motivadas por la drástica reducción de la duración del ciclo vegetativo del maíz que tuvo también su consecuencia en una disminución del rendimiento potencial. No se muestran las estrategias que compensen este acortamiento. El impacto negativo de una mayor evapotranspiración diaria, consecuencia de las más altas temperaturas, se puede compensar por una mayor precocidad en los ciclos y por una mayor eficiencia del uso del agua, en un ambiente de mayor concentración de CO_2.

10.3.2. Sistemas de explotación ganadera

10.3.2.1. Efecto sobre la ingestión de alimentos por los animales

Desde el punto de vista de nutrición, como consecuencia de la necesidad de liberar el calor producido en el metabolismo energético de los animales, si la temperatura ambiente sobrepasa el intervalo de neutralidad térmica la ingestión de los animales se verá reducida; los valores de temperatura que definen este intervalo dependen de la especie animal y su estado fisiológico. La relación entre los valores de temperatura que implica el cambio climático y las referencias de intervalos de neutralidad térmica permitirán establecer ideas iniciales sobre el impacto que puede originarse en la ingestión de los animales. El cambio climático también puede afectar a la ingestión de los animales de una manera indirecta al condicionar la evolución en la disponibilidad de recursos pastables a lo largo del año. En este sentido, la diversidad botánica, la altitud, etc. han de ser tenidas en cuenta a la hora de evaluar la repercusión del cambio climático.

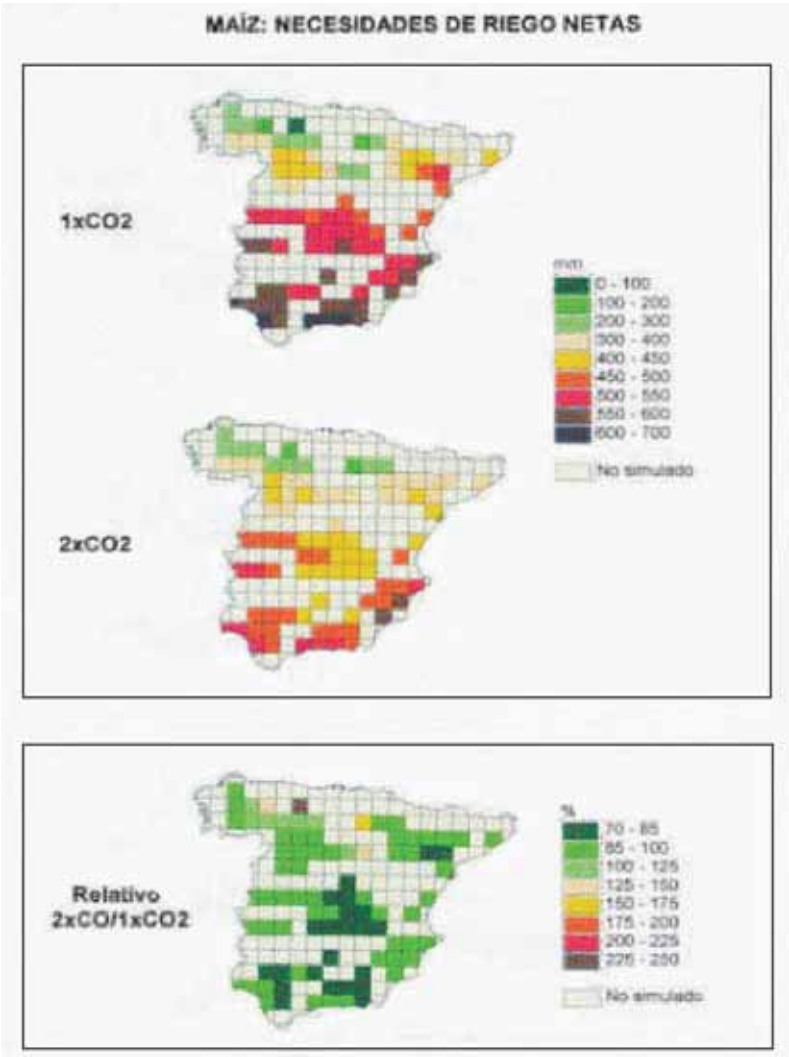


Fig. 10.4. *Estudios de impactos en las necesidades de riego del maíz, realizadas con versiones anteriores del modelo de clima PROMES y de cultivos DSSAT (CEDEX 1999). Las necesidades de riego se presentan como láminas netas totales y no se plasman las estrategias de adaptación (e.g. cambio de variedades).*

El comportamiento ingestivo de los animales en pastoreo también se ve condicionado, de una manera directa, por la temperatura ambiental. En este sentido, cuando la temperatura es elevada, por ejemplo en las horas centrales del día en verano, la actividad de pastoreo es prácticamente nula y trasladando la actividad a las primeras y últimas horas del día y durante la noche.

10.3.2.2. Efecto sobre el bienestar animal

Es evidente el interés social por una producción animal respetuosa con el derecho de los animales a ser criados en condiciones de mínimo estrés. Este hecho, que en principio pudiera parecer relativamente abstracto o de difícil evaluación, es posible su objetivización a partir de las concentraciones de determinadas sustancias en sangre (cortisol, por ejemplo) y de la incidencia de procesos patológicos en los animales, por la inmunodepresión que produce el estrés.

Una de las causas de estrés que con mayor frecuencia ha sido puesta de manifiesto es la variación en temperatura ambiente. El grado de influencia de este factor sobre el bienestar animal es variable, pudiendo llegar a la muerte de los animales si estos no pueden mantener su temperatura corporal.

10.3.3. Parasitosis con fases en vida libre

En vista de los apartados mencionados anteriormente, caben esperar los tipos de impactos que se mencionan a continuación. Debe destacarse que los estudios que implican la existencia de un determinado impacto son limitados, y en algunos casos se reducen a diversos estudios efectuados en el laboratorio bajo condiciones controladas, sobre el ciclo vital de los parásitos, a partir de los cuales puede realizarse un ejercicio de deducción acerca de las expectativas que determinados cambios en el clima pueden producir sobre la biología del parásito y la epidemiología de la enfermedad.

10.3.3.1. Acentuación estacional de los patrones del ciclo vital de las parasitosis con fases de vida libre

La situación de inviernos más suaves y con mayores precipitaciones implicaría una menor mortalidad de las poblaciones de todos los parásitos lo que se traduciría en un mayor efectivo poblacional en primavera. Este efectivo afectaría primordialmente a los animales en su salida a los pastos en esta época del año. Debe recordarse aquí que los animales jóvenes realizan su primera salida a pastos en esta época. Estos animales tienen una inmunidad deficiente como consecuencia de la edad, lo que provocaría pérdidas económicas sustancialmente mayores, como consecuencia de la mayor mortalidad producida. Pero este aumento poblacional de los parásitos en invierno, y la consecuentemente alta carga parasitaria primaveral puede provocar de la misma forma una mayor carga parasitaria estival, consecuencia del alto éxito reproductivo de los agentes patógenos durante la primavera. Ello generará una abundante población para el verano. Aunque se espera que tal población sufra una elevada mortalidad debida al aumento de las temperaturas y la baja humedad relativa esperable durante el estío, el alto número de efectivos va a provocar una mayor disponibilidad poblacional durante el otoño. En resumen, los cambios climáticos esperables, van a producir una serie de modificaciones de las parasitosis a un nivel temporal, además del geográfico anteriormente señalado, entre las que cabe citar:

- Aumento de las poblaciones de los parásitos durante la primavera.
- Incremento de las carga parasitaria por hospedador, con mayores pérdidas económicas por baja de producción o mortalidad. Incremento de los costos en tratamientos.
- Aparición de poblaciones parasitarias en momentos del año en las que no son habituales.
- Aplicación de sustancias medicamentosas en momentos del año considerados óptimos para el tratamiento, pero inválidos bajo las esperables nuevas pautas de dinámica estacional. Error en la aplicación del tratamiento y nuevo incremento de los costos asociados a la enfermedad.

10.3.3.2. Colonización de zonas nuevas, que antes estaban libres de un proceso parasitario o infeccioso dado

Este tipo de impactos se desprende de cambios en la distribución geográfica de las parasitosis. Zonas en las que ciertos parásitos son comunes dejarían de constituir un entorno adecuado para las mismas, y se tornarían libres de ellas. Sin embargo, cabe esperar que algunas zonas que actualmente están libres de determinadas parasitosis se vieran invadidas por las mismas. En todo caso, cabe esperar una desviación altitudinal y latitudinal de las parasitosis sobre las que opera el clima. Por ejemplo, determinadas especies de garrapatas presentes en la

actualidad en zonas del sur Peninsular, ascenderían hacia el norte, asentándose en áreas antaño libres de las mismas. En el mismo sentido, el incremento de la altitud es de especial aplicación a los valles. Mientras que un determinado proceso puede ser ahora común en las porciones más bajas del valle, los cambios climáticos esperados van a provocar su deriva hacia cotas superiores. Ello supone un cambio radical en las formas de explotación de los animales, en concreto en el manejo conocido como "trashumancia a puertos". En este tipo de explotación, grandes rebaños de animales son trasladados a las zonas más altas de los puertos de montaña, en busca de pastos frescos y libres de parasitosis por efecto de los inviernos con bajas temperaturas que actualmente se observan allá. Sin embargo, la deriva de las parasitosis hacia cotas superiores en altitud, provocará la existencia de las mismas en los pastos de alta montaña, con un profundo cambio en las pautas de explotación de los animales. Este efecto de la altitud se espera que se observe tanto en las helmintosis como en los procesos producidos y transmitidos por las garrapatas. Ello va a provocar tres claros impactos de tipo geográfico:

- Aumento de los procesos diarreicos producidos por helmintos en zonas en los que actualmente no se conocen o tienen una escasa incidencia. Cambio de las pautas clásicas de los tratamientos.
- Crecimiento de los problemas producidos o transmitidos por garrapatas en zonas en los que actualmente son desconocidos o tienen una escasa incidencia.
- Exacerbación o desaparición (según las especies implicadas) de tales procesos en las zonas meridionales de la Península. Es de destacar el fenómeno de aparición de enfermedades "nuevas" en zonas en las que antes eran desconocidas, con los consiguientes problemas de diagnóstico y tratamiento por el personal sanitario de la zona, desconocedor del problema.

10.3.3.3. Sustitución de especies parasitarias al colonizar zonas abandonadas por la especie endémica (problemas de inmunidad para los rebaños mantenidos en las zonas afectadas)

Uno de los efectos esperados es el conocido como "sustitución de especies". En este caso, especies de parásitos que eran comunes en una zona dada (a las cuales los animales están adaptados como consecuencia de la larga coexistencia) desaparecen como consecuencia de su falta de ajuste a las nuevas condiciones climáticas. Sin embargo, estas especies son reemplazadas por otras que han sufrido un desplazamiento por las mismas causas, frente a las cuales los animales carecen de resistencia humoral o celular y es perjudicial para los rebaños mantenidos en las zonas afectadas.

10.3.3.4. Aparición de resistencias a los tratamientos antiparasitarios

Cuando el hombre se enfrenta a una situación parasitaria desconocida (cambios estacionales o incremento de las poblaciones, o aparición de nuevos procesos) su única respuesta es la aplicación de tratamientos. Esta elevada presión terapéutica provoca la respuesta de las poblaciones de parásitos con un brusco incremento en la selección genética de las poblaciones sometidas a la presión del antiparasitario. La aparición de resistencias a los compuestos antiparasitarios es una situación grave, frente a la cual aún no conocemos las medidas más básicas para evitar su aparición ni para revertir la condición de la población parasitaria al status de sensibilidad.

10.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

10.4.1. Sistemas de secano. Zonas áridas y semiáridas. Mantenimiento de la calidad del suelo. Erosión. Olivares tradicionales

Los sistemas de secano siguen siendo los más extendidos y por lo tanto la calidad de la base de los recursos debe mantenerse para posibilitar los cambios hacia una posible extensificación, forestación o por el contrario, una intensificación del sistema. Dentro de las previsiones asociadas a los modelos de clima de baja resolución (AOGCMs) estas zonas son las de mayores impactos negativos (IPCC, 2001a). Para discriminar por zonas dónde los efectos serán aditivos se necesita una mayor resolución en los parámetros climáticos. Los sistemas áridos y semiáridos generan menor cantidad de residuos de cosecha, por lo que la cobertura del suelo es baja (Díaz-Ambrona y Mínguez 2001) y existe un menor retorno de residuos de cosecha que afecta la mantenimiento de la calidad del suelo.

10.4.2. Sistemas de regadío. Salinidad y contaminación por nitratos

La demanda de agua en las zonas del sur y sureste en las que se centra la producción hortofrutícola son en la actualidad zonas de riesgo al haber disminuido la calidad del agua de riego por intrusión marina en los acuíferos y por contaminación por nitratos.
Las estrategias de recuperación o mantenimiento de la calidad actual deberán hacerse bajo los escenarios de clima futuro.

Un paso fundamental es la estimación de las necesidades de agua o evapotranspiración de los cultivos (ET) en clima futuro. Además, una de las cuestiones más difíciles es la traslación de las previsiones de variación en las precipitaciones, al suministro de agua que dispondrán los cultivos, en particular los hortícolas.

10.4.3. Zonas costeras y marismas

La elevación del nivel del mar y los posibles cambios en las corrientes marinas afectarían a las zonas cultivadas de marismas. En este contexto, el estudio a realizar debe enlazar con los responsables de zonas costeras. Lo mismo ocurriría en las desembocaduras y deltas de los ríos que verían modificado el flujo de descargas produciendo alteraciones tanto en el aporte de sedimentos como en la calidad del agua. Además un aumento paulatino de las temperaturas en las zonas costeras incrementaría la demanda de agua de los cultivos de forma paulatina incrementado la presión sobre las fuentes de abastecimiento de aguas, que en el caso de regadío que utilizan aguas subterráneas aumentaría el riegos de producir intrusiones de agua de mar salina en los acuíferos costeros.

10.4.4. Distribución de los sistemas ganaderos (extensivos vs intensivos) en las distintas regiones

De una manera esquemática, los sistemas ganaderos intensivos se localizan en áreas donde la producción de alimentos para los animales es cercana o, fundamentalmente, donde los centros de consumo están cercanos o los canales de comercialización son más viables.

En la figura 10.5 se presenta la distribución de especies ganaderas más importantes en el territorio español.

Salvo excepciones, cuantitativamente poco importantes, la ganadería de porcino y aves se explota en condiciones intensivas, en granjas de gran tamaño y con un alto grado de tecnificación.

El ganado vacuno de aptitud lechera ha visto modificados sus sistemas de explotación hacia condiciones intensivas, con un aumento en el tamaño de las explotaciones y ausencia de pastoreo en la práctica totalidad de las explotaciones en la actualidad. El ganado ovino lechero se encuentra en una situación transitoria hacia la intensificación, suponiendo más del 30% de las explotaciones aquellas que los animales se encuentran estabulados permanentemente y no realizan pastoreo.

En condiciones de pastoreo quedan, fundamentalmente, los sistemas de producción de ganado vacuno y ovino de aptitud cárnica teniendo en cuenta la limitación en rentabilidad económica de estos sistemas de explotación de madres en condiciones intensivas.

10.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

10.5.1. Cambio de sistemas

La delimitación de las diferentes zonas de la Península se hace necesaria para establecer grandes líneas de adaptación. Los efectos contrapuestos del cambio climático hacen posible que mejoren las condiciones ambientales de parte la Península mientras que los negativos sean desastrosos para las otras.

Por otro lado, son necesarios estudios específicos para los sistemas de mayor inercia, como son los cultivos leñosos. El sector del olivar, viña, cítricos, y frutales en general, necesita conocer las tendencias y el grado de incertidumbre asociadas a ellas, que variará en función de la zona.

Los sistemas agrícolas podrán adaptarse hacia una extensificación o forestación en las zonas en las que la inestabilidad se incremente, o en los que las ayudas de la UE, si se mantienen, lo potencien. La intensificación o estabilización por riego es la otra posibilidad a analizar.

10.5.1.1. Elección de especies y cultivares

Introducción de nuevos cultivos para las nuevas condiciones climáticas deberá abordarse desde el punto de vista agronómico estricto, para luego superponer las respuestas a las ayudas o subvenciones de la Política Agraria Común (PAC). En una primera aproximación se plantearía la elección sobre la base de la productividad y la optimización del uso del agua. Cultivares (variedades) de ciclo más largo pueden introducirse para contrarrestar la aceleración del desarrollo por mayores temperaturas.

En el caso de plantaciones leñosas, el incremento de temperatura, los veranos más extremados o el desplazamiento de las épocas de lluvia llevarán al replantear la elección de cultivares en las diferentes comarcas agrícolas, teniendo en cuenta que se espera una disminución de las heladas de primavera.

10.5.1.2. Cambios en las rotaciones de cultivos

En las zonas donde el agua sea más limitante, tendrán que establecerse las secuencias que optimicen el uso del agua. Por otro lado convendrá delimitar las nuevas zonas dónde el barbecho agronómico es imprescindible para mantener la estabilidad y sostenibilidad de los sistemas.

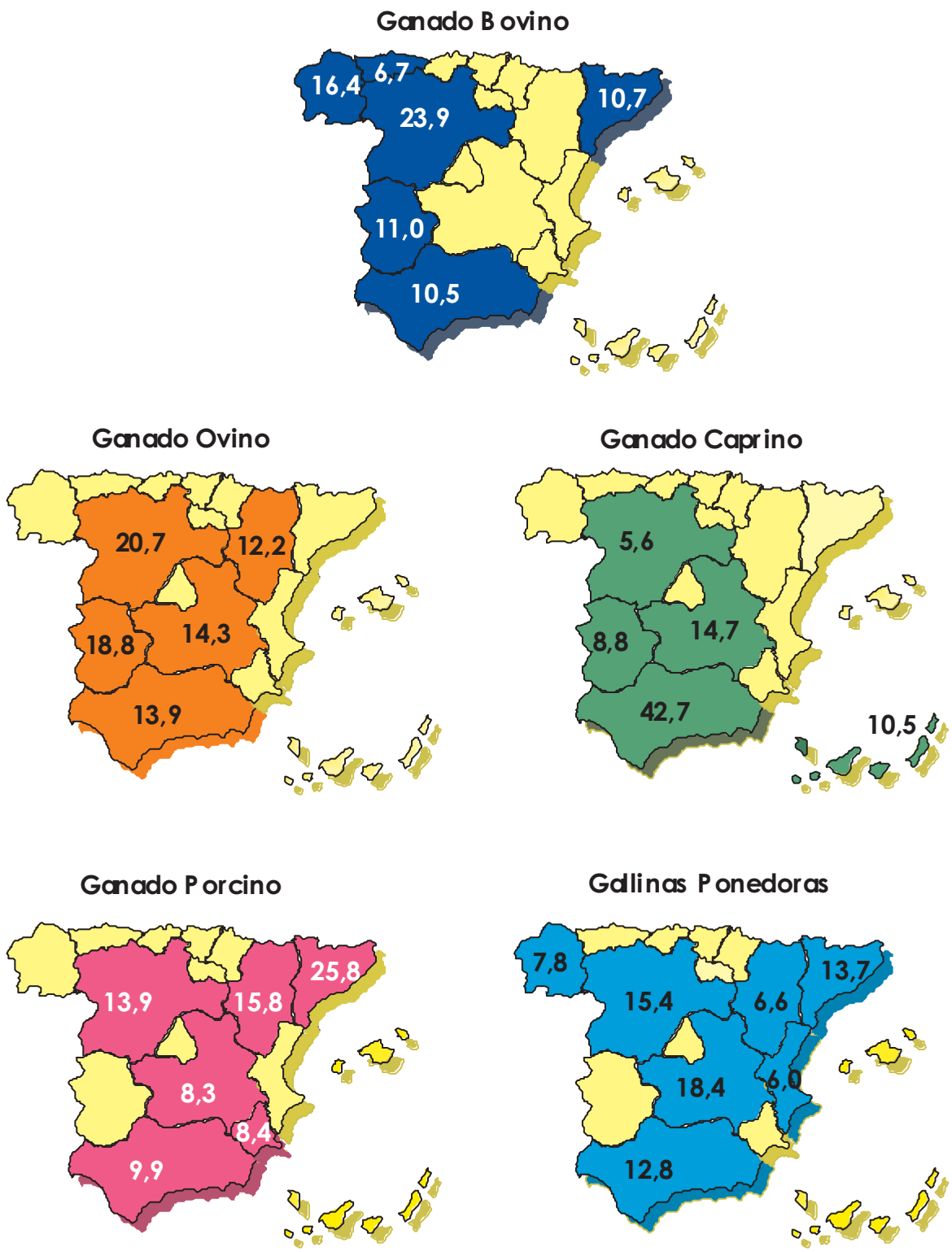


Fig. 10.5. *Mapa de distribución de los censos ganaderos (Encuestas ganaderas 2003, MAPA).*

10.5.2. Adopción de nuevas estrategias de manejo en secano y en riego

Una vez realizada la delimitación de zonas en función del impacto previsible, los cambios de cultivares, de fechas de siembra, de dosis de riego son estrategias que ya se han explorado y

que el agricultor puede adoptar fácilmente. Son las estrategias de optimización de recursos y las de mínimo impacto ambiental las que deberán estudiarse. La extensificación (menores insumos), los riegos estratégicos, o de apoyo, los riegos deficitarios son tecnologías en vías de desarrollo que tendrán que aplicarse en este nuevo entorno.

Es posible que sea necesario un nuevo diseño de control integrado de plagas y enfermedades en escenarios de clima futuro al poder cambiar la presencia, intensidad y temporalidad de éstas.

10.5.3. Adaptación de la Política Agraria Común (PAC)

Las normas colectivas son consideradas por el IPCC (2001b) como una de las herramientas para mitigar el impacto del cambio climático y que puede disminuir los costes de las adaptaciones. La PAC podría entonces considerarse dentro de esta perspectiva.

10.5.4. Reducción de la carga ganadera

Las alternativas que pueden ser planteadas, ante la reducción en la ingestión como consecuencia del cambio climático y las cuales necesitarán un contraste previo a su aplicación, son:

- Reducción de la carga animal (cabezas de ganado por unidad de superficie).
- Incremento de las necesidades de suplementación en los sistemas de pastoreo.
- Cambios en el manejo del pastoreo.
- Mayor coste energético y de instalaciones para el mantenimiento de la temperatura ambiental correcta.

10.5.5. Proteger zonas frente a cambios de uso

El efecto de la elevación de las temperaturas, además del que produzcan las variaciones en la precipitación, supone un desplazamiento hacia el norte de las zonas adecuadas para el cultivo (como hemos visto para los casos del maíz, trigo o cebada), y sobre todo de las producciones hortícolas. Este desplazamiento debe ser evaluado, ya que al efecto directo del cambio climático sobre una determinada zona se puede unir la pérdida de competitividad frente a otras y acelerar el proceso de transformación y abandono de la actividad agraria en zonas sensibles.

10.5.6. Valorar la idoneidad de hábitat y la capacidad de invasión mediante estudios climáticos y de hábitat

El esperado cambio climático va a producir una variación de los procesos parasitarios e infecciosos, como se ha indicado anteriormente, tanto en el espacio como en el tiempo. La mejor adaptación al cambiante escenario que una modificación climática puede suponer, estriba en el conocimiento estricto de las pautas biológicas y abióticas que regulan la asociación del parásito, el agente patógeno que pueda transmitir y el ambiente. En este sentido, es absolutamente prioritario el desarrollo de modelos de simulación que expliquen varios datos del comportamiento del agente con respecto al clima, como son capacidad de adaptación al biotopo (mapas de predicción de riesgo por una determinada plaga) y modelos que expliquen la dinámica estacional del proceso a estudiar. De la misma forma, los modelos deben incluir valoraciones de las implicaciones económicas a esperar en el caso de los diversos escenarios de cambio climático evaluables. Igualmente, los modelos de simulación deben incluir la componente del paisaje, entendido como los procesos ecológicos que tienen lugar en la microescala, y que son de gran interés a la hora de evaluar la composición del

hábitat como factor determinante de la existencia y abundancia del parásito. Con ello, se quiere indicar expresamente que los modelos basados en grandes superficies de terreno (modelos macroclimáticos) pueden tener un indudable valor epidemiológico, pero que debemos descender a la escala del microhábitat, con la complejidad que ello entraña, para comprender los verdaderos efectos del cambio climático sobre las poblaciones parasitarias. En lo relativo a los modelos sobre el comportamiento de las poblaciones de garrapatas, se han realizado importantes avances que permiten explicar en buena medida los efectos esperables. Sin embargo, es preciso generalizar estos modelos a otras especies y a todo el entorno geográfico español, amén de aumentar la resolución a la que el modelo es válido.

Es necesaria la imbricación de modelos de comportamiento del hospedador o de las modificaciones que el cambio climático pueda producir en la vegetación, para obtener una panorámica completa de los procesos parasitarios, ecológicos y epidemiológicos, subyacentes al cambio climático y que actúen sobre todos los miembros de la ecuación. De esta forma, se debe disponer de un modelo generalista, acoplado a las grandes predicciones de clima, sus efectos sobre la vegetación y los cambios en la dinámica parasitaria, afectada por estas variables.

En el caso de los nematodos parásitos, tales modelos ya existen, pero no son públicos, sino que han sido desarrollados por empresas privadas como estrategia de mercado. Es importante que tales modelos lleguen al sector de investigación, para poder plantear con ellos estrategias de adaptación adecuadas. Por otro lado, los modelos relativos a las parasitosis transmitidas por caracoles dulceacuícolas han sido convenientemente desarrollados, se han acoplado con tecnologías de información geográfica, y tienen un tratamiento simple en su forma, produciendo resultados claramente comparables con la realidad. Sin embargo, en España jamás se han llevado a cabo estudios aplicativos mediante estas tecnologías, por lo que carecemos del más mínimo dato sobre los efectos que cabría esperar bajo la impronta de diferentes variables ambientales.

10.5.7. Manejo adecuado integrado en resultados de los puntos anteriores, usando razas animales autóctonas

La utilización de razas autóctonas supone una importante decisión a la hora de optimizar el control frente a las diversas enfermedades parasitarias e infecciosas que aparecen en España. Estas razas presentan una natural adaptación a tales procesos, como consecuencia de una larga coexistencia. Por ello, la sustitución de razas importadas por razas autóctonas debe ser considerada como una interesante estrategia de adaptación al cambio climático y a sus repercusiones sobre las patologías previsibles.

Como se ha mencionado, es importante valorar el impacto que las diversas estrategias de manejo emanadas de estos modelos puedan tener sobre la economía ganadera. Es importante destacar factores tales como el valor nutricional de pastos. Es esperable, como se ha mencionado, que se produzcan cambios en la forma de utilización de los recursos agrarios por los animales y sus propietarios, como adaptación tendente a la búsqueda de nuevas zonas que presenten una carga parasitaria adecuada para el manejo animal. Es preciso pues tener en cuenta los factores económicos que intervienen en las nuevas relaciones de los animales con el hábitat, como parte integrante de los modelos mencionados anteriormente. Es necesario también incluir estudios de las pautas de tratamiento antiparasitario. Este hecho se basa a que, en la actualidad, el ganadero o el veterinario conocen los ciclos vitales parasitarios de la zona en la que tiene lugar la explotación animal. Este conocimiento es casi ancestral, y proviene de la continuada observación de la naturaleza. Si se produce la esperable variación de tales procesos, tanto en el espacio como en el tiempo, las pautas de tratamiento actualmente establecidas van a cambiar radicalmente. Ello implica un proceso de adaptación del profesional

veterinario y del ganadero, en función de la fuerza del impacto, gradual, y del cambio exponencial que cabe esperar en la respuesta evocada por los procesos parasitarios e infecciosos. En otras palabras, el tiempo en el que cabe esperar que se produzca la adaptación es corto, y debemos de tener preparadas las herramientas de evaluación necesarias para poder atender la demandad social que se producirá en esos momentos de reajuste.

10.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

10.6.1. Impacto ambiental: calidad de la base de los recursos y ecosistemas naturales

La evolución de la materia orgánica en los suelos agrícolas es difícil de predecir dada la interacción entre el manejo del cultivo y de los residuos de cosecha, y, la complejidad de los procesos involucrados (ver capítulo 8). En un escenario futuro las predicciones sobre contenido de agua en el suelo añadirán otra fuente de incertidumbre. La materia orgánica de los suelos afecta directamente a la capacidad de retención de agua y el suministro de nutrientes en un suelo agrícola con implicaciones directas sobre la productividad del sistema. En las zonas donde se pueda producir mayor biomasa, mayores temperaturas en el suelo pueden contrarrestar el incremento de materia orgánica a través de mayores tasas de mineralización.

Las mayores escorrentías asociadas a fenómenos tormentosos o mayor precipitación implican un mayor lavado de nitratos, disminuyendo la eficiencia del sistema, sino pudiendo afectar a ecosistemas y agrosistemas circundantes. Las proyecciones basadas en modelos de circulación general para España, aparecen tanto en zonas con incrementos, como en zonas con disminuciones en la escorrentía anual (IPCC 2001a) por lo que la utilización de mayores resoluciones es el siguiente paso necesario.

10.6.2. Demanda de agua y competencia con el sector industrial, ambiental y urbano

Un incremento en la población mundial y en el desarrollo económico lleva en general a un incremento en el consumo de agua, a pesar de la disminución por una mayor eficiencia en su uso en algunos países (IPCC 2001a). Esto implica que la competencia de estos sectores industrial y urbano, con los regadíos (regadíos tradicionales y futuras zonas que necesiten riegos estratégicos, ver apto 10.1.3.1) vendrá delimitada por los cambios en la demanda evapotranspirativa de los cultivos en repuesta a la temperatura y a las precipitaciones.

Por otro lado, las necesidades asociadas a los suministros de agua para mantener los caudales ecológicos y los recursos necesarios en humedales, lagos, etc. delimitarán también las disponibilidades de agua en los regadíos. No es superfluo insistir que los mercados de agua deberán adaptarse al incremento en la variabilidad que puede presentar la demanda de agua por los cultivos.

10.6.3. Principales repercusiones con los sectores alimentario, seguros

Las repercusiones para el sector alimentario son importantes a nivel mundial, cuando se analiza la capacidad de los sistemas agrarios en suministrar el alimento necesario a una población en expansión. Aquí queremos resaltar las repercusiones a más corto plazo con el sector seguros.

Son previsibles cambios en el tipo de daños que sufran los cultivos. Las mayores temperaturas alejarán el riesgo de heladas en determinadas zonas que habría que acotar, y lo minimizan en otras. Los riesgos asociados a estrés hídrico y de temperaturas tenderán a incrementarse, si bien también habrá que acotar las probabilidades por zonas o cuencas determinadas.

Los cambios en los límites de cultivo pueden llevar a la aparición de plagas y enfermedades en nuevas zonas. Si la frecuencia de años extremos se incrementa será necesario una colaboración entre los sectores agrario y de seguros para establecer nuevas pautas en las propuestas.

10.6.4. Repercusión de la ganadería sobre el mantenimiento de la población rural y el paisaje

En muchas zonas del país (montaña, dehesa, etc.) la actividad ganadera es prácticamente la única actividad agraria capaz de mantener un tejido económico ya que otras actividades como el cultivo no es posible por condicionantes climáticos, orografía, etc. En la actualidad, la actividad ganadera de estas zonas parece evidente que ha de pasar por la obtención de productos (alimentos, pieles, lana, etc.) diferenciables en el mercado y de una calidad garantizada (trazabilidad), productos con una demanda creciente ya que los consumidores, cada vez más, están dispuestos a adquirir unos productos que hayan sido obtenidos en adecuadas condiciones de bienestar animal y, en el caso de la ganadería pastoril, con un claro efecto beneficioso en la conservación del medio natural utilizando recursos que de otra forma se perderían. No tendría sentido el desarrollo de sistemas de producción masiva en esas zonas por el riesgo medio ambiental que conllevaría y por la menor competitividad al estar alejados de las zonas de producción cerealista.

Una disminución de la disponibilidad de pasto en determinados momentos del año, como consecuencia del cambio climático podría acarrear un sobrepastoreo y riesgo de erosión de estas áreas ya que no fácil variar la presión de pastoreo (carga ganadera) disminuyendo y aumentando el número de animales de la explotación.

El número de explotaciones ganaderas, de carácter familiar, que es posible mantener en una zona determinada es consecuencia de su rentabilidad para permitir unos ingresos mínimos a la unidad familiar. A su vez, la rentabilidad de una explotación depende del número de animales que posea y de la producción de cada animal. En este sentido, como ejemplo, para lograr ingresos similares, una explotación de ganado vacuno de aptitud mixta (carne y leche) requiere un menor número de animales que una explotación dedicada exclusivamente a la producción de carne por la menor producción individual de estas últimas. En los últimos años, en las zonas de montaña de Aragón, Castilla y León, Cataluña, etc. se ha producido la reconversión ganadera con el incremento de las explotaciones de gran tamaño y producción exclusivamente cárnica ya que requieren una menor dedicación en mano de obra y el uso del territorio no es limitante por la despoblación ocurrida.

10.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

10.7.1. Efecto incremento de la variabilidad sobre la estabilidad y sostenibilidad de sistemas agrícolas. Efecto de los años extremos

Los sistemas agrícolas más inestables y menos sostenibles en clima actual, pueden desaparecer si la frecuencia de años extremos secos se incrementa. Asimismo el posible incremento de fenómenos tormentosos, más próximos a climas subtropicales, pueden incrementar la erosión de suelos agrícolas todavía manejados con laboreo convencional. Por ejemplo, las estimaciones actuales de erosión en olivar son ya demasiado elevadas, pudiendo llegar a 40 t/ha año.

10.7.2. Capacidad de adaptación de sistemas de baja productividad

En la actualidad, el déficit hídrico, las bajas temperaturas de estaciones invernales largas, el bajo contenido en materia orgánica son los factores que más afectan a los sistemas que

presentan en la actualidad una baja productividad. Por lo tanto su capacidad de adaptación dependerá de las zonas en las que aparezcan estos sistemas y las tendencias previstas en le cambio de las precipitaciones.

10.7.3. Capacidad fijadora de CO2 de los sistemas agrícolas. Influencia del manejo del suelo y los residuos de cosecha

La mitigación del cambio climático propone disminuir la emisiones de CO_2 (IPCC, 2001b). La fijación de CO_2 por las plantas herbáceas y leñosas a través de la fotosíntesis es una de los procesos considerados. Los estudios actualmente se centran en las estimaciones de la fijación neta de CO_2, la respiración asociada al mantenimiento y crecimiento de la biomasa vegetal, las fijaciones y emisiones del suelo en función del manejo de éste y de los residuos de cosechas.

Otra fuente de emisiones de los gases invernadero está en los arrozales mantenidos bajo inundación (emisión de metano y óxidos de nitrógeno) y las pérdidas de óxidos de nitrógeno asociados a los procesos del ciclo de nitrógeno en los sistemas agrícolas.

10.7.4. Capacidad de adaptación de los animales

Los animales poseen mecanismos de defensa para su adaptación al cambio climático con consecuencias directas en términos productivos. En condiciones intensivas la adaptación pasará por unos menores rendimientos productivos al poder afectar a la capacidad de ingestión si se superan los límites del intervalo de neutralidad térmica. Además, en estas condiciones puede ser necesario una mayor disponibilidad de espacio, sistemas de ventilación o refrigeración, etc. y, en consecuencia, mayores inversiones.

En los sistemas ganaderos extensivos, dependientes de los recursos pastables, la posibilidad, dentro de ciertos límites, de las reservas corporales de los animales como almacenaje de energía en los momentos de máxima disponibilidad de recursos y su utilización en los momentos de carencia, junto con una adaptación de los ritmos fisiológicos haciendo coincidir los momentos de máximas necesidades nutritivas (final de gestación e inicio de lactación) con la máxima disponibilidad de pasto también son mecanismos cuyos limites deberían ser estudiados desde el punto de vista productivo.

10.7.5. Tiempos de reacción al cambio por parte de los parásitos

En estos momentos, se desconoce la velocidad de respuesta de los parásitos al cambio climático aunque se presupone rápida. Algunos estudios de laboratorio indican que esta respuesta podría producirse en el lapso de una o dos generaciones parasitarias (aproximadamente un año), lo que implicaría la desaparición de especies no adaptadas al nuevo clima en este plazo de tiempo, con una sustitución más lenta por las nuevas especies invasoras. Dado que el cambio climático es gradual, cabe esperar que las acentuaciones estacionales mencionadas, así como el desplazamiento de las especies se produzca de forma gradual y continua.

10.7.6. Indicadores

El único indicador de utilidad es la supervisión constante de una serie de “zonas guía” elegidas por sus características de clima, capacidad para albergar determinadas especies parasitarias, y uso ganadero. Muestreos mensuales en tales zonas pueden permitir la monitorización de las actividades parasitarias con objeto de conocer las modificaciones que se están produciendo.

10.7.7. Baja precisión espacial

Este es uno de los problemas más graves a la hora de evaluar modelos que estudien el cambio climático y sus implicaciones en la dinámica de las poblaciones parasitarias. Los actuales modelos de cambio climático evalúan grandes unidades atmosféricas de un tamaño típico de 50 km, lo cual es extremadamente grande para los modelos que actualmente se están evaluando para predecir los cambios en la presión parasitaria. Las características del hábitat tienen una influencia capital en la distribución y abundancia de ciertas parasitosis (por ejemplo, garrapatas, Estrada-Peña, en prensa), por lo que se deben encontrar sistemas para acoplar ambos tipos de modelos, junto con aquellos que evalúen la probabilidad (normalmente con metodologías de tipo Markoviano) de cambio en el tipo de hábitat. Es preciso evaluar la posibilidad de un "*downscaling*" en los modelos de clima atmosférico y su acoplamiento con los de cambio de hábitat y comportamiento parasitario.

10.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

10.8.1. Dificultad para detectar cambios: adaptación tecnológica en agricultura

La adopción de nuevas tecnologías en la agricultura impide que las posibles tendencias o cambios en el clima durante el último siglo se puedan detectar. Las modificaciones hechas en la variedades cultivadas de cereales en los años 60, con la Revolución Verde, permitieron incrementos espectaculares en los rendimientos, elevándose los techos productivos en todos los sistemas agrícolas de la mayor parte del planeta. Las nuevas tecnologías de riego y fertilización, además del control de malas hierbas, enfermedades y plagas han afectado positivamente a los rendimientos alcanzados.

10.8.2. Utilización de modelos dinámicos de simulación de cultivos y clima. Generación de indicadores

Los modelos dinámicos de simulación de cultivos pueden describir diariamente los procesos de intercepción de radiación solar por las hojas, generación de biomasa y reparto entre la parte aérea y las raíces, los balances de agua y de nitrógeno, y finalmente la generación del rendimiento. La posibilidad de cuantificar las interacciones entre el cultivo, especificando la variedad, el suelo y el clima ha hecho de estos modelos unas herramientas potentes tanto en investigación como en planificación y desarrollo agrícola. Estos modelos se han desarrollado para cultivos herbáceos y empiezan a generarse los correspondientes a cultivos leñosos.

Los resultados obtenidos con estos modelos sobre rendimientos, producción de biomasa, consumos de agua, necesidades de riego, fenología, son ya unos indicadores que integran las interacciones a lo largo del ciclo del cultivo (Díaz-Ambrona y Mínguez, en revisión).

10.8.3. Disponibilidad de datos productivos de los sistemas ganaderos en series temporales largas

Los modelos dinámicos utilizados en los estudios de sistemas ganaderos permiten obtener una predicción de la respuesta animal a cambios en las condiciones ambientales (humedad, temperatura, etc.) en condiciones de estabulación (intensivas).

En condiciones de pastoreo (extensivas) también es posible una predicción del efecto de la climatología (humedad, temperatura, etc.) sobre la respuesta en producción vegetal de una determinada zona a lo largo del año. A partir de la información cuantitativa y cualitativa de la materia vegetal disponible es posible predecir la ingestión que los animales pueden realizar y conocidas las necesidades de los animales a lo largo de su ciclo productivo poder extrapolar en

que grado estas necesidades quedan cubiertas y cuando es necesario realizar una suplementación alimenticia o reducir la carga animal o establecer sistemas de uso del territorio en el que se aproveche la distinta disponibilidad de alimento a lo largo del año (ejemplo: los sistemas clásicos de trashumancia ganadera).

Existe información científico-técnica que permitiría la construcción de los modelos indicados, sin embargo los datos disponibles sobre la respuesta animal en series temporales largas son escasos, prácticamente inexistentes ya que la información disponible, por ejemplo sobre variación en censos animales en las distintas comarcas es consecuencia de multitud de factores que confluyen.

10.8.4. Indicadores (especies clave como mosquitos y garrapatas)

Existen una serie de parásitos que responden rápidamente a los cambios del clima, como son los mosquitos y las garrapatas. Una adecuada monitorización de las poblaciones de estos parásitos, en una serie de lugares clave (escogidos merced a sus características ecológicas) pueden permitir la evaluación real del impacto del cambio climático sobre este grupo de parásitos, además de conocer la importancia de estos hechos sobre la vehiculación de procesos infecciosos por estos vectores.

10.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

10.9.1. Cambios en la Política Agraria Común (PAC). Incentivos para la adopción de tecnologías de menor impacto ambiental en escenarios de clima futuro. Seguros agrarios

La acción coordinada de varios países puede hacer disminuir los costes asociados a paliar el efecto del cambio. La PAC puede considerarse el marco de futuras normas colectivas que potencien las innovaciones necesarias para las adaptaciones (IPCC 2001b).

Los incentivos a la aplicación de operaciones de cultivo que tengan menor impacto ambiental en clima actual, es uno de los primeros pasos a adoptar para facilitar la transición al manejo de cultivos en los escenarios de clima futuro. En efecto, el impacto ambiental del manejo inadecuado del suelo y de los residuos de cultivo, la ineficiente utilización del agua de riego, la contaminación por nitratos, etc. son actualmente fuente de preocupación, por lo que en escenarios de mayor variabilidad estacional e interanual, o de mayor déficit hídrico, seguirían siendo líneas estratégicas de actuación.

Los seguros agrarios en España pueden ser unos de los pilares de la sostenibilidad de determinados sistemas agrícolas en zonas con impacto negativo por el cambio climático.

10.9.2. Ordenación del territorio

La delimitación de grandes zonas de impacto, tanto positivo como negativo, del cambio climático sería básica para la planificación hidrológica y de otros recursos. La productividad de los diferentes sistemas agrícolas y sistemas de cultivos, en cada una de estas zonas, facilitaría el establecimiento de propuestas de actuación.

10.9.3. Optimización del uso de agua. Gestión de los recursos hídricos

Dado que la Península Ibérica y en concreto España, está por un lado en un área de transición entre clima subtropical y mediterráneo, y por otro, en los análisis previos del IPCC (2001a),

aparecen zonas afectadas de manera diferente, la gestión del agua será uno de los asuntos más complejos a tratar. La gestión del reparto de agua entre los sectores en competencia, debería dar prioridad, entre otras consideraciones fundamentalmente económicas y sociales, a los sistemas que mejor optimicen el uso del agua, medido como eficiencia en el uso del agua de lluvia o de riego. En el establecimiento de las transacciones de agua deberán incorporarse al análisis conceptos como el de sostenibilidad, productividad, estabilidad y equidad de los sistemas, todos ellos cuantificables.

10.9.4. Cambios en el manejo de los animales

El efecto del cambio climático en las explotaciones ganaderas tiene la particularidad de coincidir con la tendencia indicada hacia la intensificación de los distintos sistemas ganaderos. En estos sistemas, cada vez más intensificados, es donde la repercusión económica de las variaciones originadas por el cambio climático son más importantes ya que supondrán una reducción de los rendimientos productivos y un incremento de las inversiones para contrarrestar este efecto. Un cambio hacia sistemas extensivos permitiría una mayor capacidad de reacción ante los cambios pero el limitante que supone el factor humano (mano de obra de las explotaciones) en la actualidad hace muy difícil esta reversión de los sistemas ganaderos.

10.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Es necesario resaltar que la toma de decisiones para paliar el efecto del cambio climático, será un proceso secuencial bajo un entorno de incertidumbres (IPCC 2001b). Estas incertidumbres se están cuantificando y están disminuyendo conforme las investigaciones avanzan.

10.10.1. Los modelos de simulación como herramientas para evaluación de impactos. Conexión con modelos regionales de clima de alta resolución.

La metodología a aplicar se está generando actualmente en el proyecto de investigación dentro del V Programa Marco de la EU (PRUDENCE: *Prediction of Regional scenarios and bcertainties for Defining EuropeaN Climate change Risks and Effects* , EVK2-2001-00156).

10.10.2. Generación de mapas de impacto y propuesta de indicadores para diseño de estrategias

La productividad de los cultivos es uno de los indicadores más importantes al representar la integral de los efectos de factores ambientales soportados a lo largo del crecimiento y desarrollo de éstos. La(s) productividad(es) respecto a la superficie utilizada (rendimiento), respecto a ET (EUA), respecto a la cantidad de agua de riego (EUI) son cuantificables y han plasmado a lo largo de los años los cambios tecnológicos.

El impacto del cambio climático deberá plasmarse con indicadores de este tipo y en mapas en los que los diferentes tipos de suelos y principales cultivos o plantaciones estén representados, facilitándose el análisis económico.

10.10.3. Previsión de cambios en los consumos de agua en secano y regadío. Efecto sobre Plan Nacional de Regadíos y Plan Hidrológico Nacional

Como se planteó en el apartado 10.4.2, la traslación de las previsiones de variación en las precipitaciones, al suministro de agua que dispondrán los cultivos, en particular los hortofrutícolas es difícil pero abordable. La disponibilidad de agua para las plantaciones

frutales, los olivares y viñas es uno de los temas cruciales a estudiar, también en conexión con los otros sectores involucrados en el presente proyecto. Un paso fundamental es la estimación de las necesidades de agua o ET de los cultivos en clima futuro.

El mayor conocimiento de las respuestas de los cultivos al cambio de concentración del CO_2, la mejora de la simulación de cultivos y de impactos, las bases de datos que se generan actualmente, permite generar los mapas de impactos que acotarían las zonas agrícolas y las tendencias de los cambios.

Estos Planes se pueden considerar como futuras normas colectivas que potencien las innovaciones necesarias para las adaptaciones tal y como se presenta de manera genérica en IPCC (2001b).

10.10.4. Estrategias para la conservación de recursos base

Dada la extensión de los sistemas de secano y de los sistemas de baja productividad se recomienda incluirlos en los estudios de impacto. La calidad de los suelos está directamente relacionada con la capacidad de retención de agua por el suelo, el retorno de los residuos de cosecha al suelo, el mantenimiento de cubiertas en las plantaciones, las tasas de mineralización de materia orgánica, etc. y, todos estos factores se ven afectado por las técnicas de manejo adoptadas por el agricultor.

Se plantearía el establecimiento de grandes líneas de actuación para los diferentes sistemas de cultivos, como unas “Buenas Prácticas Agrícolas” (“*Good Agricultural Practices*” según la FAO).

10.10.5. Efecto de los años extremos, previsión y adaptaciones

Una evaluación del impacto de los años extremos por la metodología descrita anteriormente, sería la base del análisis económico necesario para optar por la estrategia de mitigación adecuada en el contexto de las necesidades de desarrollo, de sostenibilidad y de equidad (IPCC 2001 a y b).

10.10.6. Respuesta animal (ingestión y bienestar) y capacidad de adaptación a cambios climáticos

La investigación necesaria para poder predecir con fiabilidad el efecto del cambio climático pasaría por conocer el efecto de las variaciones de temperatura, humedad, etc. sobre la capacidad de ingestión y los parámetros indicativos de bienestar animal y, en consecuencia, sobre la respuesta animal y la calidad de los productos obtenidos en estas condiciones. Con esta información y la ya disponible de experiencias previas sería posible la construcción de modelos dinámicos indicados en el apartado 10.8.3.

10.10.7. Evaluación económica de la repercusión productiva del cambio climático

La evaluación económica de la repercusión en la productividad y en la implementación de adaptaciones se debe basar en la cuantificación de indicadores propuestos no sólo por este sector agrario sino también por los más relacionados en la actualidad, como por ejemplo: recursos hídricos, recursos edáficos, sector de seguros, sector forestal.

Esto implicará un análisis más completo que el de coste-beneficio, siendo recomendable un análisis multicriterio, aplicando técnicas de programación compromiso.

10.11. BIBLIOGRAFÍA

Almería de la Merced S. 1994. Influencia de los factores raciales, medio-ambientales y de manejo en la epidemiología de la gastroenteritis parasitaria bovina en sistemas extensivos de montaña. Descripción de la hipobiosis larvaria. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.

Díaz-Ambrona C.H. y Mínguez M.I. 2001. Cereal-legume rotations in a Mediterranean environment: Biomass and Yield Production. Field Crops Research 70: 139-151.

Estrada-Peña A. 2001. Distribution, abundance, and habitat preferences of *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) in northern Spain. Journal of Medical Entomology 38: 361-370.

Estrada-Peña A. (en prensa). An approach to the dynamics of tick populations under the graph theory. Landscape Ecology.

Guereña A., Ruiz-Ramos M., Díaz-Ambrona C.H., Conde J.R. y Mínguez M.I. 2001. Assessment of climate change and agriculture across geographical areas in Spain using a General and a Regional Climate Model. Agronomy Journal 93: 237-249.

Gray J. 1982. The development and questing activity of *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) under field conditions in Ireland. Bulletin of Entomological Research 72: 263-270.

Iglesias A. y Mínguez M.I. 1995. Perspectives for maize production in Spain under climate change. En: Rosenzweig C., Allen Jr. L.H., Harper L.A., Hollinger S.E. y Jones J.W. (eds.). Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts. Special Publication nº 59.Ch. 13. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. Pgs. 259-273.

IPCC 1997. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. IPCC Special Report. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 2001a. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.

IPCC 2001b. Mitigation. A Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.

Jones C.A., Kiniry (eds.) 1986. CERES-Maize: A Simulation model of Maize Growth and Development. Texas A & M University Press. College Station, TX. 194 pgs.

Lindgren E. 1998. Climate and tickborne encephalitis. Conservation Ecology 2: 1-14.

MAPYA, 2003. Estadísticas agrarias. http://www.mapya.es/es/agricultura/pags/hechoscifras/cifras.htm

Mínguez M.I. e Iglesias A. 1996. Perspectives of future crop water requirements in Spain: the case of maize as a reference crop. En: Angelakis A. y Issar A.S. (eds.). Diachronic climatic changes impacts on water resources with emphasis on mediterranean region. NATO- Advanced Research Workshops Series. Sub-series I: Global Environmental Change. Springer-Verlag, New York. Pgs. 301-317.

Mínguez M.I., Guereña A., Díaz-Ambrona C.G. y Ruiz-Ramos M. 1998. Impacto en el consumo de agua de los regadíos españoles asociado al cambio climático previsible. CEDEX: P97-0260-329.

Mínguez M.I., Guereña A., Díaz-Ambrona C.G. y Ruiz-Ramos M. 1998. Aplicación de los modelos regionales de clima a la predicción de los posibles efectos del cambio climático en las dotaciones de riego. CEDEX: P97-0260-329B.

Otter-Nacke, S.J., Ritchie, T., Godwin, D. y Sigh, U., 1991. A User´s Guide to CERES Barley v. 2.10. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, A.L.

PRUDENCE: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeaN Climate change Risks and Effects (EVK2-2001-00156).

Randolph S.E., Green R.M., Hoodless A.N. y Peacey M.F. 2002. An empirical quantitative framework for the seasonal population dynamics of the tick Ixodes ricinus. International Journal of Parasitology 32: 979-989.

Randolph S.E.., Miklisova D., Lysy J., Rogers D.J. y Labuda M. 1999. Incidence from coincidence: patterns of ticks infestations on rodents facilitate transmission of tick-borne encephalitis virus. Parasitology 118: 177-186.

Reilly, J., Tubiello, F.N., McCarl, B. y Melillo, J. 2001. Impacts of climate change and variability on agriculture. In : US National Assessment Foundation Document. National Assessment Team, US Global Change Research Program. Washington DC.

Ritchie J.T. y Otter S. 1985. Description and performance of CERES-wheat: A user orientated Wheat Yield Model. USDA-ARS, ARS-38. Pgs. 159-175.

Rodriguez D., Ewert F., Goudriaan J., Manderschaid R., Burkart S., Mitchell R.A.C y Weigel H.J. 2001. Modeling the response of wheat canopy assimilation to atmospheric CO_2 concentrations. New Phytologist 150: 337-346.

Rosenzweig C. y Hillel D. 1998. Climate Change and the Global harvest. Oxford University Press, UK.

Serrano E., Lavín P. y Mantecón A.R. 2002. Caracterización de los sistemas de producción de ganado vacuno de carne de la montaña de León. Valles del Esla, S.A. León (España).

Soulsby E.J.L. 1982. Helminths, Arthropods and protozoa of domesticated animals. Tea & Febiger Publishers, Philadelphia, USA.

Stöckle C.O. y Nelson R. 1994. Cropping Systems Simulation Model, User's Online Manual. Washington State University.

Soulsby, E.J.L. 1982. Helminths, Arthropods and protozoa of domesticated animals. Tea & Febiger Publishers, Philadelphia, USA.

Tsuji G.Y., Uehara G. y Balas S. (eds). 1994. DSSAt v3, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

11. IMPACTOS SOBRE LAS ZONAS COSTERAS

Antonio Cendrero Uceda, Agustín Sánchez-Arcilla Conejo y Caridad Zazo Cardeña

Contribuyentes

T. Bardají, C. J. Dabrio, J. L. Goy, J. A. Jiménez, C. Mösso, V. Rivas, L. Salas, J. P. Sierra, H. Valdemoro

Revisores

I. Losada, R. Medina, C. Peña, J. Rodríguez-Vidal, F. Vilas

RESUMEN

Los principales problemas del cambio climático en las zonas costeras se relacionan con potenciales cambios en la frecuencia y/o intensidad de las tormentas así como con el posible ascenso del nivel medio del mar (NMM). En cuanto al nivel del mar, las previsiones del IPCC para fin de siglo se han ido reduciendo según disponía de datos más fiables desde 50-90 cm (IPCC 1998) a 13-68 cm (IPCC 2001). Los valores de INQUA (International Union for the Study of Quaternary Sea-Level Change and Coastal Evolution Commission) y del IGCP (*International Geosciences Programme Projects* 369 and 437) son aún más modestos: 10-20 cm.

Para las costas del E y S de España los datos disponibles indican una tendencia generalizada de estabilidad o ligero descenso del NMM, aunque localmente la subsidencia pueda enmascarar este efecto (por ejemplo delta del Ebro). Esta tendencia se manifiesta en progradación costera crecimiento de flechas litorales relleno de estuarios y desaparición de humedales. Por el contrario en la costa N los datos indican una tendencia al ascenso con tasas de 3-4 mm/año en la segunda mitad del siglo 20. Esto se une a observaciones concretas que muestran una reducción marcada de muchas playas confinadas retroceso de frentes dunares y acantilados “blandos” o adelgazamiento y/o rotura de flechas litorales difícilmente atribuibles a reducción en el aporte de sedimentos dado que datos recientes indican al contrario aumentos notables de la tasa de sedimentación en estuarios a lo largo del siglo pasado.

Por otro lado diversos trabajos muestran que el NMM se situó casi 1 m por encima del actual hace aproximadamente entre 5500 y 2000 años en momentos en los que las condiciones climáticas fueron similares a las que se esperan para finales del presente siglo.

A partir de esos datos se puede considerar que un ascenso de alrededor de 50 cm para finales de siglo es un escenario razonable. Una hipótesis pesimista bastante menos probable pero no descartable sería un ascenso del orden de 1 m, correspondiente con el máximo de algunas predicciones y con los niveles pasados antes indicados. Esta situación parece bastante menos probable en la costa S y E que en la N.

En el caso de una hipotética subida generalizada del nivel medio del mar (NMM) mar, las zonas más vulnerables serán los deltas y playas confinadas o rigidizadas. La parte del litoral español formada por acantilados de rocas resistentes no presentará problemas especiales. Sin embargo hay un peligro potencial de estabilidad de las costas formadas por acantilados constituidos por materiales incoherentes (no muy significativo). Especulando con el escenario de 0.5 m de máximo ascenso posible en el Cantábrico oriental podría suponer la desaparición del 40 % de las playas siempre y cuando no tenga lugar un aumento de la alimentación de arena (natural o artificial) a esas playas. Un ascenso relativo del NMM de 0.50m sin respuesta sedimentaria asociada supondría la desaparición de alrededor del 50% del delta del Ebro.

No obstante estimaciones más precisas sobre la previsible evolución de este tipo de sistemas litorales deberían tener en cuenta las variaciones en la altura e intensidad del oleaje y de la marea meteorológica.

En las costas bajas (deltas humedales costeros y zonas de uso agrario o construidas en el entorno de estuarios o en llanuras aluviales costeras), ese hipotético ascenso del NMM podría implicar una inundación de las mismas. En el Cantábrico oriental podría suponer la inundación de parte de las zonas bajas estimada en 23.5 km^2. En el Mediterráneo y Baleares y suponiendo un máximo de 0.5 m, las zonas más amenazadas aparte de los deltas ya mencionados (Ebro y Llobregat) son la Manga del Mar Menor (unos 20 km), las lagunas de Cabo de Gata (5 km) y en el Golfo de Cádiz alrededor de 10 km de la costa de Doñana y unos 100 km^2 de marismas. Parte de esas zonas están ocupadas por edificios o infraestructuras pero muchas de ellas

tienen uso agrícola o parque natural y podrían permitir la formación de nuevos humedales que compensarían por desplazamiento la previsible pérdida de los que sean anegados.

Es de señalar que adicionalmente a los impactos potenciales derivados del cambio climático otros factores de origen antrópico tales como el aporte de sedimentos por los ríos y las obras costeras son también cuantitativamente muy influyentes en la estabilidad del litoral a corto plazo.

Como estrategias preventivas o de adaptación principales se recomienda actuar de inmediato sobre los factores humanos relacionados con la estabilidad del litoral. Entre estos merecen ser destacados el mantenimiento de descarga y aportes sólidos de los ríos como solución al "origen" del problema (la falta de material sedimentario). Como solución a los "síntomas" del problema (retroceso o movilidad excesiva de la costa) pueden mencionarse la estabilización de playas y dunas la construcción de obras para limitar la capacidad de transporte del oleaje incidente y las aportaciones artificiales de sedimento. En otra categoría están las actuaciones para la protección de valores naturales (ordenación rigurosa del territorio para asegurar el mantenimiento y recuperación de zonas valiosas). También se considera necesario delimitar e inventariar las áreas y elementos afectables por el ascenso del nivel del mar, el oleaje y la marea a fin de definir donde aplicar estrategias de abandono y retroceso o de protección. Actuar sobre dichos factores contribuirá en cualquier caso a paliar los futuros impactos del cambio climático independientemente de las incertidumbres asociadas a magnitud de los mismos.

11.1. INTRODUCCIÓN

La zona costera constituye la interfase entre la atmósfera la hidrosfera y la litosfera lo que la hace especialmente dinámica y sensible a los cambios climáticos. El carácter de interfase confiere a la franja litoral una gran diversidad de ambientes y recursos y la convierte en un área especialmente atractiva para los asentamientos humanos tanto como lugar de residencia como por la gran variedad de actividades productivas que se pueden implantar en ella. El resultado es que alrededor de un 60% de la población se concentra cerca del litoral la mayor parte de ella a pocos kilómetros de la línea de costa (Nicholls y Branson 1998).

11.1.1. Tipos de costa

Dentro del litoral la vulnerabilidad de la zona costera ante los potenciales impactos derivados del cambio climático depende de las características de los sectores o grandes "unidades ambientales" que la constituyen. En este análisis se han distinguido los siguientes grandes tipos de costa:

Costas bajas asociadas a desembocaduras de cursos de agua

En las cuales la interacción entre los ecosistemas y/o actividades humanas y los cambios que afecten al océano o a los caudales fluviales puede dar lugar a problemas especiales.

Estuarios bahías y rías. Entrantes de dimensiones muy diversas alrededor de los cuales se suelen situar costas bajas con humedales y amplias extensiones de zonas intermareales y playas en el interior o en la entrada. Son las zonas de mayor impacto potencial tanto por su naturaleza como por los asentamientos que soportan.

Deltas. Salientes formados en la desembocadura de cursos de agua cuyo aporte de sedimentos supera la capacidad de arrastre de las corrientes y oleaje marinos. No existen en la costa norte por las características geomorfológicas y climáticas allí imperantes.

Humedales (marismas) y lagunas costeras

Zonas de costa baja no asociadas a estuarios ni a deltas normalmente separadas del mar por sistemas de flechas o cordones litorales y que pueden presentar vegetación marismeña se pueden encontrar, con distintas características a lo largo de todo el litoral español.

Playas

Playas confinadas: limitadas en su parte superior por a) acantilados o estructuras artificiales que restringen o impiden su migración hacia el interior ó b) en sus contornos laterales por estructuras también naturales (cabos) o artificiales (espigones) que limitan su dinámica longitudinal.

Playas no confinadas: tales como flechas litorales o cordones de arena adyacentes a costas bajas con posibilidades de desplazamiento hacia el interior. Cuando el volumen sedimentario y el clima de vientos lo permiten están asociadas a campos de dunas.

Ambas tipologías pueden encontrarse en todo nuestro frente litoral.

Acantilados

Acantilados "duros": formados por rocas compactas resistentes a la erosión. Son zonas que no presentan problemas significativos en relación con este tema y que no serán analizadas en lo sucesivo.

Acantilados "blandos": constituidos por materiales poco coherentes fácilmente erosionables y que presentan en la actualidad tasas anuales de retroceso de orden decimétrico o superiores.

El primer tipo predomina en el litoral norte y noroeste en el sur y en ciertas partes del litoral mediterráneo Español. Los segundos abundan en el suroeste peninsular y partes del levante.

Puertos

Zonas rigidizadas y protegidas por estructuras tipo dique vertical o en talud y que requerirían una re-evaluación de su fiabilidad estructural ante un posible cambio climático local.

11.1.2. Distribución relativa

El litoral mediterráneo está formado por una sucesión de tramos acantilados (habitualmente "duros") y costas bajas en las que desembocan ríos torrenciales denominados ramblas o rieras algunos de los cuales han dado lugar a deltas. El mayor de ellos es el del Ebro. En el litoral valenciano son abundantes los abanicos deltaicos de los ríos Mijares, Palancia y Belcaire que dan lugar a progradación costera. En la costa Sur, donde desembocan amplias ramblas también se han formado deltas entre los que cabe destacar los del Andarax y Adra (Almería) y el del Río Vélez (Málaga).

En zonas bajas se encuentran humedales (marismas) y lagunas costeras de extensión variable separadas del mar por flechas litorales acumuladas debido a la deriva litoral. En algunos casos aparecen humedales y lagunas asociados a los deltas. En general se trata de zonas ampliamente pobladas con gran desarrollo turístico que prácticamente se mantiene a lo largo de todo el año y que además presentan un alto valor ecológico.

El litoral atlántico sur (Golfo de Cádiz) y particularmente la costa de Huelva está constituido por acantilados labrados en materiales dominantemente blandos interrumpidos por desembocaduras fluviales que constituyen estuarios prácticamente colmatados. Todos ellos incluyen sistemas de flechas litorales arenosas formadas a favor de una deriva general hacia el E-SE que encierran hacia tierra sistemas de marismas la mayor de las cuales es la del Guadalquivir sobre la que se asienta el Parque Nacional de Doñana. También hay grandes bahías las mayores de las cuales son las de Cádiz y Algeciras.

En Canarias hay un abrumador predominio de los acantilados "duros", siendo escasa la longitud de playas (muchas de ellas de cantos), las cuales solamente alcanzan un desarrollo amplio en el S de Gran Canaria y en Fuerteventura.

El litoral galaico-cantábrico está constituido en su mayor parte por acantilados con una abrumadora proporción de acantilados "duros". En la costa gallega occidental los elementos paisajísticos predominantes son las rías mientras que en la costa cantábrica cobran especial importancia las bahías o rías con amplias zonas intermareales y marismas en su entorno. Las bahías y estuarios de este litoral acogen la mayoría de las poblaciones importantes de las comunidades situadas junto al mismo.

11.1.3. Valores y problemas

Los valores principales de la zona litoral incluyen la peculiaridad y escasez de determinadas unidades de alto interés ecológico (dunas marismas y zonas intermareales ciertos acantilados), así como otros recursos que sirven de base para importantes sectores económicos en particular el paisaje y las playas que son el sustento del sector de turismo y ocio.

Los problemas que se plantean en relación con la preservación y uso sostenible de los recursos citados se derivan de la presión que sobre los mismos ejercen las diferentes actividades que les afectan las cuales además a menudo entran en conflicto entre sí.

Así, la extensión y el estado de conservación de unidades valiosas han sufrido en las últimas décadas un fuerte deterioro como consecuencia de las presiones urbanísticas (en gran medida relacionadas con el turismo), especialmente aunque no solo el las costas del Mediterráneo Golfo de Cádiz y archipiélagos. También son notables los problemas de contaminación que afectan a algunos de estos medios especialmente albuferas marismas y zonas intermareales como consecuencia de actividades agrícolas industriales o residenciales (por ejemplo la albufera de Valencia Mar Menor, entorno de Doñana estuarios cantábricos etc.).

Los campos de dunas han experimentado en algunos casos una remoción total por explotaciones de arena (Almería Cantabria) y en muchos otros casos han sido destruidos por construcciones ubicadas sobre los mismos. La eliminación del papel de intercambio de las dunas con las playas junto con la regulación de las cuencas fluviales que ha reducido de forma notable el aporte de sedimentos y la construcción de distintas infraestructuras litorales son las principales causas de inestabilidad de los litorales de materiales no consolidados (playas deltas), especialmente en el Mediterráneo.

Las actividades de desecación y relleno de marismas y zonas intermareales para distintos tipos de usos han sido el principal factor de degradación de estas importantes unidades a lo largo del pasado siglo especialmente en la costa cantábrica. Afortunadamente en los últimos años se han acometido algunas acciones encaminadas a revertir ese proceso.

La sobre-explotación de acuíferos y la consiguiente intrusión salina es otro problema que afecta a muchos sectores de los litorales E y S.

Por último cabe señalar el fuerte deterioro de la calidad del paisaje (recurso de gran importancia tanto para el sector turístico como para la calidad de vida de la población), que se ha producido como consecuencia de las construcciones a lo largo del litoral proceso especialmente marcado en las costas mediterránea del Golfo de Cádiz y las islas.

En general la ordenación del territorio (distribución de usos y actividades) junto con la construcción de infraestructuras imponen una rigidez a la franja costera que necesita ser compatibilizada con el carácter inherentemente dinámico de la interfase mar-tierra.

Los problemas señalados representan también las principales amenazas sobre el litoral de cara al futuro y es dentro de ese contexto donde conviene considerar los posibles impactos derivados del cambio climático a fin de evaluar su importancia en comparación con los anteriores.

11.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

11.2.1. Clima actual. Estado de referencia

El clima actual de la zona costera galaico – cantábrica se caracteriza (medias para el periodo 1971-2000) por temperaturas suaves con medias anuales que oscilan entre 13.2º C (San Sebastián-Igueldo) y 14.8º C (Pontevedra), medias de las máximas entre 16.2º C (Igueldo) y 19.1º C (Pontevedra) y media de las mínimas entre 9.4º C (Bilbao-Sondica) y 11.4º C (Coruña). Las precipitaciones anuales oscilan entre 971 mm (Gijón) y 1909 mm (Vigo).

En la costa atlántica del Golfo de Cádiz el clima es de tipo mediterráneo con influencia atlántica y temperaturas medias anuales en torno a los 17-19º C, con máximas en verano de 35º a 40º C. Las precipitaciones anuales medias se sitúan por debajo de los 600 mm, con dos máximos (Noviembre-Diciembre y primavera).

El clima actual del sur y sureste de la costa mediterránea es semiárido con temperaturas medias en verano (julio) que aumentan desde el litoral valenciano (24.6ºC) al de Málaga (25.6ºC), para disminuir de nuevo hacia Gibraltar (24.4ºC) debido a la proximidad del Atlántico. Las medias anuales de invierno (enero) mantienen las mismas tendencias: Valencia (10.3ºC), Málaga (12.5ºC) y Gibraltar (12.4ºC). En las Islas Baleares las temperaturas medias varían entre los 18 y los 15º C, con medias invernales de 10º C y veraniegas de 24.5º C.

Las precipitaciones medias anuales mínimas (200-300 mm) se registran en la costa alicantina y almeriense y las medias más altas (500-750 mm) en las de Valencia y Málaga. Un rasgo peculiar es la aparición de desviaciones anormales de los valores de las precipitaciones con trombas que en pocas horas descargan gran volumen de agua a veces un tercio o la mitad de la precipitación media anual. Las precipitaciones medias en las Islas Baleares rondan los 500 mm y se concentran entre septiembre y mayo.

Vientos y oleaje

Los vientos dominantes tienen gran repercusión en la zona costera al influir directamente en la dirección del oleaje incidente y por ello en las corrientes costeras y el transporte sedimentario asociado.

En la costa catalana los vientos y oleajes predominantes son de levante (temporales más energéticos de oleaje al tener una mayor área de generación), del sur ("Garbo" en lengua vernácula) y del norte ("Tramontana") a noroeste ("Mestral"). La altura de ola significante media anual es inferior aunque próxima al 1.0 m y los temporales pueden alcanzar alturas de ola significante máximas próximas a 6.0 m con olas individuales de hasta 10.0 m (Gómez *et al.* 2001). En el litoral de Alicante y la parte oriental de Murcia el más influyente es el levante y el sureste aunque también actúan el poniente y el noroeste (Mistral). Hacia el sur, cobra gran importancia uno de los vientos más característicos del Mediterráneo occidental: el "Siroco" o lebeche viento del suroeste muy caliente en verano y de temperatura moderada en invierno que entre el Cabo de la Nao (Alicante) y Cabo de Gata (Almería), lleva asociadas tempestades de polvo que depositan un sedimento rojo conocido como "polvo sahariano" el cual influye notablemente en el ciclo vital de la flora y fauna de las humedales costeros. Entre Almería y Málaga tienen gran relevancia los vientos del suroeste asociados a las borrascas invernales. Suelen venir acompañados de lluvias y producen sobre-elevaciones del nivel local del mar que favorece la erosión del litoral.

En el Golfo de Cádiz los vientos dominantes son los del SW, a los que se debe la dirección de deriva litoral generalizada hacia el E en la costa de Huelva donde contribuye de forma importante a la formación de barras arenosas que crean extensas flechas litorales. No obstante

también son importantes los vientos del SE y E por su importancia en los procesos costeros erosivos asociados a temporales de Levante.

En Baleares y según sea la orientación de la costa los vientos más influyentes son del norte (Tramuntana), suroeste y sureste. Estos vientos acumulan campos dunares e inducen derivas litorales más o menos permanentes que favorecen el crecimiento de flechas litorales en la albufera de Alcudia y la antigua albufera de Palma hoy colmatada. Los temporales asociados a los vientos del sur pueden apilar olas que superan los 5 m de altura al sur de Mallorca.

En la costa galaico-cantábrica los vientos dominantes que influyen en la estabilidad del litoral son de componente NW, siendo los temporales de este tipo los que originan oleaje de gran altura que con frecuencia da lugar a episodios erosivos en las playas e incluso a la rotura de algunas flechas de arena. Es frecuente observar en playas confinadas de este litoral una marcada pérdida de arena a raiz de temporales de NW, la cual tiende a recuperarse con el cambio de condiciones. De hecho son numerosos los casos de playas de este tipo que desaparecen o se reducen fuertemente en época invernal y retornan en primavera-verano al reducirse la frecuencia de los citados temporales. En la costa de las rías bajas tienen también importancia los temporales asociados a vientos de componente SW.

Mareas

En la costa galaico-cantábrica el rango de mareas oscila entre algo menos de 1.5 m en mareas muertas y más de 4 m en mareas vivas desniveles que pueden verse acentuados en caso de sobre-elevaciones por efectos meteorológicos (temporales del NW, bajas presiones).

El Golfo de Cádiz es mesomareal con mareas astronómicas de rangos medios de 2 m (Dabrio *et al.* 1980).

La costa mediterránea es micromareal y la componente astronómica es del orden de los 8-10 cm pero en unión de la brisa diaria puede sobre-elevar el nivel medio alrededor de 30 cm en buen tiempo (Dabrio y Polo 1987).

Durante los temporales y los episodios prolongados de vientos de levante y poniente la sobre-elevación debida a la marea meteorológica puede superar el metro en los segmentos costeros orientados hacia ellos. El periodo de retorno de estos eventos excepcionales varía desde los 10 años para una sobre-elevación de 1 m a 100 años para 1.5 m (Sánchez Arcilla y Jiménez 1994).

11.2.2. Efectos de la variabilidad climática en la costa a partir de su evolución pasada

Las tendencias de cambio que se han establecido para la zona cantábrica durante el Holoceno (Figura 11.1); a partir de Menéndez Amor 1961a, 1961b, 1961c 1963, Menéndez Amor y Florchutz 1961, 1963, 1964, Mary 1968, 1973, 1975, 1979, 1985, 1992, Mary *et al.* 1975, Mariscal 1983, 1986, 1987, Peñalba 1989, Cearreta *et al.* 1990, Salas 1993, González *et al.* 1996, 1999), indican que hacia 5500 BP se alcanzó un máximo térmico relativo acompañado por un descenso en las precipitaciones medias. En los primeros siglos de nuestra Era hubo un nuevo episodio de calentamiento relativo al que siguió una etapa de enfriamiento que culminó en la Pequeña Edad de Hielo tras la cual se inició la tendencia al calentamiento que continúa en la actualidad. Las proyecciones hechas a partir de los modelos disponibles sugieren que durante el presente siglo podrían alcanzarse condiciones similares a las esos “máximos climáticos” holocenos.

Aunque los datos disponibles sobre las fluctuaciones del nivel marino en esas épocas no son demasiado concluyentes ya que presentan algunas contradicciones aparentes entre distintas zonas (Tabla 11.1), en el Holoceno cantábrico hay evidencias de fases transgresivas en las que el nivel del mar superó su posición actual separadas por pulsaciones regresivas según se desprende de los numerosos análisis (palinología, antracología, paleontología, arqueología, morfología, sedimentología, etc.) llevados a cabo por distintos autores en depósitos costeros emergidos y en rellenos estuarinos (Altuna *et al.* 1989, Cearreta 1992, 1993, 1994, 1998, Cearreta y Murray 1996, Edeso 1990, 1994, Flor 1983, 1995, Hoyos Gómez 1987, Mary 1968, 1975, 1979, 1985, Mary *et al.* 1975, Moñino 1986, Moñino *et al.* 1988, Mosquera *et al.* 1994, Rodríguez Asensio y Flor 1980, Rivas y Cendrero 1987, Santos Fidalgo *et al.* 1993, Santos Fidalgo y Vidal Romaní 1993a, Vidal Romaní *et al.* 1997). El primer avance marino corresponde a la transgresión flandriense claramente identificada y datada en otros lugares de Europa. En este momento el nivel del mar pudo alcanzar cotas entre 1 y 3 m por encima del nivel actual (según distintos autores). La transgresión marina posterior al inicio de la Era Cristiana parece haber sido de magnitud inferior.

En la costa del Golfo de Cádiz las secuencias polínicas deducidas a partir de los registros en sondeos perforados en lagunas costeras y estuarinas (Zazo *et al.* 1996, Yll *et al.* 2003), no señalan cambios térmicos apreciables durante el Holoceno medio y reciente pero sí una tendencia a la aridez a partir de ca. 5000 BP (Zazo *et al.* 1999). Esta tendencia general se ve interrumpida por episodios cortos (de escala centenaria) de mayor aridez entre 2700-2400 BP y 900-800 BP (Borja *et al.* 1999).

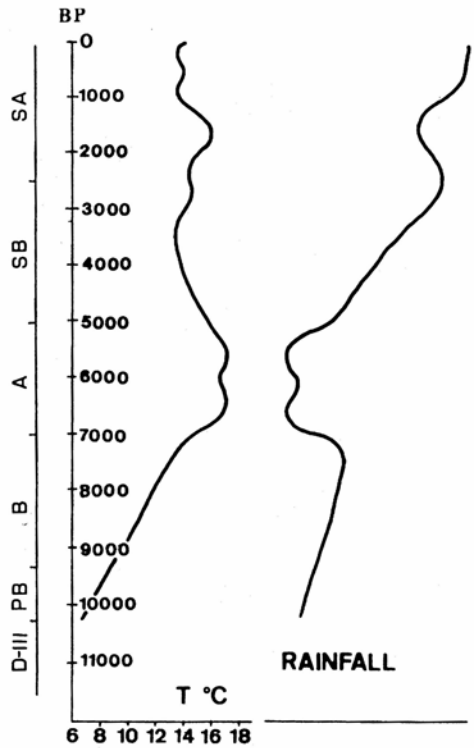


Fig. 11.1. *Tendencias de cambio que se han establecido para la zona cantábrica durante el Holoceno (González et al. 1996).*

Tabla 11.1. *Dataciones de niveles marinos holocenos en el Cantábrico. Nota: las cotas indican la posición de los depósitos respecto al nivel medio intermareal actual y no del nivel del mar en la fecha en que se indica.*

Muestra	Situación	Localidad	Edad BP	Altura	Autor
R. vegetales	Estuario IS 1	Río Bidasoa	7.810±130	- 25 m	Cearreta *et al*, 1992
R. vegetales	Estuario IS 2	Río Bidasoa	6.590±120	- 15,5 m	Cearreta *et al*, 1992
R. vegetales	Estuario IS 2	Río Bidasoa	6.630±120	- 2 m	Cearreta *et al*, 1992
Turba	Playa	Gerra I	5.880±130	Intermareal	Mary, 1.979
Troncos	Playa	Gerra III a	5850±200	Intermareal	Mary, 1.979
M. orgánica	Estuario	HerrikoBarra	5.810±170	Intermareal	Cearreta *et al*, 1990
Turba	Playa	Gerra II	5.300±120	Intermareal	Mary, 1979
Troncos	Playa	Gerra III b	5.250±90	Intermareal	Mary, 1.979
M. orgánica	Estuario	Herriko Barra	4.920±100	+ 2,5 m	Altuna *et al*, 1.990
Turba	Playa	Arroyo Bederna	4.770±110	Intermareal	Mary, 1.979
Turba	Playa	Ares	4.350±90	Intermareal	Santos-Vidal, 1993
Tronco	Playa	Trengandín	4.070±100	Intermareal	Cearreta, 1.993
Turba	Playa	Ares	3.970±50	Intermareal	Santos-Vidal, 1.993
Madera	Playa	Ares	3.450±100	Intermareal	Santos-Vidal, 1.993
Madera	Playa	Trengandín	3.080±100	Intermareal	Cearreta, 1.993
Tronco	Playa	Trengandín	2.890±70	Intermareal	Salas *et al*, 1996
Madera	Fluvial	Besaya-Torrelav.	2.780±80	- 0,5 m	Salas *et al*, 1996
R. vegetales	Estuario IS 2	Río Bidasoa	2.740±90	- 5 m	Cearreta *et al*, 1992
Carbón vegetal	Estuario	Xivares	2.150±110	+ 1 m	Mary, 1.968
	Rasa	Fontías	1.920±120	+ 1 m	Mary, 1975

En cuanto a las variaciones del nivel del mar, los estudios del relleno de los estuarios (Dabrio *et al.* 2000) y de los sistemas de flechas litorales (Zazo *et al.* 1994, Goy *et al.* 1996, Zazo *et al.* 1996) sugieren que una vez alcanzado el máximo holoceno (ca. 7000 cal BP), la tendencia general es al descenso del NMM, interrumpida por cortos intervalos de ascenso relativo de magnitud inferior al metro hacia 2700 BP y 500 BP.

Rodríguez Ramírez *et al.* (2000) han estudiado los sistemas de flechas litorales del Golfo de Cádiz observando que continúa la progradación costera y que en las últimas cuatro décadas (1956-1996) se han formado cinco crestas de playa.

En la costa mediterránea los análisis polínicos de testigos de sondeos perforados en desembocaduras fluviales del litoral de Almería (Yll *et al.* 1994, Pantaleón-Cano *et al.* 1996, Jalut *et al.* 2000) registran un cambio radical de la cobertura vegetal que apunta a un cambio desde condiciones húmedas a áridas a los ca. 5400 cal BP. La tendencia a la aridez se extiende hasta nuestros días aunque interrumpida varias veces por periodos extremadamente áridos de duración secular hacia 4200 cal BP 2700 cal BP y 1900 cal BP (Goy *et al.* 2003).

Los sistemas de flechas litorales de Almería suministran datos sobre los cambios de nivel relativo del mar. La tendencia general es hacia el descenso lo cual permite el mantenimiento de la progradación de la llanura costera pero se detectan varios episodios de ascenso relativo del NMM de duración secular. La magnitud de estas subidas registradas a 5400 cal BP, 3100 cal BP 1900 cal BP y 500 cal BP, no supera el metro. Fernández Salas *et al.* (2003) han estudiado el prodelta del río Guadalhorce (Málaga) deduciendo que el depósito de las unidades sedimentarias posteriores al máximo transgresivo (ca. 7000 BP) está controlado por cambios eustáticos que presentan dos ciclos de pequeña amplitud (pocos metros) y una periodicidad de alrededor de 3000 años. Dentro de un ciclo la mayor duración corresponde al periodo

progradante (regresivo) cuando hay más aporte sedimentario a la costa mientras que los periodos de ascenso son más cortos situándose uno muy marcado hacia los ca. 3000 BP.

En el delta del Ebro un área marcadamente subsidente, Somoza *et al.* (1998) han descrito las oscilaciones eustáticas para los últimos 7000 años. Estimaciones indirectas más recientes de las tasas de subsidencia van desde el 1.0 mm/año a los 5.00 mm/año (Sánchez-Arcilla *et al.* 1998). El rango de las estimaciones varía con la metodología empleada para obtenerlas (balance sedimentario levantamientos topográficos antiguos *levees*) y con el espesor y edad de la zona deltaica considerada.

En el Archipiélago Balear (Burjachs *et al.* 1994), los análisis polínicos de sondeos al norte de la Albufera de Alcudia (Mallorca) registran condiciones húmedas durante el óptimo climático holoceno (7100-6000 BP), con abundante aporte sedimentario a la costa. A partir de 6000 BP la vegetación evidencia un cambio hacia la aridez que se incrementa hacia los 2400 BP. También las terrazas marinas holocenas y los sistemas de flechas litorales de las bahías de Alcudia y el Prat (Mallorca) registran el descenso relativo del NMM desde los 7000 BP (Goy *et al.* 1997), en una tendencia interrumpida por episodios cortos de elevación relativa hacia 4400 BP, 3000 BP 1800 BP y 500 BP.

11.2.3. Costa actual. Estado de referencia

La respuesta costera sedimentaria a los cambios climáticos previstos para el futuro debe analizarse desde el conocimiento de la situación actual y su evolución en el pasado ya que sin establecer un estado de referencia no hay comparación posible.

La historia evolutiva pasada revela una tendencia general a la progradación en la costa sur-atlántica registrada en los sistemas de flechas litorales (ver figura 11.27: unidades H de Zazo *et al.* 1994 y Dabrio *et al.* 1996) integradas por un cierto número de crestas y surcos pequeños o swales. El estudio de la evolución de esos mismos sistemas de flechas litorales en las últimas décadas (Rodríguez Ramírez *et al.* 2000) sugiere que continua la tendencia progradante.

Del mismo modo tienden a desaparecer las llanuras mareales (un tipo de humedales), que en estado natural alcanzaron su máximo desarrollo hacia 2400 BP (Dabrio *et al*. 2000), debido al incremento de las tasas de progradación costera y la acreción vertical de las unidades sedimentarias en el interior de los estuarios.

Por otro lado hay pruebas de que parte de la costa del Golfo de Cádiz experimenta en su situación actual una erosión acelerada (figura 11.2). Buena prueba de ello son las torres vigía que la jalonan cuya construcción data de finales del siglo XVI a inicios del XVII las casamatas defensivas de la década de 1930, y el retroceso palpable de los acantilados blandos de El Asperillo (Huelva), Sanlúcar de Barrameda Chipiona y otros puntos del entorno de la Bahía de Cádiz en el último cuarto de siglo (figura 11.3).

Investigaciones recientes en todo el litoral gaditano a partir de fotografías aéreas fotografías históricas y control continuo de perfiles de playa en 34 estaciones (Del Río *et al.* 2002) han revelado que las dos causas principales de la erosión costera derivan de intervenciones humanas relativas a la construcción: embalses que reducen el aporte sólido a la costa y estructuras (diques espigones puertos y otras edificaciones) que alteran la dinámica litoral.

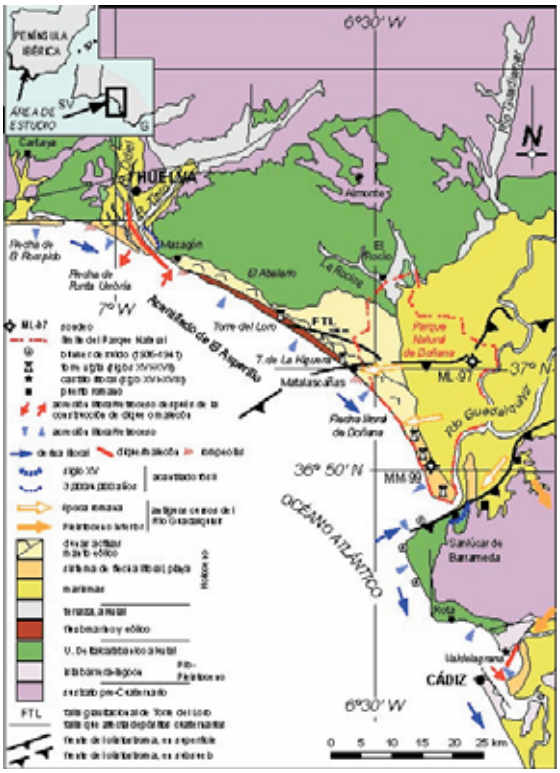


Fig. 11.2. *Situación actual erosiva de la costa de Cádiz (Zazo et al. 1987 mod.).*

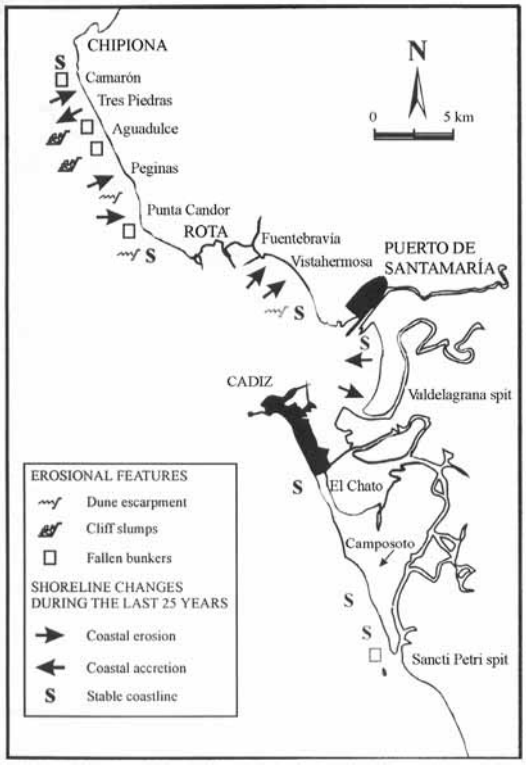


Fig. 11.3. *Retroceso de acantilados blandos en la Bahía de Cádiz (Del Río et al. 2002).*

En el área mediterránea la erosión se ha disparado a raíz de la drástica reducción de los aportes sólidos fluviales debido a la regulación y reforestación de las cuencas fluviales y la construcción de embalses. La evolución costera del delta del Ebro muestra claramente esta tendencia (Sánchez-Arcilla *et al.* 1998). La mayor parte de las zonas afectadas por erosión acelerada se debe a la construcción de puertos que interrumpen la deriva litoral agravada por la edificación de urbanizaciones e infraestructuras y las frecuentes estructuras de defensa de costa que se les suelen asociar. En algunos casos ello ha supuesto la erosión de la franja arenosa que separaba humedales costeros del mar, como entre Puçol y Massalfasar debido al puerto de Sagunto la restinga de la Albufera entre Valencia y Cullera por el puerto de Valencia y el cordón de cierre de la laguna de Santa Pola por el puerto de Santa Pola (Alicante). En otros ha disparado la erosión de playas y llanuras costeras como en puerto de Mazarrón (Murcia) y Carboneras (Almería).

La aplicación de revestimientos en zonas donde el retroceso ya es un hecho (por ejemplo en la Manga del Mar Menor) rompe el equilibrio natural verano/invierno y produce dos efectos negativos: inhibe el crecimiento de la playa en verano al impermeabilizar la zona de swash e impide la erosión de la parte alta de la playa en invierno y por consiguiente la formación de la barra de sedimento que actúa de despensa en la zona de transición al shoreface. En todos estos casos la estima del transporte tanto longitudinal como transversal presenta múltiples incertidumbres para el clima actual (Sánchez-Arcilla *et al.* 2001), que se acrecentaran para futuros escenarios climáticos.

En las costas del norte la situación es diferente ya que las cuencas que vierten a las mismas no han experimentado en general una regulación importante. En estas costas hay evidencias de incrementos apreciables en el aporte de sedimentos en tiempos recientes seguramente como consecuencia de intervenciones humanas (Cendrero 2003, Cendrero *et al.* 2004, Méndez *et al.* 2004, Remondo *et al.* 2004, Rivas *et al.* 2004). Sin embargo son perceptibles en muchos lugares los retrocesos de playas y frentes dunares o incluso la erosión acelerada de acantilados “blandos” (Rivas 1991, Rivas y Cendrero 1991, 1992, 1995).

11.2.4. Escalas espaciales

Para analizar el posible cambio futuro han de combinarse las escalas espaciales y temporales a las que actúan los procesos morfodinámicos. La definición de estas escalas ha de empezar a partir del conocimiento disponible de los factores impulsores y de la respuesta costera observada. El principal problema radica en que un agente (por ejemplo el oleaje) actúa a diferentes escalas de maneras también diferentes. A la escala principal del proceso considerado el agente será “controlador” mientras que a otras escalas jugará el papel de “ruido” o de condición de contorno (de Vriend 1991). Como ilustración se considerará el transporte longitudinal de sedimentos inducido por el oleaje en la costa del delta del Ebro (Figura 11.4). La escala “natural” del transporte longitudinal es de medio plazo es decir, de unos cuantos años. Si esta escala coincide con la del estudio el transporte longitudinal será el principal componente de este estudio y su papel queda ilustrado en la figura 11.4b que muestra como las tasas de transporte neto anual permiten explicar el balance sedimentario correspondiente. Esto significa también que los cambios volumétricos a largo plazo estarán controlados principalmente por el patrón de transporte longitudinal neto.

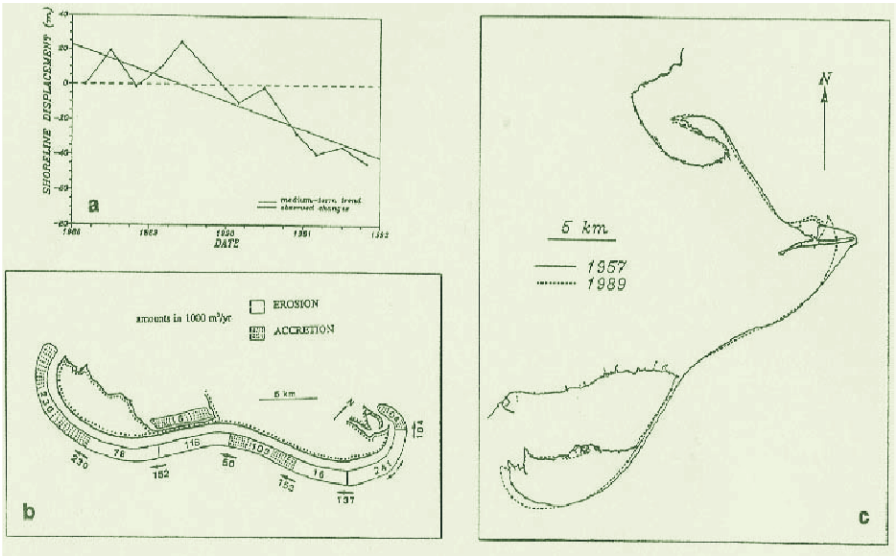


Fig. 11.4. *Papel del transporte de sedimentos a lo largo de la costa según las diferentes escalas de tiempo: (a) a corto plazo (b) a medio plazo y (c) a largo plazo (adaptada de Jiménez y Sánchez-Arcilla 1993).*

Cuando la escala de estudio es menor que la del proceso este actuará como una condición de contorno tal como indica la figura 11.4, en la que los movimientos de un perfil costero de la costa del delta del Ebro aparecen dibujados "contra" la tendencia a medio plazo. Pueden observarse las oscilaciones estacionales clásicas en el comportamiento transversal de la franja costera. La tendencia media que se muestra en esta misma figura está asociada al gradiente positivo en el transporte longitudinal neto que induce un comportamiento erosivo y representa por tanto una condición de contorno externa.

Finalmente cuando la escala de estudio es mayor que la del proceso considerado éste tendrá un efecto residual o de "ruido".

Como ilustración y tal como se indica en la figura 11.4, la evolución a largo plazo de la costa del delta del Ebro muestra un remodelado que puede definirse en términos del correspondiente balance sedimentario. El transporte longitudinal de sedimentos no puede considerarse responsable de este balance pues el sistema está casi "cerrado" al menos para la fracción arena (Jiménez *et al.* 1993). Sin embargo la remodelación observada es debida al transporte longitudinal neto por lo que este proceso a esta escala de largo plazo tendrá un efecto residual como remodelador pero no contribuirá al balance en esta escala.

La respuesta costera es función de la climatología geomorfología y estructuras existentes en el tramo de costa y posee una multiplicidad de escalas. Para el análisis de la respuesta costera a un posible cambio climático a escala local se consideran normalmente tres:

1. Escala a largo plazo que es la más directamente relacionada con los cambios a escala global (en planta perfil y balance sedimentario) y que está controlada por agentes tales como: input sedimentario de los ríos cambios relativos en el nivel tierra-mar, transporte de sedimento en el límite interno de la plataforma intercambios sedimentarios entre la franja costera y la zona terrestre adyacente (debido por ejemplo al transporte eólico) y variaciones a escala decenal de los factores climáticos. También se puede considerar como agentes a esta escala el efecto residual del transporte longitudinal de sedimentos.

2. Escala a medio plazo que está asociada a cambios costeros sistemáticos del orden de kilómetros y con una variabilidad temporal del orden de años. La principal respuesta

costera observable a esta escala es el remodelado de la costa y el principal factor controlador son los transportes (longitudinal y transversal) netos de sedimento. Los cambios costeros resultantes son el resultado de integrar los diferentes trenes de oleaje que actúan en una costa todo y que la manera de promediarlos dista de estar universalmente aceptada.

3. Escala episódica que está asociada a la acción de términos impulsores extremos actuando durante unos pocos días y con un período de retorno del orden de décadas. Estos agentes producen importantes modificaciones de tipo impulsivo en la zona costera y para el caso de nuestra costa mediterránea se consideran esencialmente dos: a) la acción de tormentas caracterizadas simultáneamente por mareas meteorológicas y oleaje altamente energético (que resultará en patrones de erosión acentuados y eventuales roturas de tramos costeros más frágiles) y b) riadas extremas que producirán un importante suministro sedimentario en un corto período de tiempo y simultáneamente un remodelado intenso de la zona próxima a la desembocadura de los ríos. Estos sucesos impulsivos se caracterizan por una respuesta costera inmediata a partir de la cual el tramo costero afectado se irá recuperando posteriormente con una escala temporal diferente y que entra dentro de lo que se ha calificado de medio plazo. El posible cambio climático a escala local afectará sin duda la distribución de estos extremos por lo que su estudio es particularmente importante para caracterizar el impacto del cambio climático en nuestra costa.

La respuesta costera observada dependerá en cada caso de la escala de tiempo seleccionada para el estudio. La vulnerabilidad de los diferentes tipos de respuestas costeras al cambio climático dependerá, como ya se ha indicado de la geomorfología la climatología y las estructuras existentes. Las costas acantiladas serán en este sentido menos vulnerables y menos dinámicas mientras que las costas sedimentarias con un volumen granular limitado serán las más vulnerables. Las costas sedimentarias con un volumen “indefinido” de material aunque susceptibles de grandes cambios por el impacto de la climatología poseerán una vulnerabilidad más limitada. Los dos tipos de costa que (por ser el resultado del balance entre factores terrestres marinos y atmosféricos) están en un equilibrio más frágil y son por tanto más vulnerables al posible cambio climático local son los deltas y estuarios que serán tratados particularmente en este capítulo.

11.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los factores modeladores de la zona litoral se relacionan por un lado con procesos que tienen lugar en las cuencas fluviales y por otro lado con la dinámica marina. Entre los primeros están los que influyen en la generación y transporte de sedimentos hacia la costa (cambios de cobertura y usos del territorio construcción de embalses cambios en el régimen de precipitaciones etc.). Entre los segundos se pueden señalar las variaciones del nivel medio del mar, intensidad frecuencia y dirección dominante de los vientos y del oleaje. Todos ellos influyen en el equilibrio entre erosión y sedimentación pero también en la extensión y estado de las zonas húmedas y en las tasas de erosión en acantilados.

Los impactos del cambio climático en sí (variaciones de temperatura y precipitaciones tendencia a la humedad o a la aridez cambios del nivel del mar, etc.) no presentan una especificidad propia en la zona costera salvo naturalmente en lo que respecta a la interacción entre atmósfera-océano y litoral y sus consecuencias para las actividades ligadas a éste. Por ejemplo: un aumento térmico de algunos grados y una disminución de las precipitaciones podría producir un impacto positivo en las costas norte y noroeste por el mayor confort climático y reclamo turístico pero en la costa levantina tendría el efecto contrario agravado por la torrencialización de los cursos fluviales y el desequilibrio subsiguiente de la dinámica costera.

Un aspecto esencial del estudio de los factores impulsores es determinar su posible variación en el tiempo e incluso su recurrencia y en ese caso la periodicidad con que tienen lugar los acontecimientos. Ello puede intentarse a partir de los testigos de sondeos en hielo fondos marinos lagunas y humedales costeros o interiores sísmica de alta resolución en la plataforma continental y análisis morfo-sedimentario de las unidades costeras apoyados todos ellos en dataciones radiométricas. Ello es vital para distinguir el cambio climático natural evidentemente fluctuante del causado por actuaciones antropogénicas y discriminar entre ellas.

La situación actual y las tendencias de cambio observadas en el pasado reciente junto con las proyecciones a partir de los modelos climáticos (ver capítulo sobre "El clima en España: pasado presente y escenarios de clima para el siglo 21"), sugieren que en el último tercio del presente siglo podemos encontrarnos con temperaturas medias y máximas que superen a las actuales entre 2 y 3 grados en la costa N y NW y entre 4 y 5 grados en las costas E y S. Las lluvias experimentarán un aumento de la estacionalidad en el N y NW, con ligeros aumentos de la precipitación acumulada en otoño-invierno y disminuciones más marcadas en primavera-verano. En la zonas meridional y oriental por el contrario son de esperar disminuciones de las precipitaciones en todas las estaciones (aunque no muy marcadas). En lo que se refiere a posibles cambios en la intensidad frecuencia y dirección de los vientos no se señalan diferencias significativas.

Nos encontramos por tanto ante un escenario en el cual a la magnitud de las variaciones esperables no solo relacionadas con el aumento del nivel medio del mar sino también con respecto a la situación actual de las variables climáticas que influyen sobre el oleaje la marea aporte de agua y sedimentos y por tanto en la estabilidad de la costa (fundamentalmente de las playas) habría que sumar los efectos que sobre esos procesos han tenido y pueden tener las acciones humanas.

11.3.1. Nivel medio del mar

El término "nivel del mar" indica una situación teórica y se refiere a un punto del litoral que se supone fijo y estable. En España se utiliza una marcación fijada oficialmente en Alicante. Al hablar de "nivel medio", se acepta cierta variabilidad vertical del nivel del mar que se considera "normal" y que tiene en cuenta ciertas oscilaciones de período más largo que las olas de largo período presentes en la costa.

Habitualmente se consideran tres componentes en estas oscilaciones:

1. La componente periódica asociada con la marea astronómica
2. La componente no periódica asociada con la marea meteorológica
3. Una componente de variación más lenta asociada a la variación relativa de los niveles tierra-mar

La componente astronómica juega un papel primordial en las costas mesomareales y macromareales del litoral atlántico español pero en la costa micromareal Mediterránea su efecto es muy pequeño pues su rango no suele superar los 25-30 cm.

La marea meteorológica se debe al efecto combinado de la presión atmosférica (efecto barómetro invertido) y la tensión tangencial del viento. Las sobre-elevaciones del orden de 1 m tienen un periodo de retorno del orden de 10 años mientras que las de 1.5 m tienen un periodo de retorno del orden de 100 años. Si se suma un posible ascenso del NMM relacionado con el cambio climático los periodos de retorno de las grandes sobre-elevaciones se reducen notablemente: para un ascenso de 0.46 m, el periodo de retorno de las olas de 1.5 m se reduce

de 100 a 9 años en el delta del Ebro. En cambio las costas con mayores rangos de marea están menos expuestas a estos efectos.

La tercera componente se refiere al nivel relativo tierra-mar y se refiere a la superposición de la variación eustática (el cambio del NMM) y los desplazamientos locales verticales del sustrato. Es esa relación la que realmente modela la franja costera. Normalmente esta componente se calcula a partir de los datos de mareógrafos y reflejan la composición del nivel eustático y el cambio local en el lugar donde el mareógrafo está ubicado (Emery y Ausbry 1991, Pirazzoli 1991). Ello implica que deben extremarse las precauciones cuando se extrapolan los valores a costas próximas en particular a las áreas deltaicas en las que la subsidencia (hundimiento) local supera la componente eustática como han documentado Suanez (1997) y Morhange (1994) comparando los datos de Marsella (elevación 1mm/año) y del delta del Ródano (3 mm/año). En el delta del Ebro el ascenso se estima en 2 a 5 mm por año (Smith *et al.* 2000).

Con relación al nivel relativo del mar, la tendencia general es la de descenso desde los 5.300 cal BP. Se trata de variaciones centimétricas que están relacionadas con la mayor o menor entrada de Agua Atlántica superficial al Mediterráneo con el reforzamiento de los vientos y probablemente con la NAO (Oscilación del Atlántico Norte). Los sistemas de flechas litorales están constituidas por crestas y surcos de playa cuyo periodo de generación está relacionado con el ciclo de las manchas solares (Zazo *et al.* 1994, Goy *et al.* 2003).

En los litorales del Atlántico (Golfo de Cádiz), la progradación costera está representada por el desarrollo de flechas litorales y el inicio del relleno de los estuarios (Zazo *et al*. 1994, Goy *et al*. 1996), Dabrio *et al*. 2000, Lario *et al.* 2002) se produce a partir de ca. 2700 BP, señalando una tendencia general de descenso del nivel del mar a partir de ese momento hasta nuestros días. Los datos más recientes (Rodríguez-Ramírez *et al.* 2003), que cubren las últimas 4 décadas (1956-1996), señalan una estrecha correlación entre la periodicidad de los vientos del SW, el número de temporales y la formación de “minicrestas” de playa que constituyen el sistema de flechas de Doñana.

Datos existentes sobre las variaciones del nivel marino en la costa norte (Gómez Gallego 1994) durante el pasado siglo indican que entre 1972 y 1990 pudo haber un ascenso de 6-7 cm, (figura 11.5), si bien estos valores presentan ciertas dudas. Publicaciones recientes (Marcos *et al.* enviado) indican subidas del NMM en la costa norte de España del orden de 2 a 3 mm por año. Esta tendencia se rebajaría ligeramente (del orden del 10%) por efectos meteorológicos.

En lo que se refiere a las fluctuaciones del nivel del mar en periodos anteriores los datos disponibles no son demasiado concluyentes ya que presentan algunas contradicciones. La tabla 11.1 resume las dataciones existentes sobre niveles marinos en el Cantábrico (Gómez Gallego 1994). La figura 11.6 presenta una reconstrucción aproximada de la variación del nivel del mar durante el Holoceno a partir de datos existentes sobre la costa N de España (Edeso 1994).

De acuerdo con el conjunto de los datos históricos presentados anteriormente un ascenso del nivel del mar superior a 1 m se puede considerar un máximo difícilmente alcanzable dentro del presente siglo. Las proyecciones recientes plantean una horquilla de valores bastante más bajos (figura 11.7).

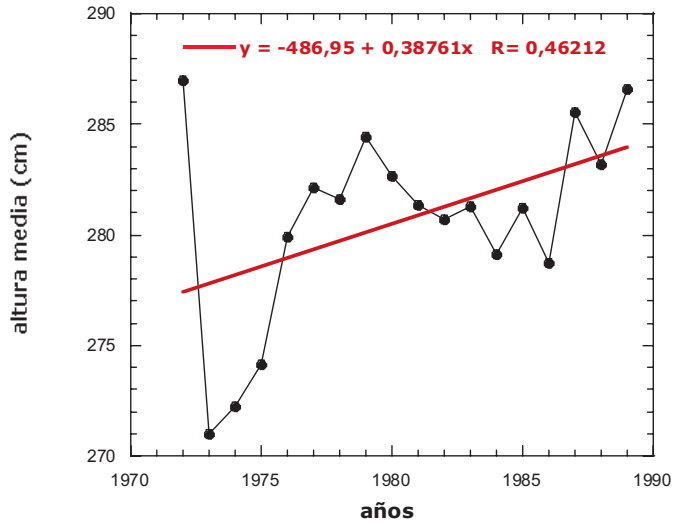


Fig. 11.5. *Variación del nivel del mar a partir del mareógrafo del puerto de Santander (Gómez Gallego 1994).*

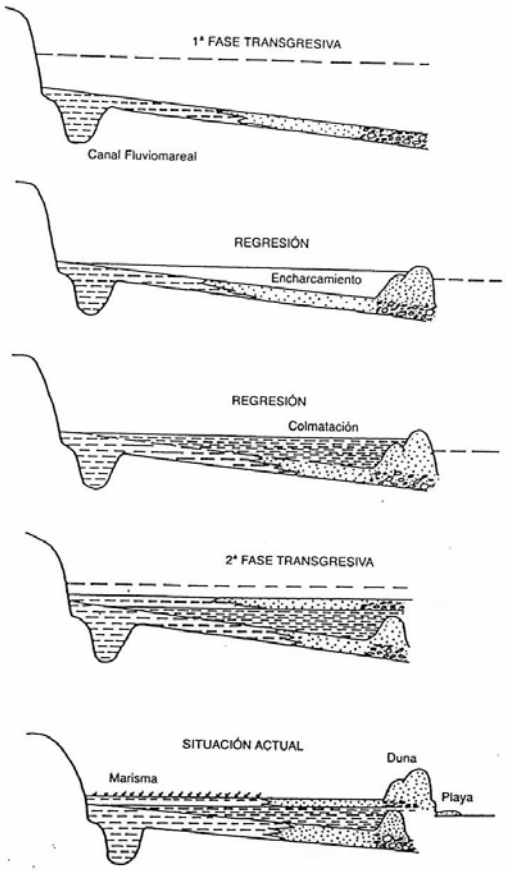


Fig. 11.6. *Reconstrucción de la variación del nivel del mar durante el Holoceno estimada a partir de datos existentes sobre la costa N de España (Edeso 1994).*

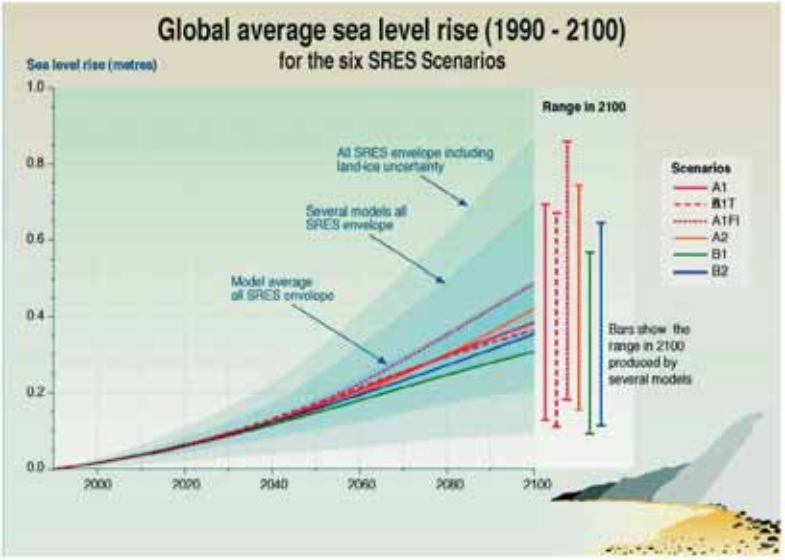


***Fig. 11.7**. Proyecciones recientes bajo distintos escenarios de la elevación del NMM (fuente: IPCC 2001).*

11.3.2. Oleaje

El oleaje es uno de los mayores factores modeladores de nuestra costa en las diferentes escalas consideradas. El clima de oleaje se obtiene a partir de registros observaciones visuales y datos obtenidos numéricamente proporcionando valores característicos de la altura periodo y dirección del oleaje. La altura de ola caracteriza en parte el transporte transversal que varía con la altura de ola elevada a una potencia de entre 2 y 5, lo cual requiere determinar muy bien la distribución probabilística de esta variable. La segunda y tercera variables controlan la corriente longitudinal generada y el transporte correspondiente.

A *largo plazo* un componente esencial del clima de oleaje es el transporte en la zona límite entre la plataforma continental y la zona activa costera (Wright 1987). Su valor se conoce sólo en algunas zonas de nuestro litoral (Jiménez *et al.* 1997 1999), pero ha suplido en parte la falta de aportes fluviales en tiempos recientes mitigando los efectos erosivos que cabría esperar.

A escala decenal el transporte depende de la altura y el periodo de la ola y se puede estimar a partir de análisis de tendencias como se muestra en la figura 11.8 (Jiménez *et al.* 1997).

A escala media (unos pocos años), el principal factor es el transporte longitudinal neto y requiere conocer con mucha precisión la altura de ola media de cada intervalo de frecuencias. Empíricamente se ha visto que en la costa mediterránea los mejores resultados se obtienen utilizando una fórmula tipo CERC con un coeficiente de proporcionalidad variable según las características sedimentarias y las estructuras costeras presentes (Sánchez-Arcilla *et al.* 2001).

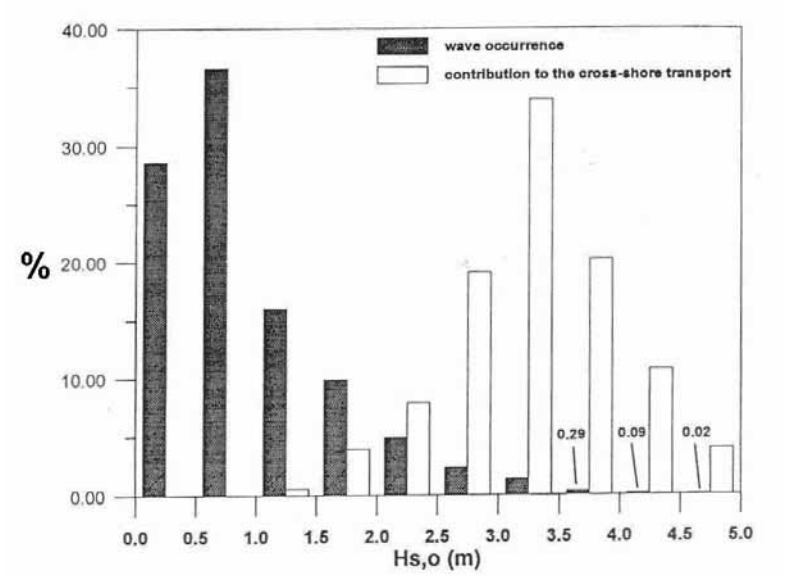


Fig. 11.8. *Contribución de la altura de ola al transporte transversal de sedimentos (Jiménez et al. 1997).*

Los sucesos episódicos que conllevan las mayores tasas de transporte se asocian a ciertas condiciones de temperatura oleaje y mareas meteorológicas y son los principales modeladores "impulsivos" de la franja costera mediterránea (Sánchez-Arcilla y Jiménez 1994). Para estudiar el clima de oleaje de estos episodios se trabaja con intervalos porque intervienen los errores asociados a las colas de la distribución probabilística. La distribución probabilística conjunta de la altura de ola significante la temperatura y la máxima marea meteorológica asociada a "esta" tormenta (para la costa del delta del Ebro) aparece en la figura 11.9. El asterisco indica las condiciones que produjeron la rotura de la barra del Trabucador en 1990, y por tanto un cambio morfológico "impulsivo".

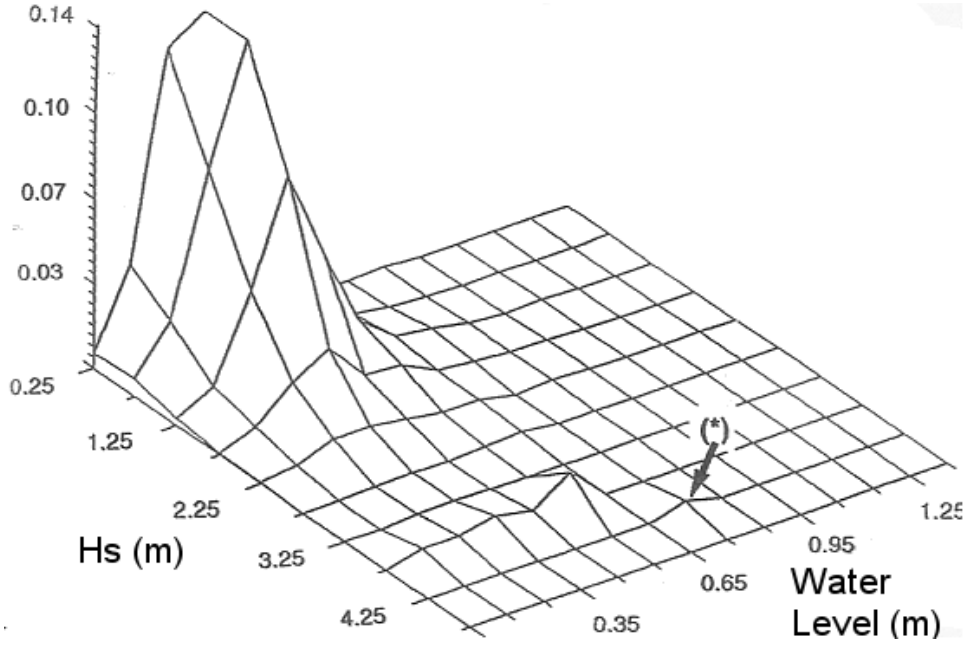


Fig. 11.9. *Distribución probabilística conjunta de altura de ola significante (Hs) y nivel medio del mar (Z). Nota: el asterisco (*) indica las condiciones que rompieron la barra del Trabucador.*

En el marco del proyecto realizado por la Universidad de Cantabria para la Oficina Española del Cambio Climático y la Dirección General de Costas del Ministerio del Medio Ambiente (Medina *et al.* 2004), se ha realizado un estudio de reanálisis de 44 años de datos (1958-2001) obtenidos mediante simulación numérica en el que se ha considerado variables meteorológicas y oceanográficas relevantes para evaluar los posibles efectos del cambio climático en la costa. El análisis ha servido para estudiar las tendencias de dichas variables y realizar la predicción de la evolución futura de las mismas. Los resultados más relevantes para la costa española se resumen en la figura 11.10. Considerando 12 áreas relativamente homogéneas se ha representado el valor medio máximo y mínimo de las variables dirección del flujo medio de energía asociado al oleaje altura de ola superado 12 horas al año y altura de ola significante. En la figura se exponen los resultados de régimen medio. Se ha estudiado también el régimen extremal.

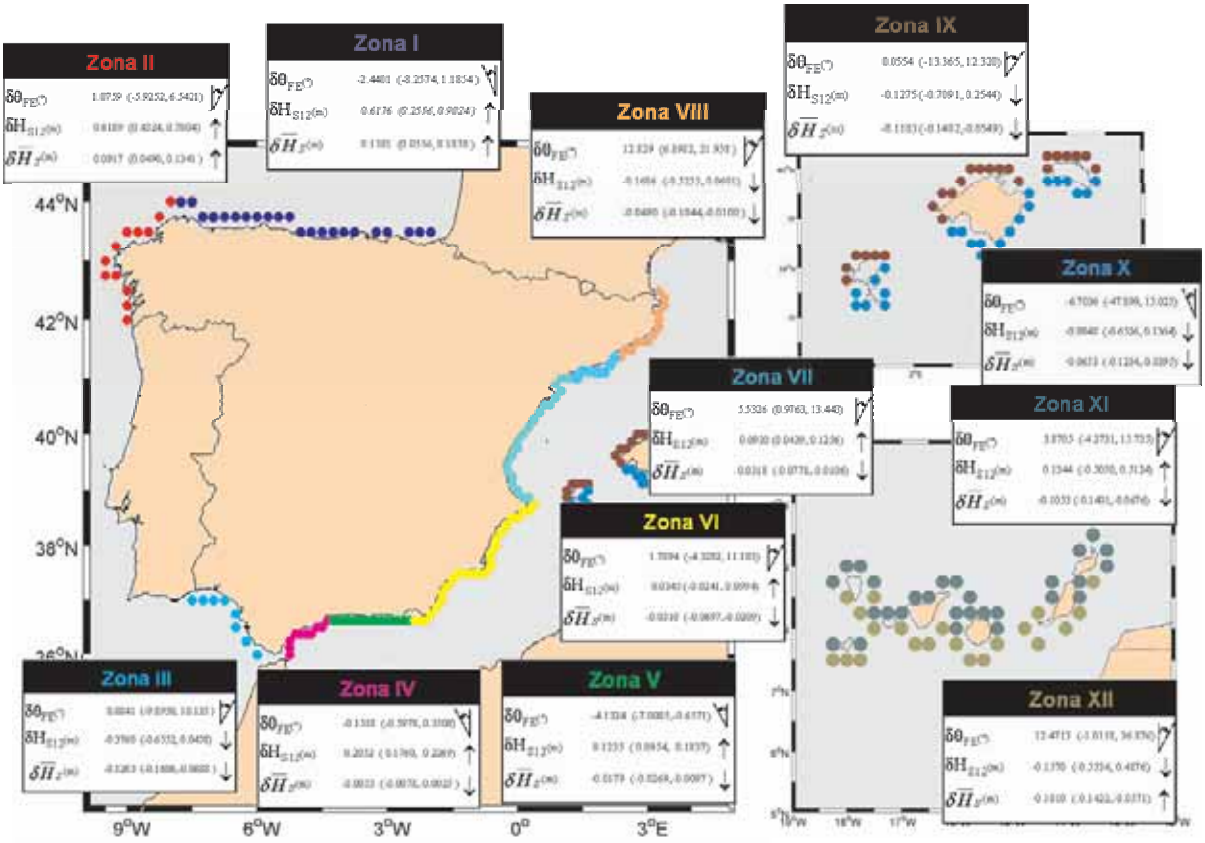


Fig. 11.10. *Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el periodo 1958-2001.*

El estudio refleja que se puede observar un aumento de la energía del oleaje que llega a la Costa Cantábrica. La dirección predominante del oleaje tiende a ser más del Oeste con mayor intensidad en la costa occidental. En la costa Gallega se observa una zonación importante en la magnitud de las variables de estudio y sus tendencias marcadas por el cabo Finisterre lo que genera un clima marítimo más suave en las Rías Bajas. La energía del oleaje tiende a aumentar.

En la costa mediterránea no se aprecian cambios relevantes en la magnitud de la energía del oleaje aunque sí destacables peculiaridades en Cabo de la Nao debidas a su situación geográfica y en la Costa Brava dada su cercanía al Golfo de León. En la Costa Brava donde se detectan tendencias con un comportamiento similar al Noreste Balear, se observa una disminución energética del oleaje medio. Respecto a la dirección predominante del oleaje se han producido variaciones en las Islas Baleares y en la Costa Brava donde se ha detectado una tendencia de giro horario en los oleajes de forma que la dirección predominante tiende a ser más oriental.

El Golfo de Cádiz presenta una tendencia negativa muy clara en energía del oleaje para todas las variables de oleaje estudiadas lo que confirma la tendencia a un clima marítimo más suave.

Finalmente los resultados de variación a largo plazo indican que se ha producido un incremento de los temporales en el Norte y una tendencia a la disminución energética y giro horario de las direcciones del oleaje en el Sur. Los cambios en la en la altura de ola afectarán entre otros a la cota de inundación de la costa al transporte potencial de sedimentos o a la longitud del perfil activo de la playa. La variación en el ángulo del flujo medio de energía puede contribuir a cambios en la forma en planta de las mismas y en consecuencia pueden producirse retrocesos adicionales además de los producidos por la sobrelevación del nivel del mar.

11.3.3. Descarga fluvial

La descarga fluvial líquida y sólida controla la productividad biológica y calidad del agua en la costa de los alrededores y el tipo y la disponibilidad (volumen) de sedimento no consolidado. El aporte fluvial es la principal fuente de sedimento a la costa y tiene especial relevancia en las zonas deltaicas. Hay una relación no lineal entre la descarga líquida y el aporte sedimentario pero hoy día la regulación de las cuencas fluviales la ha roto (sobre todo respecto a la fracción arena), así que se tratarán por separado. No obstante es muy útil registrar la descarga líquida en forma de velocidades promediadas diariamente pues dan más información que las medias mensuales o anuales que tienden a enmascarar los procesos puntuales. En efecto puede haber medias mensuales por debajo del límite de transporte para una fracción sedimentaria dada y a la vez el valor diario puede excederlo. Asimismo el impacto de un posible cambio climático puede pasar desapercibido dentro del proceso de promediado pero ser perceptible con valores más "instantáneos". En este contexto conviene señalar que la política de gestión del agua y de explotación de las cuencas fluviales puede mermar o anular los posibles efectos del cambio climático.

Aportes líquidos

La descarga a *largo plazo* en el sentido utilizado en este capítulo que implica unas pocas décadas sólo puede estimarse a partir de los correspondientes registros pero teniendo en cuenta las actuaciones reguladoras. Por ejemplo para el río Ebro sólo pueden tenerse en cuenta a partir 1957, cuando entraron en servicio los embalses de Ribaroja y Mequinenza (figura 11.11).

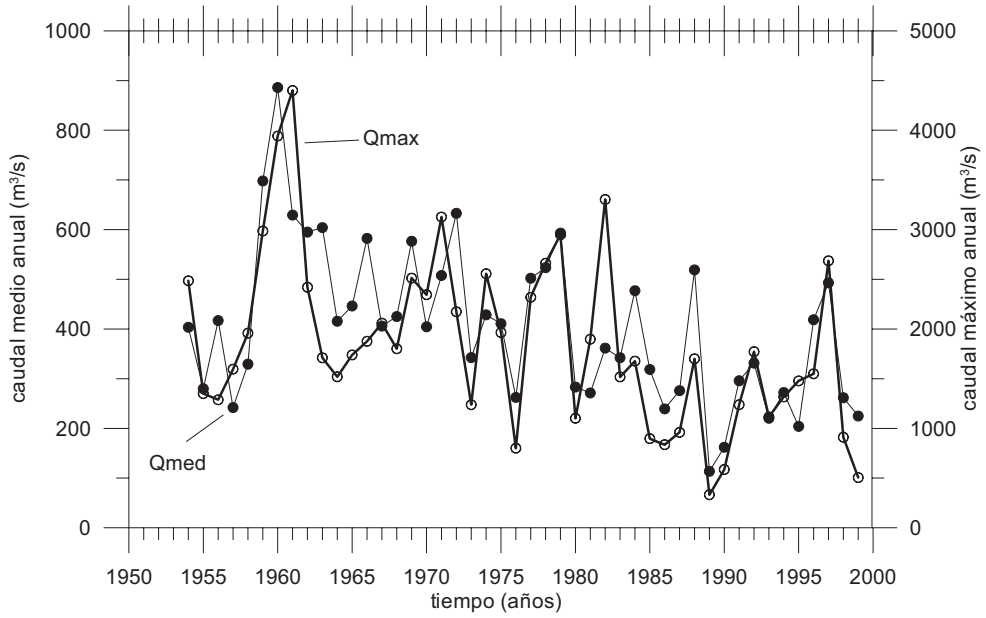


Fig. 11.11. *Evolución temporal de la descarga del río Ebro (Qmed = promedio anual y Qmax = máximo anual).*

A *escala decenal* (figuras 11.12 y 11.13), las estimaciones de la descarga fluvial se hacen por análisis de tendencias (Mitosek 1995), tests no paramétricos (IPCC 1995), o de una manera simplificada mediante un análisis de regresión por mínimos cuadrados. Se tienen en cuenta las descargas medianas mensuales y anuales (Jiménez y Sánchez-Arcilla 1997). Los cambios en la tendencia decenal han de analizarse con cuidado pues su origen puede ser múltiple: cambios en la climatología (y por tanto pluviometría y escorrentía superficial de la cuenca), cambios en la política de regulación fluvial cambios en la gestión del suelo en la propia cuenca etc. En los ríos muy regulados como es el caso de la mayoría de los españoles el impacto de un posible cambio climático puede pasar desapercibido.

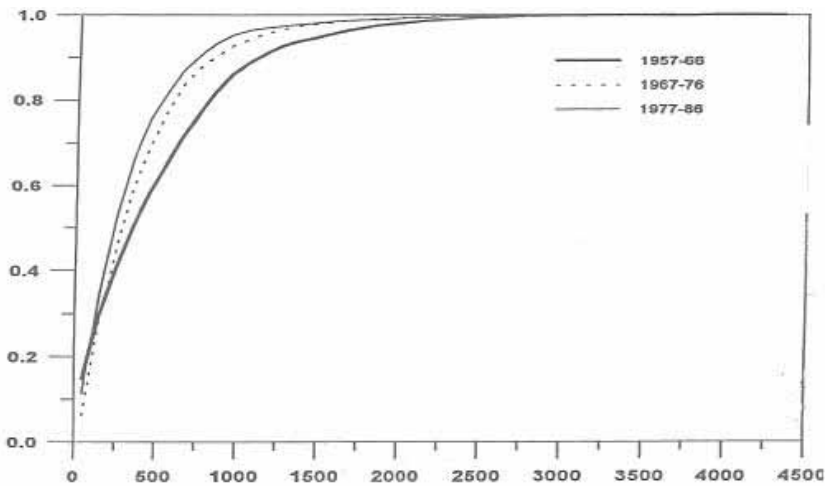


Fig. 11.12*. Distribución probabilística de las descargas del río Ebro usando los registros de caudales de 1957-1987.*

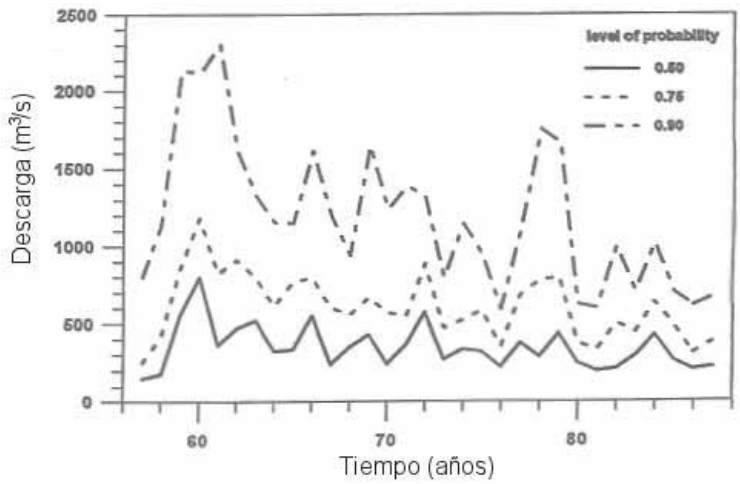


Fig. 11.13. *Variaciones en las descargas del río Ebro para una probabilidad dada.*

A *medio plazo* (unos pocos años) se requieren series temporales más cortas para analizar las tendencias subyacentes. En general es de esperar una tendencia descendente de la descarga en la mayoría (si no en todos) de los cursos fluviales españoles. Ello es un grave inconveniente porque dificulta la elección de la descarga anual promedio en especial cuando se toma esta variable como "control". Se ofrece un ejemplo para el río Ebro en la figura 11.14 (Jiménez y Sánchez-Arcilla 1997).

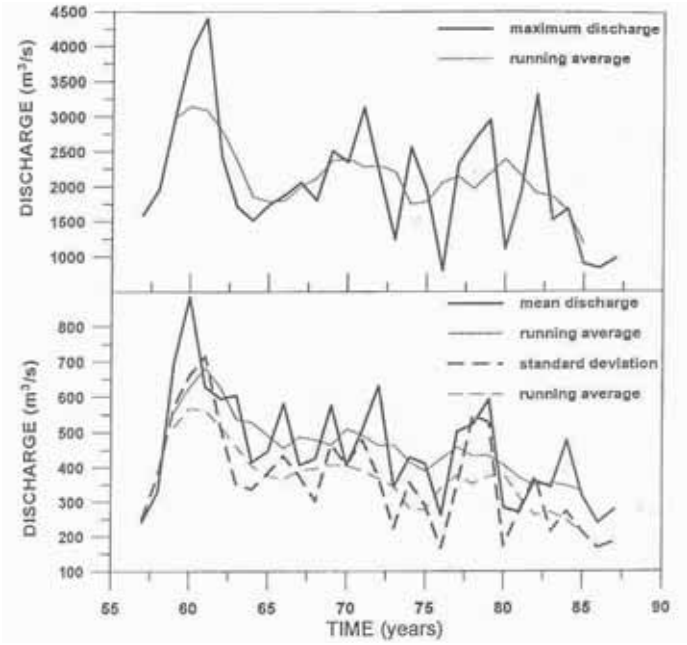


Fig. 11.14. *Evolución temporal de la descarga líquida del río Ebro; (a) descarga media anual; (b) máximos anuales.*

Los *sucesos episódicos* suponen la principal contribución del río al volumen y características sedimentarias de la costa porque son los más eficientes a la hora de movilizar una descarga sólida y además es precisamente a ellos a los que afectará más el cambio climático local o regional. Sin embargo es difícil cuantificarlos porque hasta los sucesos episódicos en la situación actual han de estimarse a partir de la distribución extremal de la descarga del río lo cual comporta una gran incertidumbre. La figura 11.15 presenta una estimación para el río Ebro

a partir de los máximos anuales registrados desde 1957 y utilizando una distribución tipo Gumbel. Cualquier variación de la descarga supondrá un aumento o disminución de la descarga sólida y una notable variación en los períodos de retorno asociados.

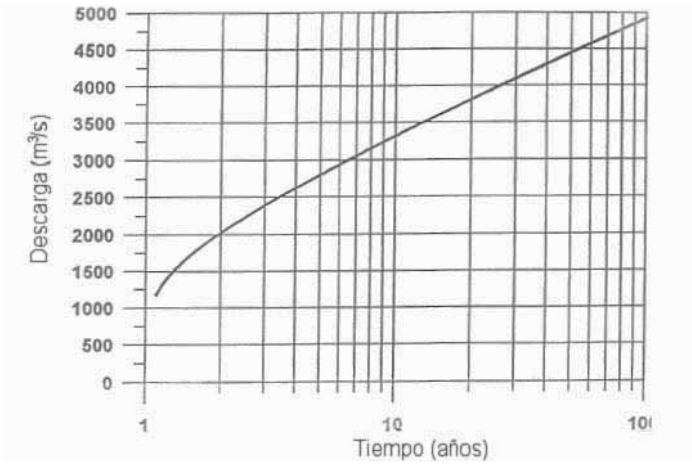


Fig. 11.15. *Régimen extremal para las descargas del río Ebro.*

Los datos de descarga líquida de los ríos que vierten el litoral S y E suelen venir expresados en medias anuales teniendo en cuenta la regulación. Según datos recientes de las confederaciones hidrográficas y otras fuentes (Vanney 1970, Van Geen *et al.* 1997, MIMAM 2000), las descargas medias aparecen en la tabla 11.2:

Tabla 11.2. *Caudales líquidos de los ríos que vierten en el litoral.*

Río o cuenca	Descarga (Hm3/año)	Regulado (%)
Cuencas Catalanas	1115	72
Ebro	12998	71
Júcar	1985	77
Segura	725	85
Sur	504	47
Barbate + Guadalete	842	44
Guadalquivir	7230	26
Tinto-Odiel	630	--
Guadiana	2525	75

Aportes sólidos

La descarga sólida que afecta más directamente la dinámica costera “exterior” es la fracción arena o superior, transportada como carga de fondo por el río. El material más fino no es estable en la franja costera directamente expuesta a la acción del oleaje pero puede contribuir a la dinámica vertical de zonas costeras bajas y a las costas interiores de bahías protegidas.

No es fácil evaluar el transporte como carga de fondo (Jiménez y Sánchez-Arcilla 1997) ni tampoco cuantificarlo mediante medidas directas porque hay que manejar un grado de incertidumbre muy alto (van Rijn 1993). Se han propuesto muchas fórmulas pero su fiabilidad y aplicabilidad son muy limitadas y en cualquier caso sólo indican la capacidad de transporte teórica del río en condiciones “ideales”, sin tener en cuenta la disponibilidad de sedimento ni otras limitaciones de los casos reales que se intentan soslayar mediante parámetros de calibración cuyo valor es desconocido para nuestros ríos. Por ello sólo se puede considerar las

descargas en términos de orden de magnitud. Sólo se puede obtener una serie temporal de las descargas por transporte de fondo usando varias fórmulas (Jiménez y Sánchez-Arcilla 1997).

En cualquier caso y según se ha indicado hay que tener en cuenta que el aporte de sedimentos por parte de los ríos en el pasado reciente se ha visto condicionado en mayor medida por actuaciones humanas en las cuencas o en los propios cursos que por factores climáticos. Es previsible que lo mismo ocurra en el futuro.

A modo de ilustración el aporte sólido medio del río Ebro se ha estimado para la fracción arena en 30,000 m^3/año. El aporte medio del río Guadiana para las distintas fracciones sedimentarias y en las últimas cuatro décadas se estima en 1 Hm^3/año.

11.3.4. Precipitaciones

Los posibles efectos en la zona costera de los cambios en el régimen de precipitaciones están más relacionados con las precipitaciones en el interior de las cuencas fluviales que con las lluvias en el propio litoral. Las previsiones derivadas de los modelos climáticos apuntan a una probable reducción de la precipitación total anual y una variación no muy marcada de la frecuencia y/o intensidad de las lluvias torrenciales lo cual es más significativo desde el punto de vista de los posibles efectos ya que la coincidencia de lluvias intensas y temporales proporciona las condiciones ideales para que tenga lugar el deslizamiento de acantilados. No obstante estos procesos se restringen a sectores relativamente pequeños de los acantilados de los cuales solamente algunos presentan estructuras en zonas de riesgo. Además el aumento de la frecuencia y/o intensidad de las tormentas en el interior de las cuencas puede dar lugar a un aumento del riesgo de inundación en los cursos bajos y zonas próximas a las desembocaduras particularmente las costas bajas del entorno de los estuarios. Naturalmente estos efectos se verán agravados si el nivel del mar se sobre-eleva localmente por causas meteorológicas bajas presiones o mareas vivas o de forma permanente y general por elevación del nivel medio del mar (NMM).

Por otro lado las variaciones en el régimen de precipitaciones pueden influir en el aporte fluvial de sedimentos y de distintas sustancias hacia la zona costera. Asi las avenidas fluviales suponen incremento de aportes sedimentarios y de otras sustancias a la costa. En lo que se refiere a los sedimentos los datos disponibles sugieren que las variaciones debidas a las actividades humanas son mucho mayores que las causadas por cambios climáticos. En algunos estuarios del norte peninsular, las tasas de sedimentación han aumentado un orden de magnitud durante el siglo XX (Remondo *et al.* 2003) sin que los cambios climáticos detectados en ese periodo den una explicación razonable de dicho aumento que no sea el incremento de las actividades antrópicas. Cabe suponer que esto es también válido para el aporte de sustancias contaminantes (agropecuarias industriales o urbanas), mucho más condicionado por el tipo e intensidad de las actividades económicas presentes y futuras y de las correspondientes medidas preventivas o correctivas que por los cambios que experimenten las precipitaciones.

11.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

11.4.1. Vulnerabilidad y riesgo

No cae dentro de los objetivos de este estudio hacer un análisis detallado de los riesgos para todo el litoral pero sí se puede hacer una evaluación cualitativa de ellos y presentar estimaciones cuantitativas para algún caso de estudio concreto.

Se entiende por zonas vulnerables aquellas que pueden experimentar algún daño como consecuencia directa o indirecta del cambio climático por estar sujetas a algún riesgo entendiendo por riesgo las pérdidas totales esperables. En el contexto de este análisis interesa estimar el riesgo en las zonas vulnerables que depende evidentemente de los procesos que actúen en cada zona y de su intensidad.

Las pérdidas (riesgo en el contexto de este análisis) se estiman en función de la *exposición* (existencia de elementos dañables en zonas potencialmente afectadas por procesos que representen peligro), la *vulnerabilidad* (sensibilidad a dichos procesos de los elementos existentes o fracción de su valor total que se vería dañada) y la *amenaza* (probabilidad de ocurrencia de los procesos peligrosos en un lapso de tiempo dado o periodo de recurrencia de los mismos en la unidad del territorio que se considere).

11.4.2. Probabilidad de fallo o riesgo

El riesgo o probabilidad de fallo del sistema ha de cuantificarse teniendo en cuenta las escalas de tiempo y espacio consideradas y las incertidumbres del cálculo. Así mismo la evaluación de daños ha de considerar estas escalas de tiempo y espacio y utilizar un procedimiento que incorpore tanto la respuesta negativa como positiva del sistema. La respuesta negativa o susceptibilidad indica una degradación del sistema o su incapacidad para enfrentarse a los términos modeladores en su estado actual. La respuesta positiva o "resiliencia" implica una mejora del sistema o de su capacidad para enfrentarse a los términos impulsores.

Se debe considerar aquí, por un lado la probabilidad de ocurrencia de episodios violentos de corta duración (tormentas y tsunamis) en el futuro. Por otro lado la probabilidad de que dentro del horizonte temporal que se considera en este análisis (centenal), se produzca un ascenso del nivel del mar de una magnitud dada. Dicha probabilidad puede estimarse por dos procedimientos: a) empírico basado en el análisis de las tendencias de cambio en el último siglo y su extrapolación de acuerdo con distintos escenarios; b) determinístico basado en modelos climáticos.

En conjunto se puede decir que estamos ante una situación de “alto riesgo y alta incertidumbre”. Los daños potenciales si se producen fallos en los sistemas litorales como consecuencia del cambio climático son muy elevados pero al mismo tiempo hay dudas considerables sobre la magnitud de esos cambios. La incertidumbre principal se refiere a la posible variación en la frecuencia e intensidad de las tormentas y la magnitud del ascenso del NMM.

11.4.3. Daños

Según se ha mencionado anteriormente la vulnerabilidad de las zonas costeras ante el cambio climático se circunscribe esencialmente a dos tipos de unidades: playas y costas bajas del entorno de estuarios y deltas.

La vulnerabilidad en estas zonas corresponde básicamente a tres tipos de situaciones o características: a) presencia de estructuras o bienes con valores monetarios de mercado que representen un “capital sujeto a daños”; b) existencia de elementos naturales sin valor de mercado pero que son la base de actividades económicas y que podrían verse perjudicadas; c) existencia de unidades naturales valiosas no necesariamente ligadas de manera directa a actividades productivas pero con riesgo de deterioro.
El primer grupo corresponde fundamentalmente a las áreas potencialmente anegables de forma permanente o intermitente en las cuales se podría ver afectado tanto el valor de los terrenos como el de los cultivos edificios o infraestructuras presentes en los mismos. Esas

áreas se sitúan sobre todo en los entornos de deltas y estuarios correspondiendo en muchos casos a antiguas zonas húmedas o intermareales desecadas. También existen algunos lugares ubicados sobre todo en la parte alta de playas con edificios o estructuras que se podrían ver afectados por un aumento del nivel del mar y/o de la intensidad de las tormentas o eventos de tipo tsunami.

En el segundo grupo se encuentran esencialmente las playas confinadas que podrían ver reducida su extensión de manera apreciable o incluso desaparecer totalmente.

El tercer grupo incluye ciertos humedales y zonas supra o intermareales que podrían desaparecer por elevación del nivel del mar, si bien es probable que dicha desaparición se viera compensada en parte por la aparición de nuevos humedales en zonas de costas bajas como las descritas anteriormente. Menor es la vulnerabilidad de los campos de dunas asociados a playas aunque en algunos casos también podrían ver reducida su extensión o desaparecer como consecuencia de un ascenso del nivel medio del mar o intensificación de los temporales.

El análisis de daños probables debe tener en cuenta dos aspectos. Por un lado las posibles pérdidas de “capital” (daños en infraestructuras o edificios pérdida de terrenos etc.). Por otro lado se deben considerar también las pérdidas debidas a las perturbaciones que puedan afectar a las distintas actividades económicas. Lo primero es más fácil de abordar, pues se refiere a elementos fijos existentes en el territorio mientras que lo segundo plantea muchas más incertidumbres especialmente teniendo en cuenta la gran dificultad de hacer previsiones en relación con las actividades económicas a varias décadas vista.

11.4.4. Zonas deltaicas

Las zonas deltaicas actualmente en desequilibrio por la falta de aportaciones fluviales sólidas que las generaron son un primer ejemplo de áreas amenazadas y que presentan un elevado riesgo de desaparición. Su concentración de valores humanos (e.g. delta del Llobregat) y naturales (e.g. delta del Ebro) explican su alta vulnerabilidad.

Para aplicar estos conceptos a un proceso costero es necesario introducir las escalas de tiempo apropiadas y también es útil un índice de vulnerabilidad que resuma esta información muchas veces difusa e imprecisa en un conjunto limitado de parámetros. Sánchez-Arcilla *et al.* (1998) han propuesto un índice de vulnerabilidad parcial:

$$Vi=Qi\cdot Si\cdot Lc+Ri\cdot Lc$$

donde Si es el índice de susceptibilidad Ri es el índice de resiliencia Lc es un factor de control local que actúa como 1 ó 0 (eventualmente un valor intermedio) y Qi es un índice que refleja la extensión del proceso analizado.

Una ilustración de la evaluación binaria de los índices de susceptibilidad o resiliencia para un determinado tramo de costa aparece en la tabla 11.3. Una aplicación de esta metodología a los índices a largo término de susceptibilidad o resiliencia para una zona deltaica (en este caso el delta del Ebro) aparece en la tabla 11.4.

***Tabla 11.3**. Índices de susceptibilidad (SI), resilencia (RI) y respuesta del sistema asociado para ser utilizados en el análisis de vulnerabilidad.*

Tipo de análisis	Medida	Respuesta	SI	RI
absoluto	Cambio del "recurso"/	Disminución	-1	0
	Stock	Mantenimiento/aumento	0	1
relativo	Sistema bajo escenario/	Empeoramiento	-1	0
	Referencia	Mejora/sin cambio	0	1

***Tabla 11.4.** Índices de susceptibilidad (SI) y resilencia (RI) a largo término para agentes que afectan la vulnerabilidad geomorfológica y procesos asociados a esta escala. "?" significa que una valoración a priori no puede completarse sin conocer las consecuencias finales.*

Agente	S.I.	R.I.	Respuesta
Descarga fluvial	-1	0	Disminución capacidad transporte
	0	1	Aumento capacidad transporte
RSLR	-1	0	Acreción vertical < RSLR
	0	1	Acreción vertical = RSLR
RSLR	-1	0	Erosión costera
	0	1	Estabilidad/acreción costera
Procesos barrera	-1	0	Rollover limitado
	0	1	Rollover aumentado
	-1	0	Capacidad transporte aumenta
Clima de oleaje	0	1	Capacidad transporte disminuye
	?	?	Dirección transporte cambia

De la misma manera la evaluación para sucesos episódicos los más determinantes de la remodelación del sustrato físico en cualquier tramo de costa aparece en la tabla 11.5 para la zona del delta del Ebro. La esquematización de estos índices con su correspondiente área de definición espacial para esta misma zona deltaica aparece en la figura 11.16. La evaluación de la correspondiente vulnerabilidad a la escala de medio plazo aparece en la figura 11.17. Como puede observarse el mapa de vulnerabilidad cambia apreciablemente en función de la escala temporal seleccionada.

***Tabla 11.5.** Índices de susceptibilidad (SI) y resilencia (RI) a escala episódica para agentes que afectan la vulnerabilidad geomorfológica y procesos asociados a esta escala.*

Agente	S.I.	R.I.	Respuesta
Switching fluvial	-1	0	Lóbulo abandonado
	0	1	Lóbulo creado
Switching fluvial	-1	0	Aportación de sedimento "protegida"
	0	1	Aportación "expuesta"
Riadas	-1	0	*wash-out* sedimento
	0	1	Aportación sedimento
Tormentas de oleaje	-1	0	Erosión / rotura
	0	1	Aportación sedimento hinterland

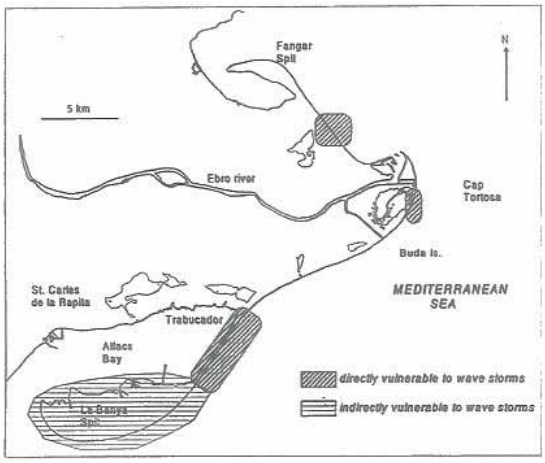


Fig. 11.16. *Índice de vulnerabilidad cualitativa a escala "episódica" para el delta del Ebro.*

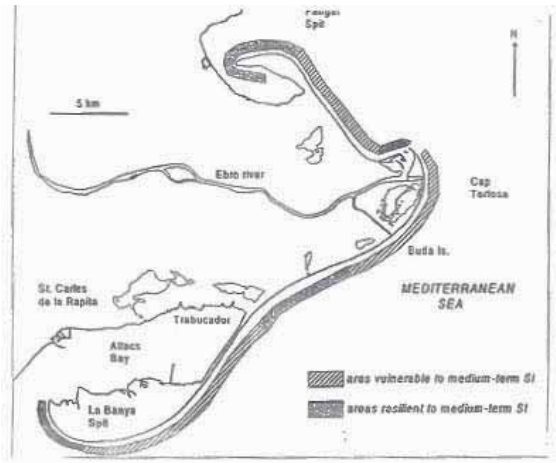


Fig. 11.17*. Vulnerabilidad provocada por cambios producidos por el transporte de sedimentos a lo largo de la costa a medio término en la zona costera del delta del Ebro.*

La evaluación de la vulnerabilidad conjunta del sistema teniendo en cuenta sus diversos componentes requiere ampliar el marco de análisis. Por ello es necesario esquematizar el tramo costero explicitando los términos impulsores los correspondientes procesos asociados y como ambos afectan los usos y recursos que este tramo costero soporta. Como ilustración del diagrama conceptual necesario para una zona deltaica en la figura 11.18 aparece el esquema derivado para la zona costera del delta del Ebro. El punto clave de este esquema es la identificación y posterior cuantificación de los flujos que ligan unos elementos con otros. Estos flujos varían en magnitud y hasta en definición al cambiar de escala de tiempo. Por ejemplo las prácticas de riego y la construcción de presas y embalses no afectan a la erosión costera a corto plazo pero si que juegan un papel determinante en la dinámica costera a medio y largo plazo. Esto se debe al control que ejercen ambos elementos en la aportación sólida que el río aporta a la costa.

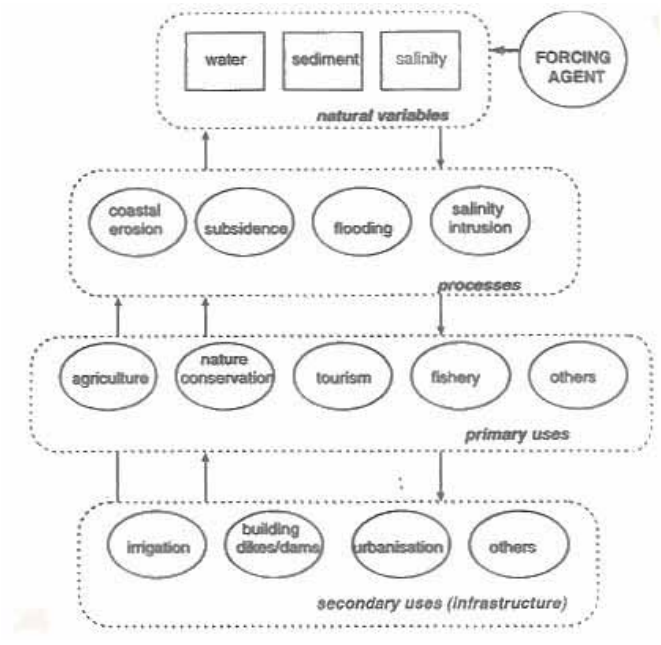


Fig. 11.18. *Esquema del sistema deltaico según los procesos y usos principales (adaptado de Otter et al. 1996).*

11.4.5. Playas y costas bajas

Los valores y funciones de las playas difieren tanto por su naturaleza como por su ubicación. Las comunidades bióticas que acogen no son especialmente ricas ni variadas pero sí muy específicas de estos medios. Por su diversidad escasez y presencia de endemismos son notables las comunidades de los campos de dunas asociados a algunas playas. Es bien conocida por otro lado su importancia como base para el desarrollo de actividades ligadas al sector de turismo y ocio. Hay que considerar también los geotopos costeros o soporte físico en el que se asientan estos ecosistemas con sedimentos y morfologías que se pueden datar perfectamente constituyendo fuentes de información para descifrar la historia climática de los últimos años así como definir las tendencias de cambio para el futuro.

Un ascenso del nivel del mar se manifestará en un retroceso erosivo de las playas con una reducción de la superficie útil total o un desplazamiento de las mismas. El retroceso dependerá de las características específicas de cada playa y no es posible presentar un análisis detallado de cada caso. Aplicando la regla de Bruun (1962, 1986, 1988), que establece un avance erosivo de 1 m por cada centímetro de elevación del nivel del mar y teniendo en cuenta el carácter confinado o no confinado de las playas así como su anchura se puede estimar que un ascenso de 0.5 m podría dar lugar a que desaparecieran unos 22 km de la longitud de las playas del País Vasco y Cantabria lo que equivale al 30% del total aproximadamente (Tabla 11.6). Esta desaparición como es lógico afectará fundamentalmente a playas confinadas con anchura y pendiente reducidas; las playas confinadas anchas (>50 ó 100 m) verían mermada su extensión sin llegar a desaparecer. No obstante esta estimación se basa en la hipótesis de ausencia de alimentación de arena tanto natural como artificial. Si se produce entrada de sedimento por el aporte natural de los ríos o si este aporte de sedimentos se realiza de forma artificial las pérdidas de superficie de playa pueden ser muy inferiores a las de la tabla 11.6.

Tabla 11.6. *Resumen de los probables efectos de dos escenarios de ascenso del nivel del mar sobre las playas de Guipúzcoa Vizcaya y Cantabria aplicando la regla de Bruun (1986, 1988) (modificado de Rivas y Cendrero 1995).*
(1) Flechas o cordones. Algunos de ellos se encuentran confinados en una parte de su longitud por acantilados (ej. Oyambre) o por estructuras artificiales (ej. Zarauz) por lo que una parte de estas playas también desaparecería ante el ascenso del nivel del mar.
(2) la reducción será incluso mayor ya que se ha tenido en cuenta la anchura promedio de las playas pero muchas de ellas en gran parte de su longitud tienen una anchura muy inferior a esa cifra media.

	Playas totalmente confinadas			**Playas no confinadas (1)**
	Actualidad	Ascenso 50 cm		
Nº playas	95	33	35 %	17
Guipúzcoa	17	12	70,6%	2
Vizcaya	22	10	45,4%	3
Cantabria	56	11	19,6%	12
Longitud (km) (2)	45	23,6	51,9%	25,4
Guipúzcoa	9,42	6,6	70%	2,85
Vizcaya	9,2	5	53,4%	1,5
Cantabria	26,37	12,15	46,1%	21,1

En playas no confinadas especialmente flechas y cordones de arena asociados a campos de dunas es de esperar que la pérdida de superficie sea mucho más reducida o incluso nula si bien es probable que se produzca una reducción de los campos dunares adyacentes.

No obstante estimar los efectos del cambio climático basándose únicamente en la variación del nivel del mar implica una simplificación evidente ya que un análisis preciso debería incluir también los efectos derivados de las variaciones en la altura del oleaje y en la dirección del flujo medio de energía.

La franja arenosa que constituía la frontera tierra-mar natural en estas costas bajas en el ámbito mediterráneo ha ido despareciendo progresivamente en las últimas décadas debido principalmente a la alteración del balance sedimentario en la zona costera cuyo resultado neto es la disminución alarmante en las entradas de sedimento y como consecuencia el retroceso de la línea de costa y la pérdida de playas.

Las principales entradas de material son el aporte de los ríos el transporte de material a lo largo de la costa por las corrientes de deriva litoral el intercambio de sedimento entre playa (*backshore*) y los sistemas dunares por la acción del viento y el intercambio estacional de sedimentos entre la “playa” subaérea (*foreshore*) y la “playa” sumergida (*shoreface*). Todas ellas han sido modificadas por la intervención humana.

La disminución progresiva de los aportes sólidos fluviales debida a la construcción de embalses la regulación fluvial y la lucha contra la erosión en las cuencas de drenaje y la construcción de estructuras costeras y portuarias han supuesto una reducción drástica de la capacidad evolutiva natural de la costa ya que limitan la capacidad de movimientos de masas sedimentarias entre los distintos segmentos costeros. Ello ha desencadenado los procesos erosivos y el retroceso de la línea de costa. Además la ocupación masiva de la parta más alta de la playa impide la recuperación del perfil tras los procesos tormentosos altamente erosivos que tienen lugar principalmente en épocas invernales.

La ocupación de la "tras-playa" (*backshore*) y las cadenas dunares subsiguiente a la urbanización masiva del litoral mediterráneo no sólo ha consumido buena parte de la reserva natural de arena de las playas sino que también ha alterado la dinámica del viento creando

auténticos “pasillos” entre los edificios de mayor altura por donde se canaliza aumentando de esta forma la erosión eólica en determinadas zonas de playa.

La construcción de estructuras portuarias y costeras además de contribuir a la rigidización del frente costero ha limitado su dinamismo y por tanto su capacidad de recuperación natural tras tormentas e inundaciones actuando asimismo como trampa de sedimentos aguas arriba de la deriva lo que induce la erosión aguas abajo como un intento del sistema litoral de recuperar el balance de sedimentos.

Este es el caso de la costa atlántica del Golfo de Cádiz donde las muchas estructuras existentes en una zona de alta variabilidad natural por los amplios “entrantes” costeros interfieren con la deriva litoral agudizando la erosión de los acantilados blandos en beneficio de algunas playas tales como las de oeste de los estuarios del Guadiana y el Odiel-Tinto.

El proceso degenerativo comenzó a raíz del desarrollo turístico y económico del litoral en los años 60 (por ejemplo el complejo Ribaroja-Mequineza que afectó todo el delta del Ebro o la urbanización de La Manga del Mar Menor). En resumen la política de intervención sobre el borde costero junto con la prevención de su dinamismo natural (ilustrado por la lucha contra las inundaciones fluviales y marinas e impidiendo los procesos de colmatación asociados) ha acelerado los procesos erosivos en una franja costera con alta presión de uso urbano recreativo portuario y de infraestructuras. Un buen ejemplo de ello es la costa barcelonesa del Maresme formada por un quasi-continuo de núcleos urbanos y "rigidizada" por un ferrocarril y una carretera que discurren a pocos metros del mar, muchas veces separados de el sólo por una escollera longitudinal.

Además la gran ocupación urbanística de la franja costera particularmente la de los cordones arenosos parcialmente consolidados de las costas bajas (por ejemplo en Guardamar de Segura a Torrevieja en Alicante y La Manga del Mar Menor) ocasiona un aumento de la subsidencia debido a la sobrecarga.

En las costas bajas de Málaga y sobre todo Almería los problemas vienen de la ocupación de las llanuras aluviales costeras naturales por cultivos de invernadero con la consiguiente removilización de los suelos naturales y la sobre-explotación de los acuiferos que desencadena su salinización.

Otro problema añadido es la pérdida de calidad ambiental de las aguas que daña las praderas de *Posidonia sp.* y otros ecosistemas costeros y cuya pérdida acabará repercutiendo en el balance climático. Uno de los puntos más afectados es frente a La Manga del Mar Menor. Este punto debe revisarse cuidadosamente sobre todo pensando en la previsible construcción de nuevas infraestructuras costeras y portuarias o plantas desalinizadoras para cubrir la creciente demanda de agua potable y estimar el posible impacto de un ascenso del NMM en un futuro no muy lejano.

11.4.6. Zonas estuarinas

Estas unidades presentan una alta diversidad de valores socioeconómicos y naturales y por ello mayor vulnerabilidad. Estas zonas albergan los principales puertos del litoral N NW y SW y también muchos de los principales núcleos de población situándose en su entorno inmediato buena parte de las actividades económicas. Su potencial turístico y recreativo es considerable por los valores paisajísticos de muchos de los estuarios y rías las playas asociadas en el interior y en la desembocadura y por las posibilidades de navegación deportiva. Los estuarios llevan asociadas extensas zonas intermareales y humedales que constituyen áreas de gran diversidad y productividad biológicas muy importantes para el sector pesquero tanto directa

(pesca artesanal marisqueo cultivos marinos) como indirectamente por ser zonas de reproducción y/o alimentación de numerosas especies. No obstante durante gran parte de los siglos XIX y XX se llevó a cabo el "saneamiento", es decir, la desecación y relleno de buena parte de los humedales y marismas para dedicarlos a otras actividades: áreas urbanas polígonos industriales infraestructuras agricultura etc. Ello generó amplias zonas que sostienen un considerable capital inmueble público y privado (terrenos de alto valor, edificios infraestructuras servicios etc.). Esta presión de ocupación es probablemente la principal amenaza que actualmente les afecta (Cendrero y Díaz de Terán 1977, Cendrero *et al.* 1981).

Los daños esperables en el entorno de los estuarios o zonas bajas mucho menos extensas asociadas a cordones de arenas no ligados a desembocaduras de cursos de agua significativos se deben sobre todo al ascenso del nivel medio del mar y el riesgo de anegamiento de antiguos humedales y zonas intermareales aislados y desecados pero no rellenados o con un relleno de escaso espesor. Una parte importante de esas zonas están ocupadas por edificaciones (residenciales industriales servicios infraestructuras); parte de ellas se encuentran a menos de 1 m por encima de las pleamares vivas actuales por lo que una elevación del nivel del mar afectaría gravemente a las mismas. Una manera de estimar el riesgo para esas zonas es considerar determinados escenarios de elevación del nivel marino delimitar las zonas que se verían afectadas por dichos ascensos e inventariar los bienes existentes en los mismos ("capital en situación de riesgo").

Una estimación de los daños como consecuencia del ascenso del nivel del mar se ha llevado a cabo para la costa del País Vasco y Cantabria (Rivas y Cendrero 1991, 1995). La figura 11.19 ilustra el procedimiento de delimitación en el entorno de un pequeño humedal. Una representación aproximada de las áreas potencialmente afectables (para un escenario de 1.5 m de ascenso superior al considerado razonable en presente análisis) se muestra en la figura 11.20. Se puede estimar que en el País Vasco y Cantabria elevaciones de 0.5 y 1 m afectarían respectivamente a unos 25 y 79 km^2. El valor estimado del capital "inmueble" en situación de riesgo para el conjunto de las tres provincias analizadas sería respectivamente de 820 y 8370 $x10^6$ US$ (1991 cifras no actualizadas a precios de 2004, Rivas y Cendrero 1991, 1995). Esas cifras consideran la pérdida total de los terrenos edificios e infraestructuras existentes sobre los mismos. La pérdida real de capital teniendo en cuenta que la mayoría de las construcciones tienen una vida útil limitada en general más corta que el horizonte de fin de siglo que se contempla sería menor.

En lo que se refiere a las marismas y zonas intermareales que conservan sus valores ecológicos cabe distinguir dos casos: si hay una costa baja adyacente estas zonas se desplazarían hacia el interior a medida que asciende el nivel marino; esto puede afectar especialmente a áreas antiguamente desecadas pero no rellenadas. Por el contrario cuando los humedales no puedan desplazarse hacia el interior, es de esperar su reducción o desaparición. Por ello muy importante identificar las posibles alternativas de prevención y mitigación.

Un ascenso del nivel del mar del orden antes indicado significaría la muy probable recuperación de una gran extensión de humedales y zonas intermareales lo que representaría un impacto positivo. Parte de las zonas situadas por debajo de 0.5 m están simplemente aisladas y desecadas y dedicadas a usos agrícolas o forestales o incluso sin uso definido por lo que podrían recuperar su funcionalidad original como humedales o zonas intermareales en un plazo de unos pocos años bien sea debido a procesos espontáneos de recuperación desencadenados por abandono o como resultado de acciones deliberadas de restauración (p. ej., rotura de los cierres existentes), incluso sin variación del nivel marino. En caso de ascenso del nivel del mar, la práctica totalidad de dichas zonas pasarían a ser humedales. Si el ascenso fuera de 1 m, las áreas recuperables como humedales probablemente superarían los 30 km^2. Aunque no hay análisis detallados que permitan cuantificar este efecto parece probable que el

resultado neto no implique un cambio sustantivo de la extensión total de humedales sino esencialmente un desplazamiento de los mismos.

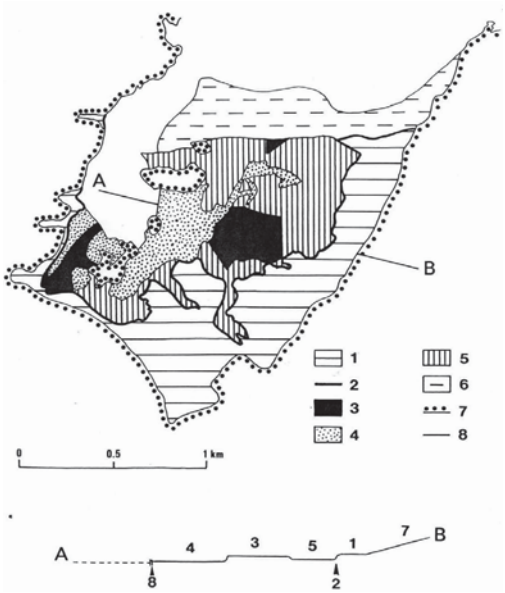


Fig. 11.19. *Procedimiento de delimitación en el entorno de un pequeño estuario (Rivas y Cendrero 1991).*

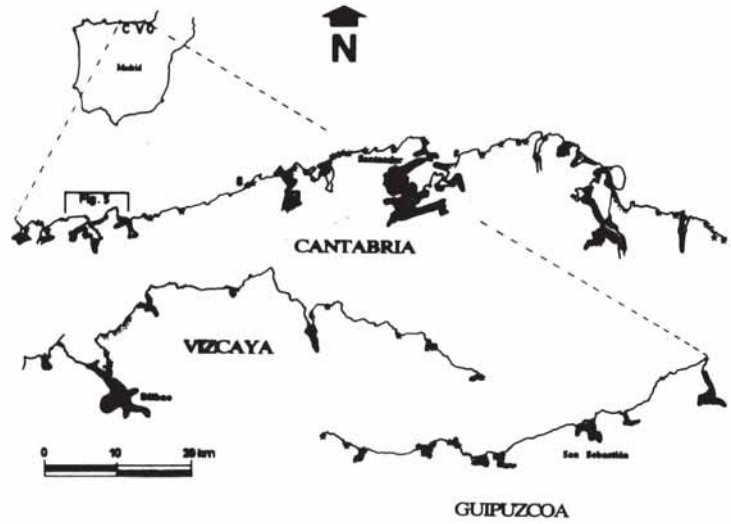


Fig. 11.20. *Áreas potencialmente afectables para un escenario de 1.5 m de ascenso superior al considerado razonable en presente análisis (Rivas y Cendrero 1990).*

Mención especial merecen las playas asociadas a estuarios. Según se ha indicado anteriormente algunas de esas playas pueden desaparecer, pero otras como los “puntales” o flechas de arena en las desembocaduras experimentarían con mayor frecuencia los eventos de *overwash* (sobrepaso en temporales con olas muy altas) y desplazamiento lateral de las bocanas y finalmente un desplazamiento hacia el interior. Esta afirmación es aparentemente contradictoria con los resultados de Rodríguez Ramírez *et al.* (2000) que observan que en las últimas décadas el crecimiento de crestas de playa es decir, la progradación de las flechas litorales se produce durante periodos de nivel del mar más elevado. La explicación es que se trata de elevaciones de poca entidad y duración tras las que se vuelve a la situación de “nivel del mar bajo” habitual. Sin embargo el caso de las subidas del NMM supuestas en los

escenarios de este trabajo la magnitud de la subida es mayor y además el nivel permanecería alto y las sobre-elevaciones se producirían a partir de esos valores altos.

Además son también vulnerables a las modificaciones del régimen de lluvias y descargas fluviales y avenidas en especial si éstas aumentan y coinciden con un ascenso del NMM, pues ello provocaría un aumento en la frecuencia o magnitud de las inundaciones. Hay que tener en cuenta también los cambios en los aportes de sedimentos y otras sustancias (nutrientes contaminantes) que puedan derivarse de las modificaciones del régimen de los ríos. Por último el aumento del nivel medio del mar dará lugar a una mayor penetración de la cuña salina hacia el interior de los cursos de agua y a un avance de la interfase agua dulce/agua salada en los acuíferos.

11.4.7. Acantilados blandos

Las amenazas potenciales en las zonas acantiladas dependen en pequeña medida del cambio climático y provienen sobre todo de la creciente presión urbanizadora a lo largo de las mismas. En los escasos sectores de acantilados “blandos” que presentan tasas significativas de retroceso y en los que existen edificios o estructuras los cambios en el clima oceánico y en el nivel del mar pueden dar lugar a un aumento de dichas tasas con el consiguiente riesgo para las construcciones adyacentes.

En el caso de los acantilados incluso los de tipo “blando”, un ascenso del nivel del mar del orden de 50 cm o 1 m no tendría efectos significativos. En el caso de las costas de Cantabria y el País Vasco se han identificado un total de 9 km de acantilados con tasas de erosión marcadas de los cuales solamente dos lugares podrían presentar algún problema uno en Cantabria y otro en Vizcaya. Se señala que en el primero de éstos (playa de Oyambre), se ha detectado una aceleración de las tasas de retroceso desde 1946, hasta valores de metros por año en la década de los 90 (Rivas 1991, Rivas y Cendrero 1995).

En la costa atlántica del Golfo de Cádiz los acantilados blandos representan más del 50% del litoral y están sometidos a intensa erosión que en el área de Mazagón los hace retroceder entre 1.25 y 2.2 m/año (Rodríguez-Ramírez 1998). Ello se debe principalmente a la interferencia del Dique de Juan Carlos I que con una longitud de 14 km, ha interrumpido la deriva litoral acelerando la erosión aguas abajo y favoreciendo la acumulación de una playa de 4 km adosada al dique aguas arriba en el antiguo Banco del Manto.

11.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

Las estrategias clásicas de gestión costera aplicables también a un eventual cambio climático a escala regional que produjese el repetido aumento del NMM o un cambio en las características de las tormentas comprenden el retroceso la adaptación y la defensa.

La *estrategia de retroceso* requiere en primer lugar disponer del espacio necesario para la reubicación de los usos y recursos que soporta el tramo costero. Si se dispone de él esta estrategia es la más concordante con las grandes incertidumbres en la predicción del cambio climático a escala regional y además no hipoteca la zona en el futuro.

La *estrategia de adaptación* requiere un planteamiento diferente para la erosión y la inundación así como una gran flexibilidad social y económica dado el nivel de incertidumbre de las predicciones. En el primer caso la estrategia de lucha contra la erosión desde la perspectiva de la adaptación requiere ubicar estructuras y hacer un uso flexible de la interfase tierra-mar. Actualmente la tendencia más común consiste en utilizar una vegetación de apoyo y disipación que reduzca los riesgos de erosión.

En el segundo caso los riesgos y costes asociados al proceso de inundación se pueden predecir aunque con cierto grado de incertidumbre y han de ser, en cualquier caso bien conocidos por todos los usuarios y gestores del tramo costero. No hay que olvidar que las defensas frente a inundaciones requieren un mantenimiento continuado y eventualmente el recrecimiento si el tramo costero experimenta subsidencia o se produce un ascenso eustático. Esta es la práctica de países como Holanda enfrentados secularmente a estos problemas.

La *estrategia de defensa* es la que suele preferir la sociedad por su aspecto "aparentemente" monolítico frente a la erosión o la inundación. Supone unos costes iniciales relativamente altos pero no se debe olvidar que también requiere costes de mantenimiento como ilustra por ejemplo la historia de las estructuras de defensa y protección de la costa del Maresme. Por ello esta estrategia de defensa sólo puede plantearse para tramos de costa concretos y siempre teniendo en cuenta el factor temporal y muy importante el nivel de incertidumbre de la resistencia estructural de la solución adoptada como de su diseño funcional.

La mejor solución para cualquier escala temporal seleccionada consiste en la combinación de los tres elementos todo ello dentro del marco de un plan integral de la zona costera.

11.5.1. Playas

En el caso de las *playas no confinadas* la estrategia más aconsejable con carácter general es la del retroceso ya que ese es el comportamiento natural que cabe esperar en las playas y los campos de dunas asociados. En ciertos casos esto puede implicar la invasión de áreas con elementos de interés.

La estrategia de no intervención estructural implica promulgar lo antes posible unas normas de ordenación del territorio que eviten la instalación de nuevos elementos o actividades en las zonas vulnerables. En principio esta debería ser una tarea a nivel municipal y se sugiere hacerlo a partir de la revisión de los planes de urbanismo con la ayuda de especialistas y la asesoría técnica de los organismos oportunos para delimitar las zonas vulnerables. Convendría para ello marcar una fecha límite.

Esta estrategia debe prever el progresivo abandono de edificios infraestructuras cultivos etc. situados en las zonas vulnerables lo cual presenta dos limitaciones: determinar con exactitud las zonas que se verán afectadas y especialmente cuando puede producirse el daño. Conviene por ello moverse dentro de un abanico de posibilidades correspondientes a las previsiones “optimista”, “pesimista” y “más probable”. Dado que el abandono representa “de facto” el paso de bienes privados al dominio público deben arbitrarse programas de indemnización compensación o expropiación además de compensar el impacto de las limitaciones de uso sobre los derechos de los propietarios.

Cuando la migración de playa y/o duna hacia el interior afecte elementos cuya pérdida se considere inaceptable se deberá aplicar la estrategia de alimentación artificial o intervención estructural. En ambos casos debería señalarse una línea de máximo retroceso aceptable que permitiera una mejor ordenación del territorio costero. Por tanto además de delimitar las zonas potencialmente afectadas por la migración (considerando los distintos escenarios), se inventariarán y valorarán los bienes o elementos vulnerables presentes en ellas para determinar cuáles requieren protección y comparar su valor con el costo de las medidas de protección requeridas. Evidentemente ese análisis deberá hacerse para cada caso de forma detallada dentro de la revisión de los planes de urbanismo sugerida más arriba.

La situación es muy diferente para las *playas confinadas* porque si no se interviene estructuralmente se reducirá la superficie útil de algunas y desaparecerán otras. En las playas

estabilizadas mediante espigones diques exentos y otras estructuras costeras el impacto del cambio climático local es complejo de predecir. El comportamiento de las estructuras costeras variará de manera apreciable (Sánchez-Arcilla *et al.* 2004) con cualquier modificación del nivel medio del mar o del clima de oleaje. Se deberá por ello re-evaluar el diseño funcional de las estructuras de protección costera incluyendo también la durabilidad de las aportaciones artificiales de sedimento.

La urgencia de establecer cuanto antes una estrategia en este sentido se ilustra claramente con los datos presentados en el apartado 11.4.5.

11.5.2. Acantilados blandos

Las opciones en este caso son más sencillas dado que en muy pocos casos existen estructuras o edificios que se puedan ver afectados por un eventual retroceso erosivo de los acantilados el cual además tendría una magnitud considerablemente menor que la migración de las playas.

Una excepción la constituyen los acantilados de la Costa Brava que por su alto grado de fisuración y su elevada ocupación urbanística suponen un problema de importancia creciente.

La estrategia de retroceso para dejar que la naturaleza siga su curso tendría unas implicaciones similares a las descritas para las playas susceptibles de migración. También aquí habrá que delimitar lar áreas potencialmente afectables hacer inventarios y valoraciones de los bienes existentes establecer limitaciones de uso en ciertas áreas y prever el abandono de edificios etc. (y las consiguientes indemnizaciones).

Cuando se considere que no es aceptable el abandono de ciertas estructuras en situación de peligro potencial habrá que prever la instalación de elementos de protección (por ejemplo escolleras de bloques al pie de los acantilados). La valoración de los bienes a proteger y su comparación con los costos de protección serán evidentemente la base para decidir qué estrategia se ha de aplicar en cada caso.

Dadas las incertidumbres existentes con respecto a la materialización de la amenaza es aconsejable la puesta en práctica de sistemas de seguimiento (“monitoreo”) que permitan determinar hasta qué punto el riesgo es real y requiere una intervención. Esos sistemas pueden incluir desde la simple colocación de puntos fijos de referencia perpendicular y paralelamente al borde del acantilado y su control visual sobre el terreno a sistemas de registro continuo o fotogrametría detallada a intervalos regulares.

11.5.3. Costas bajas

La situación de las costas bajas deltaicas está fuertemente amenazada por la falta de aportes sedimentarios. Se mantiene la capacidad remodeladora de los factores climáticos mientras que el volumen del cuerpo sedimentario va disminuyendo de manera monotónica. La adaptación basada en mantener una frontera tierra-mar dinámica permitirá maximizar la duración del cuerpo sedimentario deltaico. La mitigación resulta más compleja de implementar en la práctica. Una mitigación local mediante aportación de arena rigidización parcial mediante vegetación o rigidización total mediante estructuras es costosa y difícilmente sostenible. Se considera por ello preferible una mitigación general para el cuerpo deltaico basada en aportaciones sólidas como por ejemplo las asociadas a riadas o desembalses controlados.

La situación de los humedales y zonas intermareales es desde el punto de vista de las estrategias de mitigación comparable a la de playas y dunas. Algunos de estos humedales

tanto los que se encuentran asociados como los escasos situados fuera de ellos pueden migrar hacia el interior, ocupando costas bajas adyacentes. La estrategia de retroceso será seguramente la más adecuada en muchos casos pues permitirá mantener, a grandes rasgos la extensión total de los mismos. De seguir esa opción habrá que prever el abandono de los terrenos y estructuras afectables. En caso de que dicha opción se considere inaceptable por existir edificaciones estructuras etc. que deban mantenerse será preciso construir muros o diques de protección y establecer sistemas de bombeo para evitar el ascenso del nivel freático ("solución holandesa"). En determinadas zonas puede plantearse el relleno y elevación de ciertas infraestructuras (por ejemplo pistas de los aeropuertos de Fuenterrabía y Santander).

En otros casos la migración de los humedales hacia el interior resulta imposible por la presencia de barreras de distinto tipo. En algunos casos no hay alternativa y el resultado final será una reducción de la extensión de los humedales que quedarán total o parcialmente sumergidos. En otros casos es posible eliminar las barreras (por ejemplo en zonas que han sido simplemente cerradas y desecadas), facilitándose así la migración y/o la regeneración de zonas antiguamente ocupadas por humedales. Se ha estimado que en el litoral de las provincias de Guipúzcoa Vizcaya y Cantabria puede haber unos 30 km^2 de zonas de estas características con potencial de recuperación.

11.5.4. Puertos

El impacto climático local en las infraestructuras portuarias se refiere esencialmente a los niveles de las estructuras y su capacidad resistente. El primer punto se ilustra por la cota de coronación de los diques (que condicionan los volúmenes de rebase) o por la zona de estos expuestas a mayores solicitaciones. El punto de la capacidad resistente se basa por ello en la modificación del NMM y en la intensidad duración y recurrencia de las tormentas de oleaje. Todo ello requiere una re-evaluación de la fiabilidad de las estructuras marítimas.

11.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

11.6.1. Interacción con el hinterland de la zona costera incluyendo la cuenca de drenaje de los ríos

La elevación del nivel medio del mar producirá un ascenso del nivel de base de los ríos lo que propiciará el aumento de la sedimentación en los cursos bajos de éstos especialmente en los estuarios que tendrá repercusiones en el mantenimiento de los puertos. No es posible evaluar la importancia relativa de este factor en comparación con las variaciones en el aporte de sedimentos causadas por cambios de uso del territorio en las cuencas fluviales. Igualmente propiciará una mayor penetración de la cuña salina en los estuarios desplazando hacia el interior la zona de sedimentación por floculación.

El aumento del NMM probablemente determinará también una mayor frecuencia e intensidad de las inundaciones en los cursos bajos de los ríos efecto que se vería acentuado si se produjera un aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos torrenciales.

11.6.2. Interacción con pesquerías

Una reducción de humedales y zonas intermareales tendría repercusiones sobre la productividad biológica ya que dichas zonas tienen una alta productividad y son fundamentales para la reproducción y/o alimentación de diversas especies de interés. Es por tanto importante tratar de facilitar en la medida de lo posible la migración de estas zonas hacia el interior, de modo que se mantenga (o incluso incremente) su extensión total.

11.6.3. Interacción con el turismo

El sector turismo es probablemente el que presenta mayores posibilidades de verse afectado a través de la reducción o desaparición de playas. Será necesario anticiparse para poner en práctica de manera paulatina acciones de protección o regeneración de playas o bien para desarrollar formas de "turismo de sol y playa sin playas". El ejemplo del Puerto de la Cruz en Tenerife o el más reciente de la zona de baños en el recinto del Forum de Barcelona constituyen ejemplos de adaptaciones del uso turístico tradicional del litoral a entornos sin playa.

11.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

11.7.1. Variaciones recientes del nivel del mar

Con relación a los cambios del nivel del mar (figura 11.21), los datos de mareógrafos y de campo indican que en los últimos 150 años la subida del NMM ha sido del orden de 1 mm/año (Mörner 2003), pero los "modelos de carga glacial" (Peltier and Tushingham 1989, Lambeck *et al.* 2003) permiten estimarla entre 1.8 y 2.4 mm/año. Basándose fundamentalmente en estos últimos datos las predicciones de subida del nivel del mar para los próximos 100 años (año 2100) publicadas por el IPCC han variado desde valores de 50-95 cm (IPCC 1998) y 23-49 cm (IPCC 1999) a 13-68 cm (IPCC 2001). Frente a estos datos alarmistas las predicciones de la INQUA – Sea Level Change and Coastal Evolution Commission en sus informes de 1993 a 2003 oscilan entre 10 y 20cm como máximo. Pero en cualquier caso lo más interesante es que no se registra aceleración en la subida del nivel del mar en los últimos 100 años.

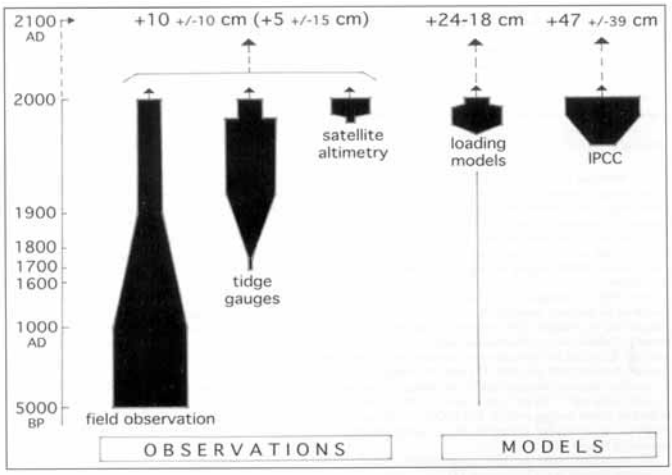


Fig. 11.21. *Medios y técnicas para registrar o estimar los cambios en el nivel del mar, y para realizar predicciones para el siguiente siglo (Mörner 2003).*

Los primeros datos de satélite (GEOSAT) sobre las variaciones del NMM entre 1986 y 1988, no eran suficientemente precisos pero a partir de la misión del TOPEX – POSEIDON los registros mejoraron (figura 11.22) y entre 1993 y 1996 el nivel permaneció estable con un ruido de ±0.5 cm. Entre 1997 y 1998 se registraron amplias oscilaciones del nivel del mar global coincidiendo con episodios ENSO (El Niño Southern Oscillation). Entre 1998 y 2000 el registro es irregular, sin una tendencia clara pero posiblemente con una pequeña subida menor de 0.5 mm/año entre 1999 y 2000.

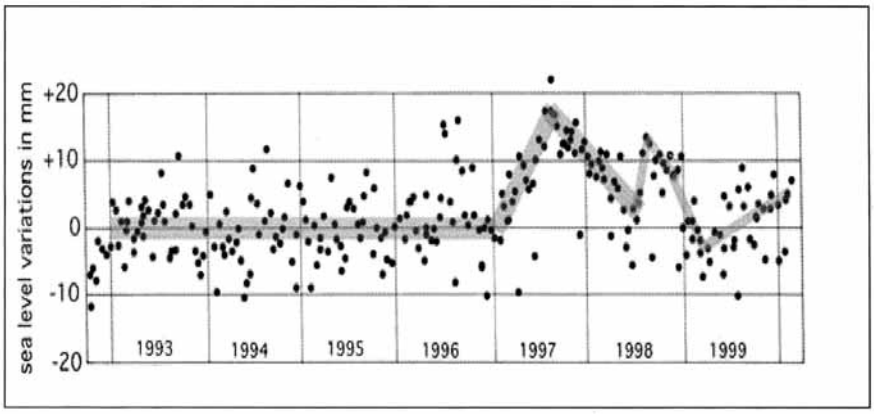


Fig. 11.22. *Medidas de las variaciones del NMM realizadas con el sátelite TOPEX-POSEIDON (Mörner 2003).*

11.7.2. Factores impulsores; variaciones climáticas holocenas

El Presente Interglacial Holoceno (últimos 11000 años) corresponde a un periodo cálido que hasta hace poco se consideraba climáticamente estable particularmente si se comparaba con la extremada variabilidad del último periodo glacial. Sin embargo los trabajos de la última década han revelado un marco bastante diferente.

Los sondeos de hielo de Groenlandia (GRIP, GISP) permitieron a Dansgaard *et al.* (1993) reconocer cambios climáticos de escala milenaria durante el último periodo glacial con variaciones de temperatura que Bryant (1997) establece en 6 a 7º C. Posteriormente Bond *et al.* (1997) reconocieron estas oscilaciones en los sondeos marinos del Atlántico Norte y las extendieron hasta la actualidad aunque menos pronunciadas (tan sólo 2º C) durante el Holoceno reconociendo eventos fríos (Eventos Bond) de corta duración(100-200 años) con una periodicidad de 1 a 2 Ka cuyos picos se datan a 10.3 Ka 9.5 Ka 8.2 Ka 5.9 Ka 4.3 Ka 2.8 Ka y 1.4 Ka (edades calibradas).

Se han sugerido diversas causas para estas oscilaciones climáticas: variaciones en los parámetros orbitales (ciclos de 900 años Loutre *et al.* 1992), oscilaciones del sistema océano-atmósfera (ciclos de 1500 años Bond *et al.* 1999), cambios en la actividad solar (ciclos de 2500 años Stuiver y Reimer 1993) y fluctuaciones en la circulación termohalina en el Atlántico Norte (ciclos de 550 a 1000 años Chapman y Shackleton 2000). Esta variabilidad climática parece tener un carácter global y con toda seguridad afecta al clima del Atlántico Norte (Arz *et al.* 2001).

En el área de conexión Atlántico-Mediterráneo Cacho *et al.* (1999, 2001 y 2002) han estudiado sondeos del Golfo de Cádiz (frente a la costa de Huelva-Cádiz) y el Mar de Alborán (frente a la costa de Almería) reconociendo eventos de descenso de la temperatura superficial del agua del mar (SST) de magnitud no bien establecida y periodicidad de 750 años y sus armónicos. En Alborán se reconocen a 8.2, 5.36 y 1.4 Ka pero en el golfo de Cádiz sólo a 8.2 Ka. Independientemente del valor exacto de las oscilaciones hay constancia de una tendencia general al enfriamiento durante el Holoceno en el Atlántico noreste y en el Mediterráneo (Marchal *et al.* 2002), que puede estar relacionada con la transición del intervalo Hypsithermal (9-5.7 Ka BP) a la Neoglaciation (ca. 5.7 a = Ka BP).

11.7.3. Respuesta de la costa

El estudio de unidades costeras en el litoral mediterráneo y del Golfo de Cádiz ha puesto de manifiesto la existencia de tendencias sedimentarías y erosivas que una vez datadas y calibradas revelan una ciclicidad comparable con las anteriores y que se traduce en distintas escalas temporales.

Escala decenal ("decadal"). Las crestas de playa se asocian en dobles parejas separadas por surcos o *swales* de mayor amplitud y a esa agrupación se le denomina un *set*. En condiciones ideales la datación de valvas de moluscos recolectadas en surcos sucesivos permitiría estimar el tiempo requerido para su acumulación. En la práctica se pueden datar tan sólo algunos surcos de modo que se divide el lapso temporal que los separa por el número de crestas acumulado entre ambos para calcular la duración media de acumulación de una cresta.

En el Golfo de Cádiz (flecha de Doñana) la duración de un *set* es de 400 años (figura 11.23), es decir, cada cresta se acumula en unos 100 años (Zazo *et al.* 1994), mientras que en Roquetas (costa mediterránea de Almería) los valores correspondientes son 45 y 11 años (Goy *et al.* 2003) (figura 11.24). La diferencia se debe presumiblemente a las diferencias en el rango mareal energía del oleaje tamaño y disponibilidad de sedimento sin excluir el menor grado de conservación de las crestas de arena formadas en el litoral del Golfo de Cádiz. Según los autores anteriores la ciclicidad en Roquetas parece estar relacionada con ciclos simples de manchas solares y la oscilación NAO mientras que en Doñana se interpreta como ligada a ciclos seculares de manchas solares.

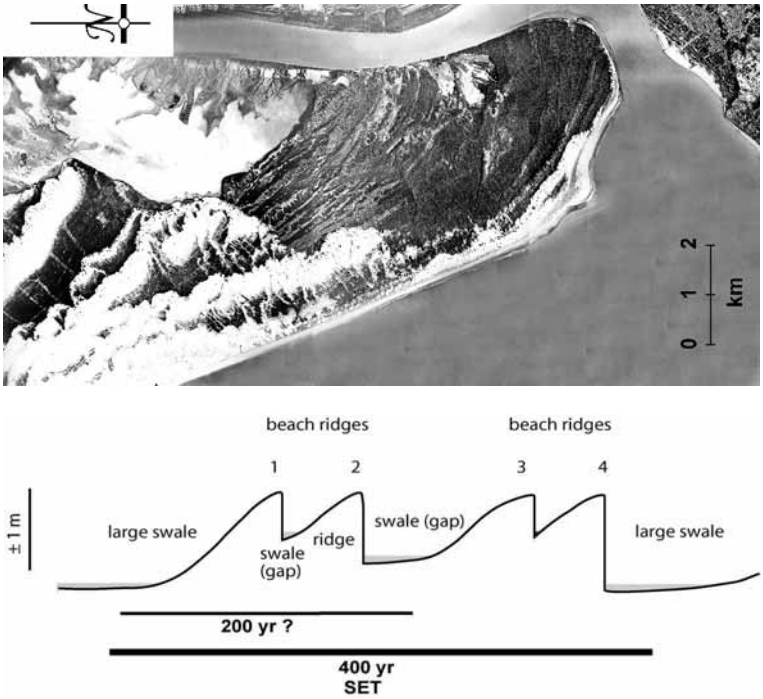


Fig. 11.23. *Flecha de Doñana (Cádiz) y esquema de acumulación de aproximadamente 100 años (Zazo et al. 1994).*

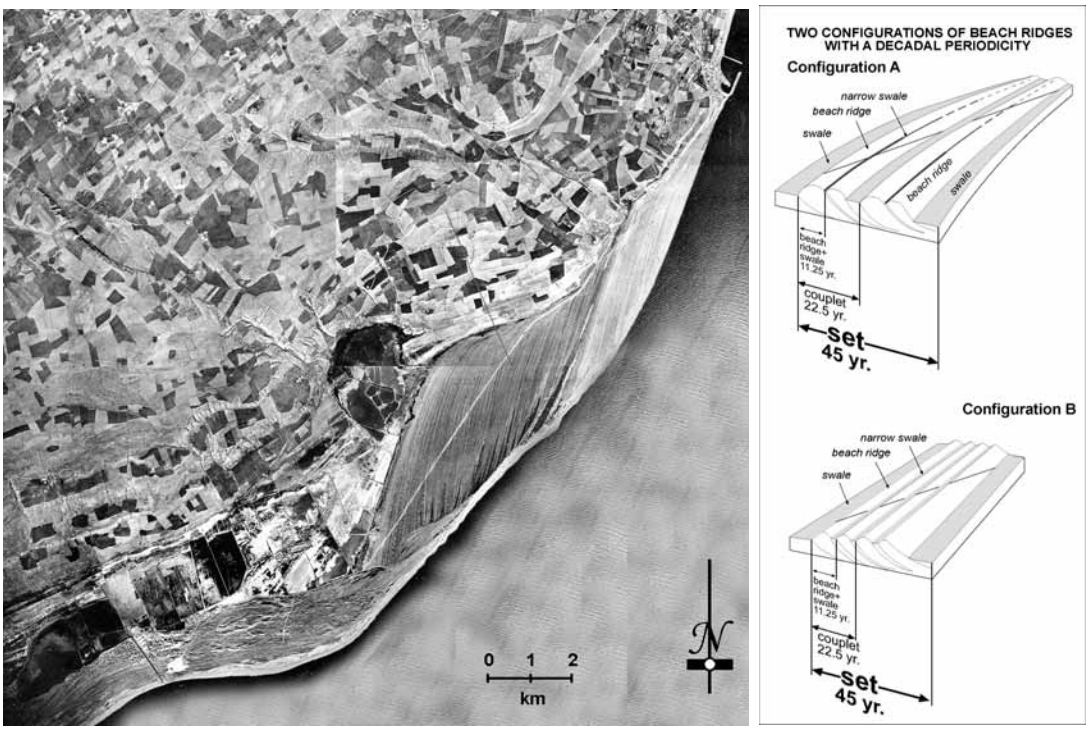


Fig. 11.24*. Playa de Roquetas (costa de Almería) y esquema de acumulación cada 11 y 45 años (Goy et al. 2003).*

En los registros recientes llevados a cabo por Rodríguez-Ramírez *et al.* (2000) en las flechas del litoral de Huelva para los últimos 40 años se relaciona la formación de crestas de playa de muy pequeña entidad (figura 11.25) con intensificación de los vientos del SW (tormentas), Índice NAO negativo y menor número de manchas solares (figura 11.26).

Escala secular ("centennial"). La tendencia progradante es decir el avance costero general en las costas anteriores se interrumpe periódicamente (figura 11.27) por superficies erosivas debidas a incrementos de la intensidad de las tormentas unidos a un pequeño ascenso del NMM estimado entre 0.5 y 0.8 m (Goy *et al.* 2003). La duración de estos episodios es muy pequeña (unas decenas de años), pero causan efectos muy visibles en la organización de las unidades morfo-sedimentarias. Entre 6000 y 3000 BP las erosiones se producían cada 600 años aproximadamente pero desde 2700 BP el intervalo se redujo a 400 y 200 años. Este cambio coincidió con una modificación relevante en el régimen de vientos dominantes que rolaron del oeste al suroeste modificando las derivas litorales y desencadenando erosiones (Zazo *et al.* 1994, Borja *et al.* 1999, Dabrio *et al.* 2000, Goy *et al.* 2003).

A *escala milenaria* se reconocen episodios de progradación costera que duran entre 1200 y 1500 años que Zazo *et al.* (1994) denominaron unidades "**H**": unidades de flechas progradantes que componen los sistemas de flechas. Se han reconocido en las flechas del Piedras Punta Umbría y Doñana (Huelva), Valdelagrana (Cádiz), Calahonda (Granada Lario *et al.* 1999), Roquetas (Goy *et al.* 2003) y Albufera de Alcudia (Mallorca Goy *et al.* 1996). Están separados por intervalos durante los que no se acumulaban crestas de playa o si lo hacían eran más pequeñas y se depositaban a cotas topográficamente más bajas lo que se interpreta como el resultado de un descenso transitorio (de duración secular) del NMM estimado entre 0.5 y 0.8 m, unido a una reducida actividad de las tormentas. Estos episodios sin crestas también llamados *gaps* se formaron en poco tiempo entre 200 y 400 años. Se reconocen bien los de edades aproximadas de 5.5. 2.7 y 0.7 Ka y mucho peor el de ~4.2 Ka.

Los *gaps* o interrupciones se interpretan como el resultado de periodos de extrema aridez dentro de la tendencia general a la aridez. Estas condiciones serian dominantes con periodos prolongados de NAO positiva y menor intensidad del flujo de entrada de Agua Atlántica Superficial hacia el Mediterráneo (Goy *et al.* 2003). Al comparar estos resultados con los datos del Mar de Alborán y el Atlántico Norte obtenidos a partir de otros *proxies* se observa que coinciden con algunos de los eventos de fríos Bond a 5.9, 4.3 y 2.8 Ka y al menos uno (5.36 Ka) de los eventos fríos del agua marina superficial (SST) descritos por Cacho *et al.* 2001.

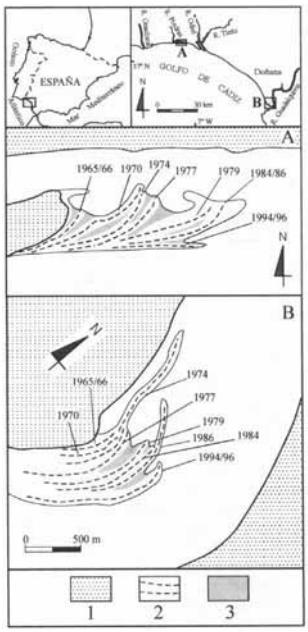


Fig. 11.25. *Crestas y surcos de playa. Cronología de crecimiento entre 1956 y 1996 para las playas de El Rompido (A) y Doñana (B) en el golfo de Cádiz (Rodríguez Ramírez et al. 2000).*

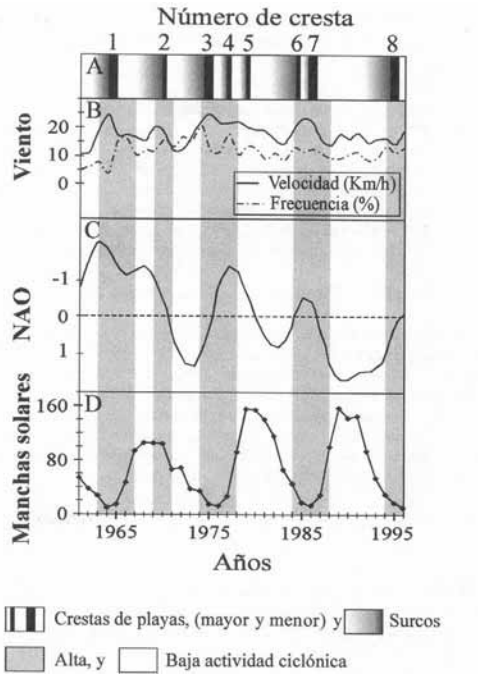


Fig. 11.26. *Relación entre la formación de crestas de playa con manchas solares índice NAO negativo y vientos intensos del SW (Rodríguez Ramírez et al. 2000).*

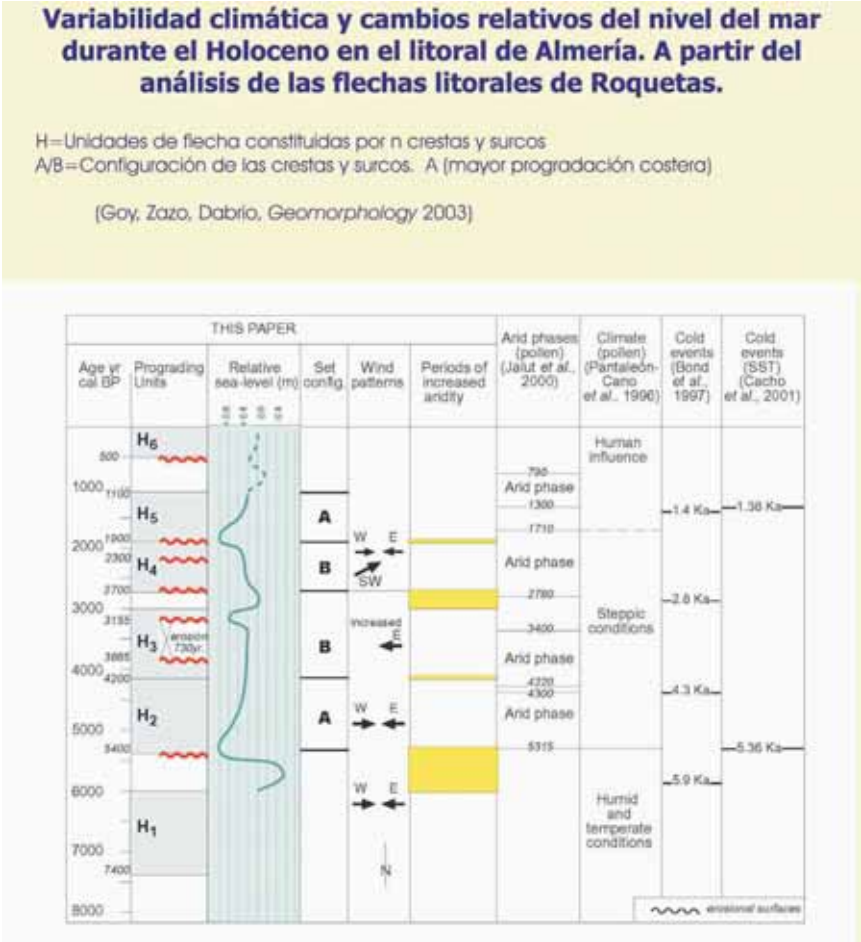


Fig. 11.27. *Tendencia progradante interrumpida por superficies erosivas debidas a incrementos en la intensidad de las tormentas y en pequeños ascensos del NMM (Goy et al. 2003).*

11.7.4. Interacciones

Las tendencias y ciclicidades descritas se solapan cada una con una periodicidad concreta y en teoría deben producir armónicos e interferencias. No obstante el periodo de los ciclos no es demasiado constante y tiene un margen de error muy apreciable a la escala de la vida humana. Las ciclicidades más generales implican cambios en el sistema atmósfera-océano y son de escala milenaria con periodicidades entre 1200 y 1500 años. Esto se traduce en los denominados Eventos de Bond y se manifiesta en el Atlántico Norte por periodos fríos (cortos con duración de siglos). Según el registro reciente en Roquetas (figura 11.27), estamos a punto de llegar a uno de esos eventos que en nuestras latitudes (área de conexión Atlántico-Mediterráneo), supondrá descenso del nivel del mar, aridez extrema y mayor frecuencia y acción de los vientos saharianos e índice positivo NAO prolongado. En principio este efecto es contrario al que se atribuye habitualmente a las acciones antrópicas (calentamiento global y el ascenso del nivel del mar).

Por otro lado atendiendo a la ciclicidad de 600 años (o algo menor en los dos últimos milenios), nos acercamos a uno de los periodos cortos (de un par de siglos) de NAO dominantemente negativa que producen aumento de las precipitaciones y del nivel del mar y dispara la erosión costera marcando el final de las fases de progradación (en este caso la H6). En principio sus efectos se sumarían a los del cambio climático que suele invocarse generalmente y ascendería el nivel relativo del mar.

En teoría ambas ciclicidades coincidirían y sus efectos relativos se anularían. No obstante el margen de variación de cada una de ellas es lo bastante amplio como para plantear una notable incertidumbre sobre lo que realmente ocurrirá.

Por todo ello con el fin de plantear estrategias de adaptación y mitigación se aconseja considerar dos escenarios de ascenso del NMM para finales de siglo finales de siglo uno que se considera “más probable”, de 50 cm (coherente con la mayoría de las proyecciones y con los datos sobre el Holoceno) y otro de 1 m o “escenario pesimista”. Este último corresponde aproximadamente a las previsiones máximas de varios modelos y también con los ascensos detectados en diferentes puntos del litoral hace unos 5500 y 2000 años. La probabilidad de que se materialice este escenario es menor, particularmente en las costas S y E.

11.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

11.8.1. Factores impulsores

La detección de cambios en los factores impulsores (temperatura precipitación vientos oleaje corrientes), habrá de hacerse por medio de las observaciones meteorológicas u oceanográficas correspondientes. En el caso concreto de la zona costera tiene interés la medida regular del nivel y temperatura del agua de mar, en un número suficiente de puntos (en horizontal y vertical). Igualmente son de interés las medidas continuas de velocidad y dirección del viento así como de oleaje y circulación.

El punto más importante común a todas las variables antes mencionadas es la continuidad y precisión de los registros. De otro modo no se podrá detectar con fiabilidad la "débil" señal del cambio climático a escala decadal.

11.8.2. Respuesta geomorfológica

El elemento más sensible a los cambios en la dinámica litoral son las playas y zonas costeras bajas. La detección de cambios en la extensión forma o posición de las mismas por medio de perfiles con seguimiento regular o continuo a partir de imágenes aéreas o de satélites puede servir para detectar tendencias de variación en el nivel del mar u otros factores impulsores difíciles de detectar de manera directa.

11.8.3. Respuesta de los ecosistemas

De manera análoga se pueden establecer sistemas de seguimiento de las variaciones de extensión o posición de ecosistemas especialmente sensibles como los humedales costeros. Las propiedades de las masas de agua costeras (temperatura salinidad etc) así como su contenido en nutrientes pueden resultar afectadas por cambios locales en la climatología. La penetración salina en acuíferos terrestres es un indicador de notable interés socio-económico aunque difícil de predecir con exactitud.

11.8.4. Respuesta socio-económica en los usos y su gestión

Según se ha indicado los principales recursos a considerar son de tipo “no consumible”, tales como playas dunas humedales. Los cambios de uso en estas unidades han estado determinados en los últimos siglos casi exclusivamente por actividades humanas no dependientes del cambio climático. Es de suponer que en las próximas décadas ese siga

siendo el factor determinante. El seguimiento de esos cambios puede hacerse con facilidad por medio de teledetección a partir de imágenes aéreas o de satélite.

11.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

La mayor parte de los problemas que aquí se han descrito como probables consecuencias del cambio climático se producen también a causa de actividades humanas no relacionadas con aquél. Desde el punto de vista de la política costera lo que interesa sobre todo es atajar dichos problemas no el cambio climático en sí. Por ello se presentan a continuación una serie de recomendaciones para una política de conservación protección y gestión del litoral que resultarán útiles no solamente como acciones de prevención y mitigación del impacto del cambio climático sino también aunque dicho cambio se produjera de manera más lenta que lo esperado o incluso no llegara a producirse.

11.9.1. Anticipación en la toma de decisiones

Aunque hay soluciones (ya sean de tipo estructural o no estructural) para la práctica totalidad de los problemas identificados resulta imposible actuar en toda la costa en un plazo de tiempo corto aunque solo sea por la imposibilidad de dedicar a ese fin suficientes recursos financieros. Por ello es de gran importancia que se tomen las decisiones correspondientes con la debida antelación. Esas decisiones deberían dirigirse en primer lugar hacia aquéllas actuaciones que resultarán beneficiosas en cualquier caso (muchas de ellas descritas más arriba), independientemente de la magnitud y ritmo del cambio climático.

11.9.2. Políticas "desde arriba" o políticas participativas

Los principales problemas que se han descrito pueden agruparse en dos grandes categorías: a) relativos a la estabilidad de playas y costas bajas de materiales incoherentes; b) relativos a costas bajas inundables humedales y zonas intermareales. Ambos tipos de unidades litorales son en su mayor parte de titularidad pública pero su eventual desplazamiento puede afectar a terrenos y bienes privados.

En el caso de medidas que afecten solamente a bienes de titularidad pública (por ejemplo medidas encaminadas a mantener playas confinadas) es posible la puesta en práctica de políticas “desde arriba”, si bien se considera muy conveniente incorporar en la toma de decisiones a los agentes afectados (Administración Central comunidades autónomas municipios propietarios colindantes sectores productivos afectados grupos conservacionistas), con el fin de establecer acuerdos tanto sobre las prioridades de actuación (e inversión) como sobre las soluciones técnicas a adoptar.

Cuando las medidas afecten a bienes privados (por ejemplo estrategias de abandono para dejar que los humedales migren hacia el interior), las medidas de carácter participativo son especialmente necesarias ya que habrán de prever las correspondientes compensaciones.

11.9.3. Criterios de actuación

Los criterios de actuación que se pueden aplicar se derivan de lo anterior y deben tener en cuenta: a) importancia potencial (social económica ecológica) del problema; b) posibilidad de que las medidas a implantar sean innecesarias o incluso contraproducentes si el cambio no se produce en los plazos o con la magnitud previstos; c) inminencia del riesgo o urgencia de la actuación: d) costes de la intervención.

En principio se considera que se debe dar prioridad a políticas que aborden los grandes problemas antes citados con medidas que en cualquier caso serán de utilidad independientemente del ritmo de los futuros cambios (por ejemplo actuaciones en las cuencas que aseguren aportes regulares de sedimentos a la costa con el fin de contribuir a la estabilidad de playas y deltas). Si como consecuencia de la implantación de sistemas de seguimiento se detecta que en algunas zonas hay cambios especialmente rápidos será preciso actuar en ellas con mayor urgencia.

11.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Las necesidades de investigación que se identifican tienen relación por un lado con el conocimiento de las variaciones climáticas ocurridas en el pasado reciente (aproximadamente los últimos 10.000 años) y con el reflejo de éstas en el nivel relativo del mar y los procesos morfodinámicos que han afectado al litoral. Los datos disponibles indican que hace aproximadamente 5500 años existieron condiciones comparables a las que se prevén para finales de siglo. Un conocimiento detallado de la evolución de los procesos pasados (a ser posible con resolución anual o decenal) ayudaría de manera significativa a mejorar la precisión de los pronósticos. Por otro lado es necesario profundizar en el conocimiento que los cambios climáticos en particular del NMM y otros factores impulsores como el oleaje junto con el correspondiente cambio morfodinámico que pueden tener en los ecosistemas litorales sensibles y en las actividades humanas.

Aparte de la necesidad de profundizar en la comprensión de los procesos que actúan se necesita disponer de datos sobre los distintos parámetros que intervienen en los mismos en la actualidad bastante escasos. Esto requiere la puesta en marcha de sistemas de seguimiento y toma de datos sistemática sobre esos parámetros (en el tiempo y en el espacio) que si bien no constituyen estrictamente acciones de investigación son una parte fundamental para el desarrollo de las mismas pues permitirán el establecimiento de relaciones empíricas o la elaboración y validación de modelos.

11.10.1. Factores impulsores y climatología local

Es de especial interés conocer mejor los efectos de los cambios climáticos en el régimen de viento oleaje y patrones de circulación que afectan a cada zona.

11.10.2. Respuesta morfodinámica de la costa

Las unidades más sensibles a los cambios morfodinámicos que afectan al litoral son las playas (y campos de dunas asociados) y otras costas bajas. De particular interés son los deltas que por su subsidencia están ya experimentando un ascenso relativo del NMM. Para mejorar la comprensión de los factores que determinan esos cambios y por tanto la capacidad de predicción y de respuesta ante aquéllos es preciso desarrollar y aplicar modelos que simulen el comportamiento de los principales tipos de playas (cordones arenosos en general), y también establecer sistemas de seguimiento regular de los cambios.

11.10.3. Respuesta de los ecosistemas

Los ecosistemas más importantes en la zona litoral son las dunas las marismas y zonas intermareales. Es preciso tratar de profundizar en el conocimiento de cómo han respondido ante los cambios climáticos pasados (Holoceno), y también establecer sistemas de seguimiento sistemático de las modificaciones que puedan estar sufriendo en la actualidad.

11.10.4. Bienes recursos y usos en zonas costeras y estuarinas

La principal necesidad en este caso es la realización de inventarios de las zonas que se pueden ver afectadas por los principales tipos de procesos descritos. Dado que la mayor parte de los problemas potenciales se derivan del aumento del nivel relativo del mar o de los efectos de los temporales es importante disponer de una cartografía suficientemente detallada (resolución vertical decimétrica o centimétrica) de los entornos potencialmente afectables. Sobre la base de dicha cartografía se pueden delimitar las zonas y elementos en situación de riesgo y hacer una cuantificación de las extensiones y valores afectados.

11.11. BIBLIOGRAFÍA

Altuna J., Cearreta A., Edeso J.M., Elorza M., Isturiz J.M., Mariezkurrena K., Mújika J.A. y Ugarte F.M. 1990. El yacimiento de Herriko-Barra (Zarautz País Vasco) y su relación con las transgresiones marinas holocenas. En: ITGME (Ed.): El Cuaternario de España y Portugal 2: 923-942.

Arz H.W., Gerhardt S., Pätzold J. y Röhl U. 2001. Millennial-scale changes of surface– and deep- water flow in the western tropical Atlantic linked to Northern Hemisphere high-latitude climate during the Holocene. Geology 29: 239-242.

Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., DeMenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I. y Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. Science 278: 1257-1266.

Bond G., Showers W., Elliot M., Evans M., Lotti R., Hadjas I., Bonani G. y Johnson S. 1999. The North Atlantic's 1-2 kyr climate rhythm: Relation to Heinrich events Dansgaard/Oeschger Cycles and the Little Ice Age En: Clark P.U. *et al.* (eds.). Mechanisms of global climate change at millennial time scales: American Geophysical Union Monograph 112: 385-394.

Borja F., Zazo C., Dabrio C.J., Díaz del Olmo F., Goy J.L. y Lario J. 1999. Holocene aeolian phases and human settlements along the Atlantic coast of southern Spain. The Holocene 9: 333-339.

Brunn P. 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. Proceedings of the American Society of Civil Engineering Journal, Waterways and Harbor Division 88: 117-130.

Brunn P. 1986. Worldwide impact of sea level rise on shoreline. Effects in Stratospheric ozone and global climate 4: 99-128.

Brunn P. 1988. The Brunn rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large scale two or three dimensional usage. Journal of Coastal Research 4: 627-648.

Bryan E. 1997. Climate process and change. Cambridge University Press. Cambridge. 209 pgs.

Burjachs F., Pérez-Obiol R., Roure J.M. y Julia R. 1994. Dinámica de la vegetación durante el Holoceno en la isla de Mallorca. Trabajos de Palinología Básica y Aplicada. X Simposio de Palinología (A.P.C.E.). Universitat de Valencia. Valencia. Pgs. 199-210.

Cacho I., Grimalt J.O., Pelejero C., Canals M., Sierro F.J., Flores J.A. y Shackleton N.J. 1999. Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea paleotemperatures. Paleoceanography 14: 698-705.

Cacho I., Grimalt J.O., Canals M., Sbaffi L., Shackleton N.J., Schönfeld J. y Zhan R. 2001. Variability of the Western Mediterranean Sea surface temperatures during the last 25,000 years and its connection with the northern hemisphere climatic changes. Paleoceanography 16: 40-52.

Cacho I., Grimalt J.O. y Canals M. 2002. Response of the Western Mediterranean Sea to rapid climatic variability during the last 50,000 years: a molecular biomarker approach. Journal of Marine Systems 33-34: 253-272.

Cearreta A. 1992. Cambios medioambientales en la ría de Bilbao durante el Holoceno. Cuadernos de Sección. Historia 20: 435-454.

Cearreta A. 1993. Palaeoenvironmental interpretation of Holocene coastal sequences in the southern Bay of Biscay. Geologische Rundschau 82: 234-240.

Cearreta A. 1994. Análisis micropaleontológico del relleno sedimentario holoceno en el estuario del Bidasoa (Golfo de Bizkaia). Geobios 27: 271-283.
Cearreta A. 1998. Holocene sea-level change in the Bilbao estuary (north Spain): foraminiferal evidence. Micropaleontology 44(3): 265-276.
Cearreta A., Edeso J.M., Merino A., Ugalde T. y Ugarte F.M. 1990: Las dunas litorales de Barrika (costa occidental de Bizkaia). Kobie 19: 77-83.
Cearreta A., Edeso J.M. y Ugarte F.M. 1992. Cambios del nivel del mar durante el Cuaternario reciente en el Golfo de Bizkaia. En: Cearreta A. y Ugarte F.M. (eds.). The late Quaternary in the Western Pyrenean Region. Pgs. 57-94.
Cearreta A. y Murray J.W. 1996. Holocene paleoenvironmental and relative sea-level changes in the Santoña estuary Spain. Journal of Foraminiferal Research 6(4): 289-299.
Cendrero A. 2003. De la comprensión de la historia de la tierra al análisis y predicción de las interacciones entre seres humanos y medio natural. Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales Madrid. 98 pgs.
Cendrero A. y Díaz de Terán J.R. 1977. Caracterización cuantitativa del desarrollo histórico del relleno de la Bahía de Santander; un proceso natural activado por el hombre. Revista de Obras Públicas (Oct. 1977): 797-808.
Cendrero A., Díaz de Terán J.R. y Salinas J.M. 1981. Environmental economic evaluation of the filling and reclamation process in the Bay of Santander, Spain. Environmental Geology 3: 325-336.
Cendrero A., Rivas V. y Remondo J. 2004 (en prensa). Influencia humana sobre los procesos geológicos superficiales; consecuencias ambientales. En: Naredo J.M. (ed.). Incidencia de la especie humana sobre la Tierra. Colección Economía y Naturaleza Fundación César Manrique Lanzarote.
Chapman M.R. y Shackleton N.J. 2000. Evidence of 550-year and 1000 year cyclities in North Atlantic circulat on patterns during the Holocene. The Holocene 10: 287-291.
Dabrio C.J. y Polo M.D. 1987. Holocene sea-level changes coastal dynamics and human impacts in Southern Iberian Peninsula. Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario 10: 227-247.
Dabrio C.J., Boersma J.R., Fernández J., Martín J.M. y Polo M.D. 1980. Dinámica costera en el Golfo de Cádiz: sus implicaciones en el desarrollo socioeconómico de la región. I Reunión Nacional del Grupo Español de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Santander. 19 pgs.
Dabrio C.J., Zazo C., Somoza L., Goy J.L., Bardají, T., Lario J. y Silva P.G. 1996. Oscilaciones del nivel del mar de largo y corto plazo: indicadores morfosedimentarios en zonas costeras. Geogaceta 20: 1679-1682.
Dabrio C.J., Zazo C., Goy J.L., Sierro F.J., Borja F., Lario J., González J.A. y Flores J.A. 2000. Depositional history of estuarine infill during the Late Pleistocene-Holocene postglacial transgression. Marine Geology 162: 381-404.
Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen J.P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jouzel J. y Bond G. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. Nature 364: 218-220.
Del Río L., Benavente J., Gracia F.J., Anfuso G., Martínez del Pozo J.A., Domínguez L., Rodríguez-Ramírez A., Flores E., Cáceres L., López-Aguayo F. y Rodríguez-Vidal J. 2002. En: Litoral 2002. The Changing COAST. Eurocoast/EUCC Porto- Portugal (Ed. EUROCOAST). The quantification of coastal erosion processes in the South Atlantic-Spanish coast: methodology and preliminary results.
de Vriend H.J. 1991. Mathematical Modelling and Large-Scale Coastal Behaviour. Part I: Physical Processes. Journal of Hydraulic Research 29(6): 727-740.
Edeso J.M. 1990. Geomorfología fluvial y litoral del extremo oriental de Guipúzcoa (País Vasco). Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.
Edeso J.M. 1994. El relleno holoceno de la depresión de Zarauz. Lurralde 17: 115-152.
Emery K.O. y Ausbrey D.G. 1991. Sea Levels Land Levels and Tide Gauges Springer-Verlag, New York, 237 pgs.

Fernández-Salas L.M., Lobo F.J., Hernández-Molina F.J., Somoza L., Rodero J., Díaz del Río V. y Maldonado A. 2003. High-resolution architecture of late Holocene highstand prodeltaic deposits from southern Spain: the imprint of high-frequency climatic and relative sea-level changes. Continental Shelf Research 23: 1037-1054.

Flor G. 1983. Las rasas asturianas: ensayos de correlación y emplazamiento. Trabajos de Geología 13: 65-81.

Flor G. 1995. Evolución post-flandriense e histórica en el complejo estuarino de Avilés (Asturias). Reunión Monográfica sobre El Cambio de la costa: los sistemas de rías. Vigo 15-18.

Gómez Gallego J. 1994. Estudio de las variaciones del nivel del mar: anuales estacionales y mensuales en el puerto de Santander. Actas IV Coloquio Internacional sobre Oceanografía del Golfo de Vizcaya. Pgs. 83-97.

González-Díez A., Salas L., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 1996. Late Quaternary climate changes and land mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian Region Spain. Geomorphology 3-4: 291-309.

González-Díez A., Remondo J., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 1999. A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. Geomorphology 30: 95-113.

Goy J.L., Zazo C., Dabrio C.J., Lario J., Borja F., Sierro F. y Flores J.A. 1996. Global and regional factors controlling changes of coastlines in southern Iberia during the Holocene. Quaternary Science Reviews 15(3-4): 1-8.

Goy J.L., Zazo C. y Cuerda J. 1997. Evolución de las áreas margino-litorales de la costa de Mallorca (I. Baleares) durante el Último y Presente Interglacial: nivel del mar holoceno y clima. Boletín Geológico y Minero 108-4 y 5: 455-463.

Goy J.L., Zazo C. y Dabrio C.J. 2003. A beach-ridge progradation complex reflecting periodical sea-level and climate variability during the Holocene (Gulf of Almería Western Mediterranean). Geomorpholgy 50: 251-268.

Hoyos Gómez M. 1987. Upper Pleistocene and Holocene marine levels on the Cornisa Cantabrica (Asturias Cantabria y Basque Country Spain). Trabajos en Neógeno-Cuaternario. Museo Nacional de Ciencias Naturales. C.S.I.C. Tomo X. Cambios del nivel del mar en España en el Cuaternario reciente. Madrid. Pgs. 251-258.

IPCC. 1995. Climate Change 1995: IPCC Second Assessment International Panel on Climate Change WMO - UNEP. Geneva-Nairobi.

IPCC. 1998. Climate Change 1998. Cambridge Univ. Press.

IPCC. 1999. Climate Change 1999. Cambridge Univ. Press.

IPCC. 2001. Climate Change 2001. Cambridge Univ. Press.

Jalut G., Esteban Amat A., Bonnet L., Gauquelin T. y Fontugne M. 2000. Holocene climatic changes in the Western Mediterranean from south-east France to south-east Spain. Palaeogeography, Palaeclimatology, Palaeoecology 160: 255-290.

Jiménez J.A., Valdemoro H.I., Sánchez-Arcilla A. y Stive M.J.F. 1993. Erosion and Accretion of the Ebro Delta Coast: a Large Scale Reshaping Process. En: Large Scale Coastal Behaviour'93, US Geological Survey Open File Report 93-381: 88-91.

Jiménez J.A. y Sánchez-Arcilla A. 1993. Medium-term coastal response at the Ebro delta Spain. Marine Geology 114:105-118.

Jiménez J.A. y Sánchez-Arcilla A. 1997. Physical Impacts of Climatic Change on Deltaic Coastal Systems (II): Driving Terms. Climatic Change 35: 95-118.

Jiménez J.A., Sánchez-Arcilla A., Valdemoro H.I., Gracia V. y Nieto F. 1997. Processes reshaping the Ebro delta. Marine Geology 144: 59-79.

Jiménez J.A., Guillén J., Gracia V., Palanques A., García M.A., Sánchez-Arcilla A., Puig, P., Puigdefábregas J. y Rodríguez G. 1999. Water and sediment fluxes on the Ebro delta shoreface: On the role of low frequency currents. Marine Geology 157: 219-239.

Lambeck A., Purcell P., Johnston M., Nakada M. y Yokoyama, Y. 2003. Water-load definition in the glacio-hydro-isostatic sea-level equation. Quaternary Science Reviews 22: 2-4, 309-318.

Lario J., Zazo C. y Goy J.L. 1999. Fases de progradación y evolución morfosedimentaria de la flecha litoral de Calahonda (Granada) durante el Holoceno. Estudios Geológicos 55(5-6): 247-250.

Lario J., Zazo C., Goy J.L. , Dabrio C.J., Borja F.,Silva P.G., Sierro F., González A., Soler, V. e Yll E. 2002. Changes in sedimentation trenes in SW Iberia Holocene estuarios (Spain). Quaternary International 93-94: 171-176.

Loutre M.F., Berger, A., Bretagnon P. y Blanc, P.-L. 1992. Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale. Climate Dynamics 7: 181-194.

Marchal O., Cacho I., Stocker, Th, F., Grimalt J.O., Calvo E., Martrat B., Shackleton N., Vautravers M. Cortijo E., Kreveld S. van Andersson C., Koç, N., Chapman M., Sbaffi L., Duplessy J-Cl., Sarnthein M., Turon J-L Duprat J. y Jansen E. 2002. Apparent long-term cooling of the sea surface in the northeast Atlantic and Mediterranean during the Holocene. Quaternary Science Reviews 21: 455-483.

Marcos M., Gomis D., Monserrat S., Álvarez E., Pérez B. y García-Lafuente J. (enviado) Consistency of long sea-level time series in the Northern coast of Spain.

Mariscal B. 1983. Estudio polínico de una turbera en el Cueto de la Avellanosa (Polaciones). Cantabria. Tesis de Licenciatura Univ. Complutense Madrid.

Mariscal B. 1986. Análisis polínico de la turbera del Pico Sertal de la Sierra de Peña Labra. Reconstucción de la paleoflora y de la paleoclimatología durante el Holoceno en la zona oriental de la Cordillera Cantábrica. En: López Vera F. (ed.). International Symposium on Quaternary Climate in the Western Mediterranean. Universidad Autónoma de Madrid: Pgs. 205-220.

Mariscal B. 1987. Estudio palinológico de la flora holocénica de Cantabria. Aspectos paleoclimáticos. Tesis Doctoral Univ. Complutense. Madrid.

Mary G. 1968. Datation de la plage fossile de Xivares (Espagne): Comptes Rendus De L´Academie des Sciences Serie D 266: 1941-1942.

Mary G. 1973. Un diagramme sporopollinique et des datations C-14 pour la tourbiére du Llano de Roñanzas Asturias (España). Boletín de la Sociedad Geológica Francesa 25. 38.

Mary G. 1975. Oscillation d´age atlantique du niveau marin sur le plage de la Jerra (San Vicente de la Barquera Santander). Brevioria Geológica Astúrica año XIX, 4: 49-51.

Mary G. 1979. Evolution de la bordeure cotiere asturienne. Tesis doctoral tomo 1, 288 pgs.

Mary G. 1985. Niveaux marins du littoral asturien et galicien entre San Vicente de la Barquera y Foz. I Reunión del Cuaternario Ibérico. Lisboa. Pgs. 219-228.

Mary G. 1992. La evolución del litoral cantábrico durante el holoceno. En: Cearreta A. y Ugarte F. (eds.). The Late Quaternary in the western Pyrenean Region. Bilbao. Pgs. 161-170.

Mary G., Medus J. y Delibrias G. 1975. Le Quaternaire de la cote asturienne (Espagne). Bulletin de l´association Française pour l´étude du Quaternaire 42(1): 13-23.

Medina R., Losada I.J., Méndez F.J,. Olabarrieta M., Liste M., Menéndez M., Tomás A., Abascal A.J., Agudelo P., Guanche R. y Luceño A. 2004. Impacto en la Costa Española por Efecto del Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático –Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente). 3 tomos.

Méndez G., Pérez-Arlucea M., Clemente F., Nombela M. y Rubio B. 2003. Sediment yield and sedimentation rates in recent coastal deposits at the Ria de Vigo (Galicia Spain). Anthropogenic or climatic causes?. Quaternary Climatic Changes and Environmental Crises in the Mediterranean Region (Meeting). Dpto. de Geología Universidad de Alcalá. Pgs. 107-116.

Menéndez Amor J. 1961a. La concordia entre la composición de la vegetación durante la segunda mitad del Holoceno en la costa de Levante (Castellón) y en el oeste de Mallorca. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural.(Geol.) LIX: 97-100.

Menéndez Amor J. 1961b. Resultados del análisis polínico de una serie de muestras de turba recogidas en La Ereta del Pedregal (Navamés Valencia). Archivo de Prehistoria Levantina IX: 97-99.

Menéndez Amor J. 1961c. Contribución al conocimiento de la historia de la vegetación en España durante el Cuaternario. Estudios Geológicos XVII: 83-99.

Menéndez Amor J. 1963. Sur les éléments steppiques dans la végétation quaternaire de l´Espagne. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Geol.) 51: 21-133.

Menéndez Amor J. y Florchutz F. 1961. Contribución al conocimiento de la vegetación en España durante el Cuaternario. Resultado del análisis palinológico de algunas series de muestras de turbas arcillas y otros sedimentos recogidos en los alrededores de: I Puebla de Sanabria (Zamora); II Buelna (Asturias) Vivero (Galicia) y en Levante. Estudios Geológicos XVI: 83-89.

Menéndez Amor J. y Florchutz F. 1963. Sur les éléments steppiques dans la végétation quaternaire de l´Espagne. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Geol.) 61: 121-133.

Menéndez Amor J., y Florchutz F. 1964. Resultado del análisis paleobotánico de una capa de turba en las cercanías de Huelva (Andalucía). Estudios Geológicos XX: 183-186.

Méndez G., Pérez-Arlucea M., Clemente F., Nombela M. y Rubio B. 2004. Sediment yield and sedimentation rates in recent coastal deposits at the Ria de Vigo (Galicia Spain). Anthropogenic or climatic causes?

MIMAM. 2000. Libro blanco del agua en España. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Madrid. 637 pgs.

Mitosek H.T. 1995. Climate Variability and Change within the Discharge Time Series: A Statistical Approach, Climatic Change 29: 101-116.

Moñino M. 1986. Establecimiento y cartografía de los niveles de rasa litoral existentes en Cantabria. Tesis de Licenciatura. Universidad de Cantabria.

Moñino, M., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 1988. Pleistocene sea level changes in the Cantabrian coast Spain. En: Singh S. y Tiwari R.C. (eds.). Geomorphology and Environmental Management Allahabad Geogr. Soc., Allahabad, India. Pgs. 351-364.

Morhange C. 1994. La mobilite recente des Littoraux Provencaux: Elements d'Analyses Geomorphologique These de 3eme cycle Universite de Provence Aix-en-Provence.

Mörner N.A. 2003. Sea Level Changes in the Past at Present and in the Near-Future. Global Aspects Observations versus Models. Coastal Environmental Change During Sea-Level Higstands: A Global Synthesis with implications for management of future coastal change. Puglia 2003 – Final Conference Project IGCP 437: 5-9.

Mosquera Sante M.J., Mateu Mateu, G.A. y Vidal Romani J.R. 1994. Estudio del depósito de Puerta Real. Un episodio regresivo holoceno en la Ría de Coruña. Gaia. Revista de Geociencias 9: 75- 78.

Nicholls R.J. y Branson J. 1998. Coastal Resilience and Planning for an Uncertain Future: An Introduction. The Geographical Journal 164, part 3: 255-258.

Otter H.S., Van der Veen A. y De Vriend H.J. 1996. Analysis of the Effects of a Sea Level Rise on the Socio-Economy of the Ebro Delta Spain. En: Impact of Climatic Change on North-wester Mediterranean Deltas Meddelt Final Book of Papers Vol. II The present and de Future Venezia. Pgs. 3.35-3.51.

Pantaleón-Cano J., Yll E.I., Pérez-Obiol R. y Roure J.M. 1996. Las concentraciones polínicas en medios semiáridos. Su importancia en la interpretación de la evolución del paisaje. En: Ramil Rego P., Fernández Rodríguez C. y Rodríguez-Guitián M. (eds). Biogeografía Pleistocena-Holocena de la Península Ibérica. Xunta de Galicia Santiago de Compostela. Pgs. 215-226.

Peltier W.R. y Tushinghan A.M. 1989. Global sea level rise and greenhouse effect.Might there be a connection?. Science 244: 806-810.

Peñalba M.C. 1989. Dynamique de végetation tardiglaciaire et holocene du centre-nord de l'Espagne d'après l'analyse pollinique. These. Université d'Aix Marseille III.

Pirazzoli P.A. 1991. World Atlas of Holocene Sea-Level Changes. Oceanography Series 58. Elsevier, Amsterdam. 300 pgs.

Remondo J., González-Díez A., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 2003. Landslide susceptibility models using spatial data analysis techniques; a case study from the lower Deva valley Guipúzcoa (Spain). Natural Hazards 30: 267-279.

Remondo J., González-Díez A., Soto J., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 2004. Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas. Geomorphology (enviado).

Rivas V. 1991. Evolución reciente y estado actual del litoral cantábrico oriental. Tesis Doctoral Universidad de Murcia.

Rivas V. y Cendrero A. 1987. Acreción litoral durante el Holoceno en las rías de Cantabria. Actas VIII Reunión sobre el Cuaternario. Santander. Pgs. 241-243.

Rivas V. y Cendrero A. 1990: Land reclamation in northern Spain: some potential economic consequences. Proceedings Sixth International IAEG Congress. Balkema Rotterdam. Pgs. 227-233.

Rivas V. y Cendrero A. 1991. Use of natural and artificial acretion on the north coast of Spain; historical trends and assessment of some environmental and economic consequences. Journal of Coastal Research 7(2): 491-507.

Rivas V. y Cendrero A. 1992. Determination of the evolutionary condition of coastal cliffs on the basis of geological and geomorphological parameters. International Coastal Congress (ICC). Kiel. Pgs. 214-222.

Rivas V. y Cendrero A. 1995. Human influence in a low-hazard coastal area: an approach to risk assessment and proposal of mitigation strategies. Coastal Hazards. Perception Susceptibility and Mitigation. Journal of Coastal Research 12: 289-298.

Rivas V., Cendrero A., Hurtado M., Cabral M., Giménez J., Forte L., del Rio L., Cantú M. y Becker A. 2004. Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina. Geomorphology (enviado).

Rodríguez Asensio J.A. y Flor G. 1980. Estudio del yacimiento prehistórico de Bañugues y su medio depósito (Gozón Asturias). Revista Zephyrus XXX-XXXI: 205-222.

Rodríguez-Ramírez A. 1998. Geomorfología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Ministerio de Medio Ambiente. 146 pgs.

Rodríguez-Ramírez A., Cáceres L.M., Rodríguez Vidal J. y Cantano M. 2000. Relación entre clima y génesis de crestas/surcos de playa en los últimos cuarenta años (Huelva Golfo de Cádiz). Revista Cuat. Geomorf. 14: 109-113.

Rodríguez-Ramírez A., Ruiz F., Cáceres L.M., Rodríguez Vidal J., Pino R. y Muñoz J.M. 2003. Análisis of the recent storm record in the southwestern Spanish coast: implications for littoral management. The Science of the Total Environment 303: 189-201.

Salas L. 1993. Análisis de las variaciones climáticas holocenas en la región cantábrica a partir de estudios palinológicos; influencia de la degradación diferencial del polen en las interpretaciones paleoclimáticas. Tesis Doctoral Univ. Zaragoza.

Salas L., Remondo J. y Martínez P. 1996. Cambios del nivel del mar durante el Holoceno en el Cantábrico a partir del estudio de la turbera de Trengandín. IV Reunión de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología. Pgs. 237-247.

Sánchez-Arcilla A. y Jiménez J.A. 1994. Breaching in a Wave-Dominated Barrier Split: The Trabucador Bar (Northeastern Spanish Coast). Earth Surface Processes and Landforms 19: 483-498.

Sánchez-Arcilla A., Jiménez J.A. y Valdemoro H. 1998. The Ebro Delta: morphodynamics and vulnerability. Journal of Coastal Research 14: 754-772.

Sánchez-Arcilla A., Jiménez J.A., Valdemoro H.I., Gracia V. y Galofré J. 2001. Sensitivity analysis of longshore sediment transport rate estimatioon in a highly eroding coast the Montroig beach (Tarragona Spain). Coastal Dynamics 2001. Proc. of the 4th Conference on Coastal Dynamics Lund Sweden 11-15 June 2001, ASCE. Pgs. 112-121.

Sánchez-Arcilla A., Sierra J. P., Cáceres I., González Marco D., Alsina J.M., Montoya F. y Galofre J. 2004. Beach dynamics in the presence of a Low Crested Structure. The Altafulla case. Journal of Coastal Research (enviado).

Santos Fidalgo M.L., Bao Casal R. y Jalut G. 1993. Estudio micropaleontológico de una turbera litoral holocena en la Ría de Ares (A Coruña España). Cuaderno Lab. Xeolóxico de Laxe 18: 175-188.

Santos Fidalgo M.L. y Vidal Romaní J.R. 1993a. El lagoon de Seselle: un episodio de la transgresión holocena en la Ría de Ares (A Coruña Galicia España). Datos

geomorfológicos sedimentarios y paleoecológicos. Cuaderno Lab. Xeolóxico de Laxe 18: 163-174.

Santos Fidalgo M.L. y Vidal Romaní J.R. 1993b. La transgresión holocena en la Ría de Ares (A Coruña Galicia España). Datos cronológicos sedimentarios y geomorfológicos. 3 Reunión del Cuaternario Ibérico. Coimbra. Pgs. 339-345.

Smith D., Raper S.B., Zerbini S. y Sánchez-Arcilla A. (eds.). 2000. Sea level change on coastal processes. Implications for Europe. Office for Official Publications of the European Communities EUR 19337, 247 pgs.

Somoza L., Barnolas A., Arasa A., Maestro A., Rees J.G. y Hernández-Molina F.J. 1998. Architectural stacking patterns of the Ebro delta controlled by Holocene high-frequency eustatic fluctuations delta-lobe switching and subsidence processes. Sedimentary Geology 117: 11-32.

Stuiver M. y Reimer P.J. 1993. Extended C-14 data base and revised Calib 3.0 age calibration program. Radiocarbon 35: 215-230.

Suanez S. 1997. Dynamiques sédimentrires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du Delta du Rhône. Université Aix-Marseille I Aix-en-Provence Francia. Thèse doct., 282 pgs.

Van Geen A., Adkins J.F., Boyle E.A., Nelson C.H. y Palanques A. 1997. A 120 yr record of widespread contamination from mining of the Iberian pyrite belt. Geology 25: 291-294.

Vanney J.R. 1970. L`Hidrologie du Bas Guadalquivir.-Instituto de Geografia Aplicada del Patronato Alonso de Herrera CSIC, Madrid. 175 pgs.

Van Rijn L.C. 1993. Principles of Sediment Transport in River, Estuaries and Coastal Seas Aqua Pub., Amsterdam. 654 pgs. + anexos.

Vidal Romaní J.R., Bao Casal R., Mosquera M.J. y Salas B. 1997. Pruebas de los cambios en el nivel del mar en el noroeste de la Península Ibérica después del último período glaciar. 2º Simposio sobre el Margen Continental Ibérico Atlántico. Cádiz. Pgs. 139-140.

Wright L.D. 1987. Shelf-Surfzone Coupling: Diabathic Shoreface Transport. Coastal Sediments'87, ASCE. Pgs. 25-40.

Yll E.I., Roure J.M., Pantaleón-Cano J. y Pérez-Obiol R. 1994. Análisis polínico de una secuencia holocénica en Roquetas de Mar (Almería). En: Mateu I., Dupré M., Güemes J. y Burgaz M.E. (eds.).Trabajos de palinología básica y aplicada. Universitat de Valencia. Pgs. 189-198.

Yll R., Zazo C., Goy J.L., Pérez-Obiol R., Pantaleón-Cano J., Civis J., Dabrio C., González A., Borja F., Soler V., Lario J., Luque L., Sierro F., González-Hernández F.M., Lézine A.M. Dénefle M. y Roure J.M. 2003. Quaternary plaeoenvironmental changes in South Spain. En: Ruiz-Zapata M.B., Dorado M., Valdeolmillos A. y Gil M.J. (Eds.). Quaternary climatic changes and environmental crises in the Mediterranean region. Publicaciones Universidad. Alcálá de Henares Madrid Spain. Pgs. 201-214.

Zazo C., Dabrio C.J. y Goy J.L. 1987. Evolution of the lowlands littorals of Huelva and Cadix (Spain) from the Holocene until now. European workshop on interrelated bioclimatic and land use changes. 17-21 October 1987, Noordwijkerhout The Netherlands.

Zazo C., Goy J.L., Somoza L., Dabrio C.J., Belloumini G., Improta S., Lario J., Bardají T. y Silva P.G. 1994. Holocene sequence of sea-level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast. Journal of Coastal Research 10: 933-945.

Zazo C., Dabrio C.J., Goy J.L., Bardají T., Ghaleb B., Lario J., Hoyos M., Hillaire-Marcel Cl., Sierro F., Flores J.A., Silva P.G. y Borja F. 1996. Cambios en la dinámica litoral y nivel del mar durante el Holoceno en el Sur de Iberia y Canarias Orientales. Geogaceta 20: 1078-1079.

Zazo C., Dabrio C.J., Borja J., Goy J.L., Lézine A.M., Lario J., Polo M.D., Hoyos M. y Boersma J.R. 1999. Pleistocene and Holocene aeolian facies along the Huelva coast (southern Spain): climatic and neotectonic implications. Geologie en Mijnbouw 77: 209-224.

12. IMPACTOS SOBRE LOS RIESGOS NATURALES DE ORIGEN CLIMÁTICO

Gerardo Benito, Jordi Corominas y José Manuel Moreno

Los desastres naturales se definen como fenómenos naturales que ocurren en un espacio y tiempo limitados causando trastornos en los patrones normales de vida (Olcina y Ayala-Carcedo 2002). En España, los desastres naturales han producido entre 1971 y 2002 daños materiales superiores a 3400 millones de euros (>110 millones de euros anuales según CCS 2003, expresados en euros de 31 de diciembre de 2002), ocasionando más de 1680 víctimas mortales (según Olcina *et al*. 2002; incluyendo las 794 víctimas de las inundaciones de 1962 en Cataluña). En la última década, y coincidiendo con el Decenio Internacional para la reducción de los Desastres Naturales (1990-2000), estos daños se han incrementado considerablemente, casi de forma exponencial (ver estadística de daños en Piserra *et al*., este volumen), con daños materiales superiores a 515 millones de euros y 480 víctimas mortales (según CCS 2003 y Olcina *et al*. 2002, respectivamente). Esta tendencia al aumento en el daño producido por los desastres naturales favorece la idea de que se está produciendo una mayor frecuencia de eventos extremos asociada a los efectos del cambio climático. En este sentido, debemos disociar la frecuencia y magnitud de los desastres naturales del impacto socio-económico y la percepción mediática que, en muchas ocasiones, responden más a la intensiva ocupación del territorio (exposición al riesgo de bienes y personas), y la disminución de los umbrales de tolerancia ante los riesgos naturales.

Los riesgos naturales asociados al clima y al tiempo atmosférico de mayor impacto en España, y que afectan a zonas terrestres, incluyen inundaciones, sequías, movimientos de ladera, aludes, rayos, incendios forestales, vendavales, ventiscas, pedriscos, galernas, temporales, olas de frío y de calor, y colapsos con afección a edificios y obras de ingeniería civil. Los mayores impactos humanos en las últimas cinco décadas se han producido en las inundaciones (1525 víctimas), olas de frío (>40 víctimas), olas de calor (>6000 víctimas), movimientos de ladera (>39 víctimas), aludes (>17 víctimas), temporales de viento (>15 víctimas), y rayos (>2100 víctimas). En este capítulo se abordarán las posibles repercusiones del cambio climático en algunos desastres naturales y particularmente en las inundaciones, movimientos de ladera y aludes, rayos e incendios forestales.

12. IMPACTOS SOBRE LOS RIESGOS NATURALES DE ORIGEN CLIMÁTICO

A. RIESGO DE CRECIDAS FLUVIALES

Gerardo Benito

Contribuyentes

M. Barriendos, C. Llasat, M. Machado, V. Thorndycraft

Revisores

A. Jiménez Álvarez, T. Estrela, A. Díez Herrero

Y. Enzel

RESUMEN

Las condiciones climáticas y de relieve de la Península Ibérica favorecen la generación de crecidas. En España las inundaciones han producido históricamente fuertes impactos socioeconómicos, con más de 1525 víctimas en las últimas cinco décadas. Las crecidas fluviales se producen como consecuencia de anomalías meteorológicas de escala espacio-temporal limitada que no pueden ser representadas en los modelos físicos que predicen los diferentes escenarios de cambio climático futuro. Los posibles escenarios del impacto del cambio climático en el régimen de crecidas se pueden diagnosticar a partir de las relaciones milenarias de la respuesta de las crecidas a los cambios del clima obtenidas a partir de datos geológicos y documentales.

En las cuencas atlánticas, la generación de crecidas, duración y magnitud se encuentran muy ligadas a los cambios en la precipitación invernal. Los registros de paleocrecidas y de crecidas documentales muestran una mayor frecuencia de eventos ordinarios y extraordinarios durante los estadios iniciales y finales de periodos fríos como la Pequeña Edad del Hielo, también conocida como miniglaciación (1550-1850). En el periodo instrumental (1910 hasta la actualidad), los ríos atlánticos han experimentado una disminución de la frecuencia de las crecidas extraordinarias y catastróficas, aunque la magnitud de las mismas se han mantenido e incluso aumentado a pesar del efecto laminador de los embalses. Esta tendencia al aumento de la variabilidad hidrológica se prevé se mantenga en las próximas décadas (incertidumbre media) si tenemos en cuenta la intensificación de la fase positiva del índice de Oscilación del Atlántico Norte (en inglés NAO). En el caso de los ríos Duero y Ebro, los caudales punta pueden verse afectados por fenómenos de deshielo súbito como consecuencia de las variaciones de temperatura de invierno y primavera.

En las cuencas mediterráneas las series de crecidas del pasado indican que las avenidas extremas se han producido durante periodos de elevada irregularidad de la precipitación tanto estacional como anual. En periodos recientes (décadas de los setenta y ochenta) se ha observado un incremento en la generación de las lluvias intensas, algunas causantes de crecidas extraordinarias con caudales máximos superiores a los registrados en las estaciones de aforo en la primera mitad del siglo XX (anteriores a la construcción de embalses). En este sentido, los datos existentes apuntan (incertidumbre alta) a que el incremento de la temperatura puede aumentar la irregularidad del régimen de crecidas y sequías y promover la generación de crecidas relámpago en las cuencas mediterráneas y del interior de la Península Ibérica.

Las zonas vulnerables a las inundaciones se localizan en las proximidades de los núcleos urbanos y centros turísticos (especialmente en el mediterráneo). Estas zonas vulnerables han aumentado considerablemente como consecuencia del aumento de la exposición como consecuencia de la expansión de las zonas urbanas, obras lineales y actividades humanas que se realizan cercanas a los cauces. Los sectores socio-económicos que pueden verse afectados por un aumento en el riesgo de inundaciones son el turismo, la industria, el transporte y distribución, y en menor medida el sector seguros.

Las principales opciones adaptativas se basan en la mejora de los estudios de prevención que mejoren la ordenación territorial, así como en los sistemas de predicción actualmente operativos en algunas cuencas.

Entre las principales necesidades de investigación destaca la reconstrucción de series de crecidas del pasado, análisis de las series de aforo instrumentales y en su caso la restitución a condiciones naturales, y el desarrollo de modelos regionales acoplados clima-hidrología que permitan obtener escenarios fiables para los extremos hidrológicos teniendo en cuenta las particularidades de las cuencas atlánticas y mediterráneas.

12.A.1. INTRODUCCIÓN

Las características climáticas, orográficas y geológicas de la Península Ibérica determinan que los episodios de crecidas y los prolongados periodos de sequía sean fenómenos hidrológicos de carácter normal, con los que la sociedad tiene que convivir. Las inundaciones constituyen el riesgo natural de mayor impacto económico y social que se puede generar en un corto espacio de tiempo (horas o días), aunque si atendemos a pérdidas económicas, los daños meteorológicos a la agricultura o las pérdidas de generación hidráulica por sequía pueden presentar un mayor coste económico (Pujadas 2002). Desde la inundación de Valencia de 1957, se ha producido una media de una avenida grave cada cinco años (CTEI 1983). Los 10 eventos más importantes en cuanto a indemnizaciones pagadas por el Consorcio de Compensación de Seguros se han producido recientemente, seis en la década de los 80 y cuatro en la década de los 90 (ver Capítulo 14).

El impacto del cambio climático debido al efecto invernadero sobre las inundaciones constituye una de las principales incertidumbres de todos los informes realizados hasta el momento por los organismos internacionales. En el último informe realizado por el IPCC (IPCC 2001) se indica que el incremento en las concentraciones de gases de invernadero y aerosoles en la atmósfera producirá un aumento de la variabilidad climática y de los eventos extremos en numerosas partes del mundo. En Europa, la frecuencia y severidad de las crecidas podría incrementarse, especialmente en las grandes cuencas del centro y oeste de Europa debido a la concentración de la precipitación en los meses de invierno y primavera (IPCC 1996). Igualmente, el incremento de las temperaturas al final de la primavera y durante el verano puede conducir al incremento de las precipitaciones torrenciales de carácter convectivo en pequeñas cuencas y, por tanto, al aumento de los riesgos debidos a crecidas relámpago, especialmente en zonas de montaña y en las regiones mediterráneas.

En el informe Acacia (Parry 2000) se señala que el principal riesgo en los países del sur de Europa se deriva de las crecidas relámpago debidas a lluvias torrenciales. En este informe, se indica que para el 2020, los veranos anómalamente calurosos, como el producido en el 2003, ocurrirán con una frecuencia entre cuatro y cinco veces mayor que en la actualidad. A pesar de todas estas conjeturas, la realidad es que ninguno de los modelos de circulación atmosférica global o regional es capaz de generar escenarios fiables sobre los cambios esperables en relación con los eventos extremos, y estas suposiciones parten de la base de que el cambio climático alterará todo el volumen de precipitación mensual en la misma proporción, sin tener en cuenta la concentración de lluvia en periodos temporales cortos (escala horaria o diaria).

12.A.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

12.A.2.1. Sensibilidad al clima actual de las crecidas fluviales

La magnitud y frecuencia de las avenidas varían entre diversas cuencas de drenaje dependiendo de su variabilidad morfométrica, la escala de la red y, principalmente del tipo de patrones atmosféricos que generan las inundaciones (Benito *et al*. 1996, 1997, Fig. 12.A.1). Durante el invierno, los flujos del oeste y noroeste son dominantes, fuertemente relacionados con una elevada frecuencia de la circulación zonal en altitud. Esta situación condiciona en mayor medida las áreas que son afectadas por las masas de aire atlánticas, principalmente las cuencas del Duero, Tajo, Galicia y Cantabria. Estas últimas resultan, no obstante, más influenciadas por lluvias intensas originadas por la advección del norte, la cual afecta igualmente a las cabeceras del Ebro y Duero. Las cuencas del Guadiana y Guadalquivir, aunque también son afectadas por estas perturbaciones, registran los episodios más importantes cuando la circulación adquiere una alta componente meridional, normalmente asociada a la presencia de una baja en el Golfo de Cádiz, que aporta flujos muy húmedos del suroeste.

En primavera, así como al final del invierno, con la expansión de la corriente en chorro y el dominio de los patrones de circulación ondulada, existe un cambio en el tipo de flujo principal motivado por el incremento de los flujos del sur y suroeste, los cuales presentan una mayor frecuencia al final de la primavera. Esta clase de circulación resulta responsable de volúmenes de precipitación importantes en el este y sureste de España, principalmente en las cuencas del Mediterráneo del Júcar, Segura, Ebro y Pirineo Oriental y en los ríos del sur. En las cuencas mediterráneas, el avance de masas de aire de procedencia atlántica, relativamente más frías que el mar, puede aumentar la inestabilidad y facilitar la formación de sistemas convectivos. En esta época del año es cuando se registran el mayor número de gotas frías en España (Llasat y Puigcerver 1990), y se sitúan sobre todo en la parte occidental (Llasat 1991), pudiendo asociarse en algunos casos a precipitaciones moderadas. Algunos ríos de España también registran un segundo pico de caudal durante la primavera, debido al deshielo súbito que afecta, fundamentalmente, a su cabecera en zonas de montaña (Fig. 12.A.1).

El verano se caracteriza por la carencia de precipitaciones en una gran parte del país, especialmente al sur de la Cordillera Cantábrica. Sin embargo, en el norte de España (Galicia, Cantabria y País Vasco), pueden producirse excepcionalmente inundaciones, asociadas a flujos del norte, con presencia o no de gota fría. En esta época son importantes las lluvias muy intensas de corta duración, que afectan principalmente a los Pirineos y a la costa catalana, dando lugar frecuentemente a inundaciones súbitas en rieras y torrentes. Por su corta duración y pequeña extensión, el aporte total de estas precipitaciones a las cuencas es pequeño.

Finalmente, durante el otoño existe un incremento de la circulación del oeste y del noroeste, así como del tipo del suroeste. Las situaciones del sureste en bajos niveles y suroeste en altura (asociadas a la presencia de un surco en altura o de una gota fría), con advección de aire muy cálido y húmedo en bajos niveles, son muy favorables al desarrollo de sistemas convectivos organizados que generan crecidas fluviales (Jansà *et al*. 1996). Estos sistemas pueden afectar principalmente a la costa del Mediterráneo, conduciendo a eventos que generan inundaciones en los ríos del Pirineo Oriental, Júcar, Segura y también de la cuenca del Ebro y de los ríos del sur. En el caso de los ríos del Mediterráneo que drenan la Cordillera Ibérica (Júcar, Segura y Turia), los mayores caudales punta se registran durante este periodo. De hecho, los caudales medios de estos ríos pueden verse multiplicados hasta 11.000 veces durante las mayores avenidas (Masach 1950, Llasat *et al*. 2003).

El análisis de las series de caudales máximos anuales registradas en estaciones de aforo apunta a una disminución en los picos de las crecidas ordinarias en los últimos 40 años (Fig. 12.A.2). En parte, esta disminución de los caudales de crecida se debe a la construcción de presas, la mayor parte entre la década de los 50's y 60's, que actualmente supera el millar (1133 incluyendo diques laterales), con una capacidad de embalse superior a 56.000 hm^3. Sin embargo, este efecto laminador de los embalses se muestra insuficiente en el caso de las crecidas extraordinarias, como las registradas en cuencas mediterráneas, en 1982 y 1987, o en las cuencas atlánticas en el año 1979. Como se puede observar en la figura 12.A.2, estas crecidas presentaron los mayores caudales punta del registro sistemático de aforos (últimos 50 años). De cualquier manera, resulta evidente que se incorpora un elemento de variabilidad en los caudales máximos debido al efecto de las infraestructuras hidráulicas que dificulta el análisis hidroclimático de las series instrumentales. En algunos casos, se han restituido las series de caudales máximos a régimen natural, para eliminar el ruido introducido por los embalses, aunque los trabajos de este tipo en España resultan escasos. Por tanto, debemos tener cierta precaución a la hora de interpretar la tendencia de los caudales de crecida registrados en los últimos 30 años en ríos regulados en relación con los efectos del cambio climático.

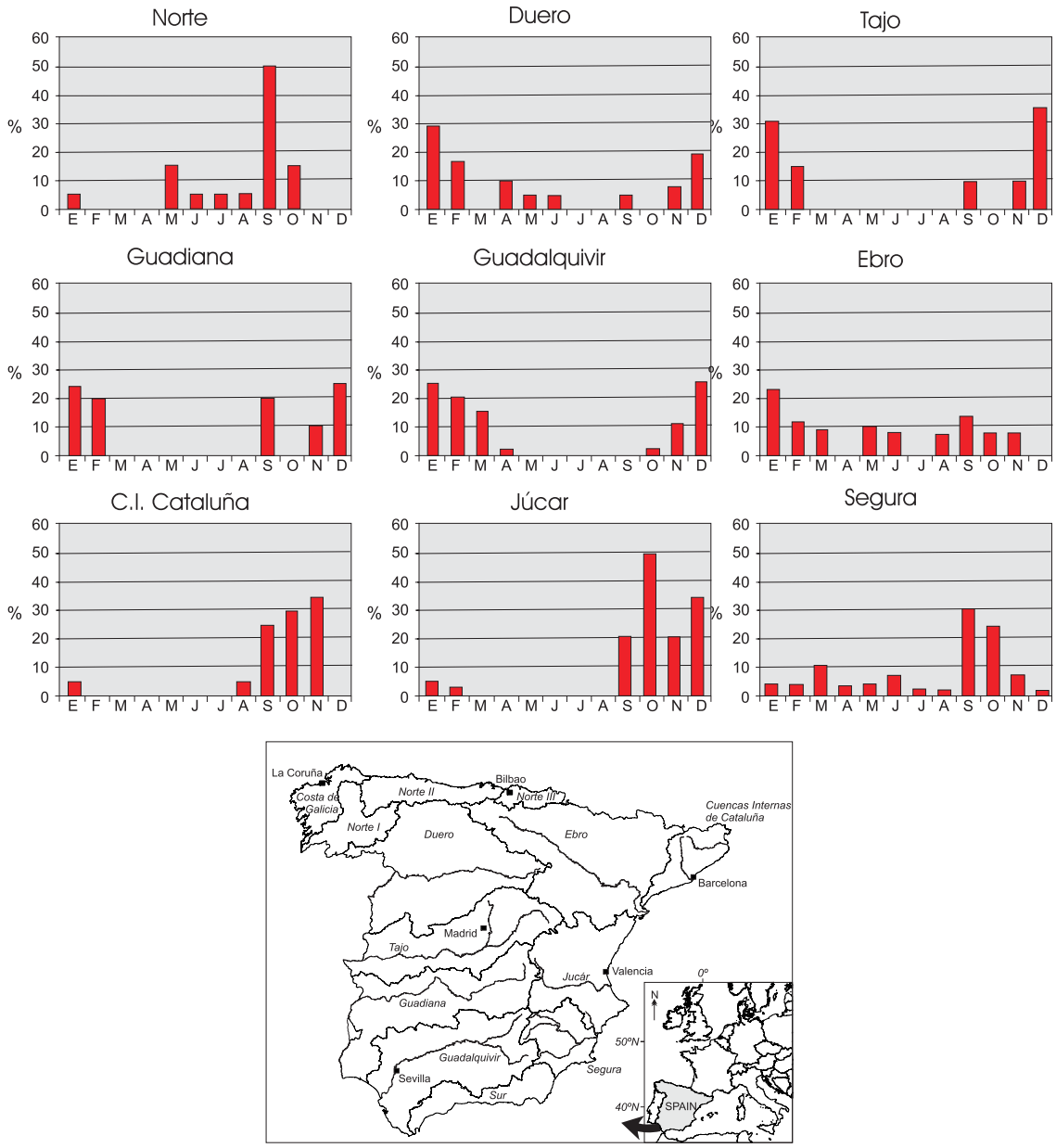


Fig. 12.A.1. *Distribución mensual de las crecidas históricas (según Benito et al. 1996) en diferentes cuencas hidrográficas (figura inferior).*

En las cuencas atlánticas, la generación de crecidas, duración y magnitud se encuentran estrechamente ligadas a los cambios en la precipitación invernal. En estas cuencas, aunque las relaciones caudal medio, precipitación y caudal máximo no son unívocas, se puede señalar que aquellos años con exceso de precipitación (Fig. 12.A.3) que produce mayores módulos fluviales corresponden a años con importantes caudales punta. Las precipitaciones más copiosas en las cuencas Atlánticas se producen cuando la circulación zonal y la entrada de perturbaciones se sitúan en baja latitud (35-45º N), generando precipitaciones importantes y persistentes en las cuencas del Duero, Tajo, Guadiana y Guadalquivir, o bien cuando se produce una circulación meridional con advección muy húmeda sobre las cuencas del Guadiana y del Guadalquivir. En las cuencas mediterráneas, las relaciones entre la precipitación areal y las crecidas no

responde a ningún patrón concreto, y por tanto las relaciones clima-crecidas resultan difíciles de discernir.

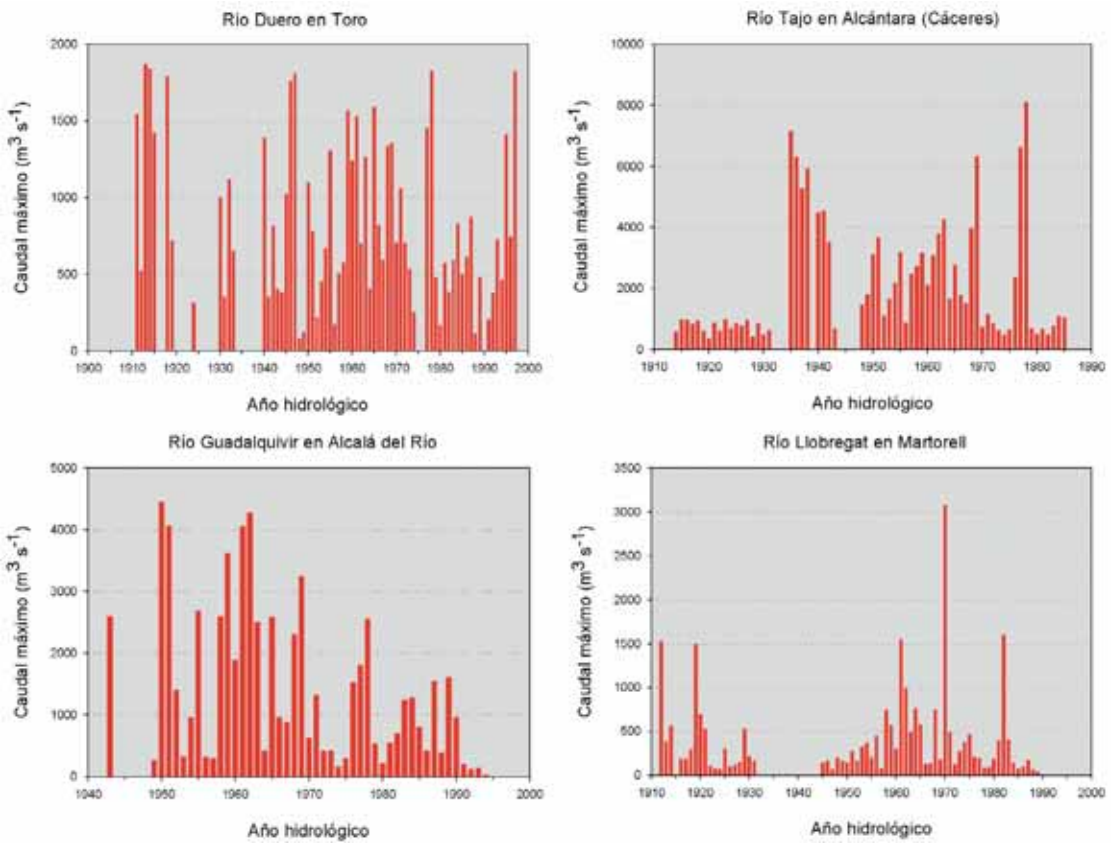


Fig. 12.A.2. *Serie anual de caudales de crecida del los ríos Duero (Toro), Tajo (Alcántara), Guadalquivir (Alcalá del río) y Llobregat (Martorell).*

12.A.2.2. Efectos de la variabilidad climática en los riesgos hidrológicos a través de series del pasado

Al igual que se conoce que en el pasado ha existido una variabilidad en el clima, con periodos más cálidos (p.e. Periodo Cálido Medieval, probablemente entre AD 900-1200, según Flohn 1993) y periodos fríos (Pequeña Edad del Hielo; probablemente entre AD 1550 y 1850 según Flohn 1993), las crecidas y las sequías se han sucedido de forma variable y en respuesta a estos cambios del clima. Los registros geológicos y documentales nos permiten reconstruir la frecuencia e incluso la magnitud en la que se han sucedido estos eventos extremos. Los registros geológicos se basan en estudios de los sedimentos depositados por los ríos durante las crecidas (Benito *et al*. 2003a) y permiten retroceder en el tiempo a escalas de hasta 10.000 años (Holoceno). Por su parte los registros documentales proceden de archivos de administraciones públicas y eclesiásticas de ámbito estatal, provincial o local, y permiten completar las series de forma continua desde el siglo XVI, de forma discontinua desde el siglo XIV y de forma puntual desde época clásica a partir de autores grecorromanos (Benito *et al*. 2004, Barriendos y Coeur 2004). En todos los casos se observa que las crecidas no se distribuyen de forma homogénea en el tiempo, sino que existen periodos con una concentración anómala de eventos extremos y que responden a situaciones climáticas cambiantes.

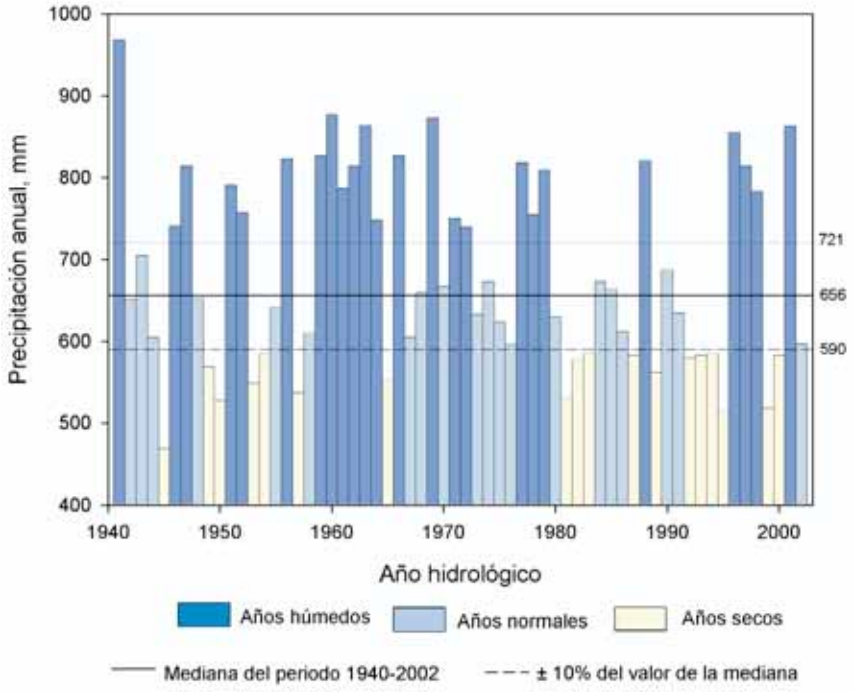


Fig. 12.A.3. *Variación temporal de la precipitación anual (mm) en España Peninsular, y clasificación de los años en función de su desviación de la mediana (656 mm) para el periodo 1940-41/2002/2003 (año hidrológico de octubre a septiembre).*

En general, se considera que en los últimos 3000 años la circulación general de la atmósfera presenta características similares a las actuales, y es por tanto en este periodo donde el análisis de las relaciones clima-inundaciones presenta un mayor interés. Durante este periodo la respuesta hidrológica resulta afectada tanto por la variabilidad climática como por la actividad humana con la implantación de las sociedades agrícolas que generan importantes procesos de deforestación, especialmente en los últimos 1700-2000 años. Sin embargo, resulta evidente que la generación de crecidas en cuencas medias y grandes, responde a un exceso de precipitación en las cuencas, con un papel moderado o menor de la actividad humana en la capacidad de infiltración de los suelos, al menos durante episodios de precipitación intensa.

Los registros de paleocrecidas muestran una concentración anómala de eventos extremos en diversas cuencas del entorno mediterráneo entre el 2860 y 2690 años B.P. (B.P. significa "antes del presente"), es decir entre 850-550 BC (antes de Cristo) (Thorndycraft *et al*. 2004, Fig. 12.A.4). Este periodo precede, o se sitúa temporalmente próximo, a una pulsación de carácter frío y húmedo ocurrida hace 2650 años (van Geel *et al*. 1999) y que se asocia a causas relacionadas con las variaciones de la emisión de radiación solar. En el río Llobregat, la magnitud de las crecidas generadas en este periodo prácticamente duplica a las registradas en el siglo XX y sólo tienen parangón con algunas registradas en el siglo XVII (Thorndycraft *et al*. 2004, Fig. 12.A.4).

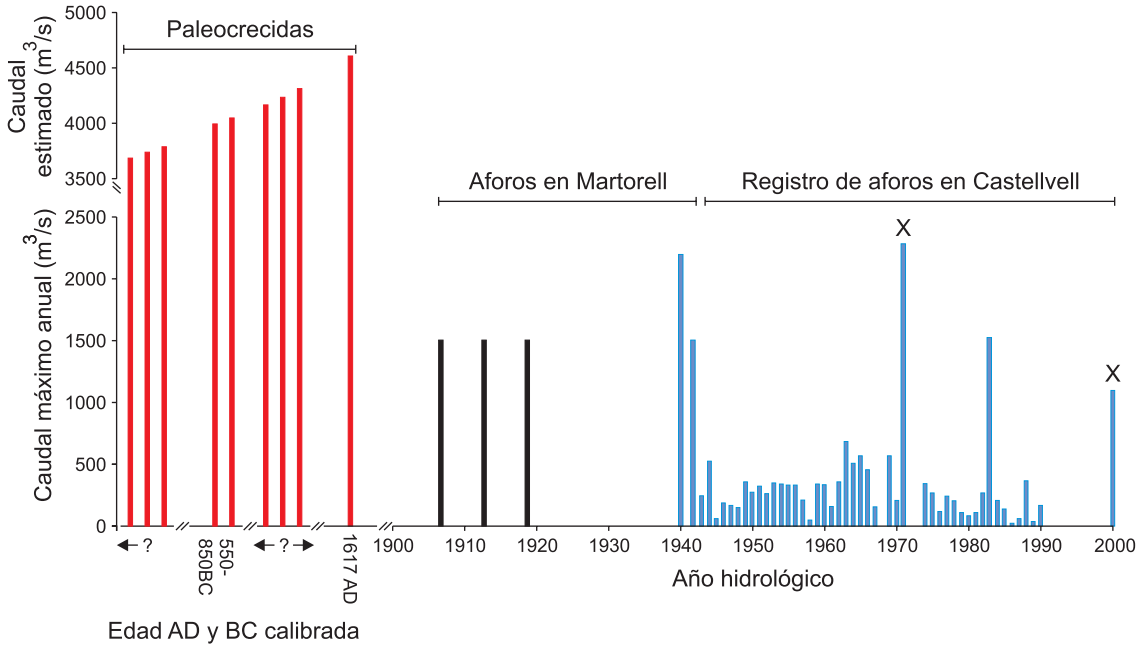


Fig. 12.A.4. *Caudales estimados de crecidas máximas producidas en los últimos 3000 años en el tramo medio-inferior de río Llobregat mediante registros geológicos (rojo), junto con los registrados en las estaciones de aforo de Martorell (negro) y Castellvell (azul) (modificado de Thorndycraft et al. 2004).*

En los últimos 2000 años, los registros sedimentarios de paleocrecidas presentan una concentración anómala de eventos en los periodos AD (después de Cristo) 1000-1200, AD 1430-1685 y AD 1730-1810. La resolución de la técnica de carbono-14 para los últimos 300 años es escasa por lo que este último periodo puede presentar errores de datación. Estos periodos coinciden con los obtenidos a partir del registro documental, donde se observa un incremento en la frecuencia de crecidas de elevada magnitud en las cuencas atlánticas de la Península Ibérica durante los periodos 1150-1290 1590-1610 1730-1760 1780-1810 1870-1900 1930-1950 y 1960-1980 (Benito *et al*. 1996, 2003b, Fig. 12.A.5). Las condiciones climáticas que prevalecen en estos periodos de elevada frecuencia de crecidas resultan difíciles de estimar. En climatología histórica se ha utilizado la denominación de Periodo Cálido Medieval y Pequeña Edad del Hielo para definir dos episodios climáticos pluriseculares de calentamiento y enfriamiento respectivamente, experimentados a escala global en los últimos 1000 años. Sin embargo, diversos estudios recientes demuestran que se trata de periodos cuyo inicio y duración varían regionalmente.

La Pequeña Edad del Hielo, también conocida como miniglaciación, ha podido ser estudiada a partir de fuentes documentales históricas poniendo en evidencia manifestaciones de fuerte variabilidad climática, cuya expresión más característica son los periodos de incremento en la frecuencia de las lluvias torrenciales con su reflejo en las inundaciones catastróficas, pero también incrementos en la frecuencia de aparición de sequías prolongadas de carácter climático. Estos comportamientos anómalos suelen prolongarse durante 30 o 40 años (Fig. 12.A.6), destacando entre ellos por el incremento y severidad de las inundaciones el de 1580-1620 y 1840-1870 (Barriendos y Martín Vide 1998). En relación a las sequías, resulta más difícil separar periodos debido su compleja distribución espacial, pero han sido ciertamente más frecuentes en las décadas centrales del siglo XVI (1540-1570) y del siglo XVII (1625-1640), con menos severidad en 1750-1760 y finalmente entre 1810-1830 y 1880-1910 (Barriendos 2002). Por último, cabe mencionar la posibilidad de encontrar periodos en los que se producen incrementos en la frecuencia de inundaciones y sequías simultáneamente. Sólo se conoce uno, entre 1760 y 1800, pero sus efectos se extendieron por buena parte de Europa Occidental y

Central, ocasionando evidentes transtornos en la producción agraria y incluso crisis sociales en diferentes países (Barriendos y Llasat 2003).

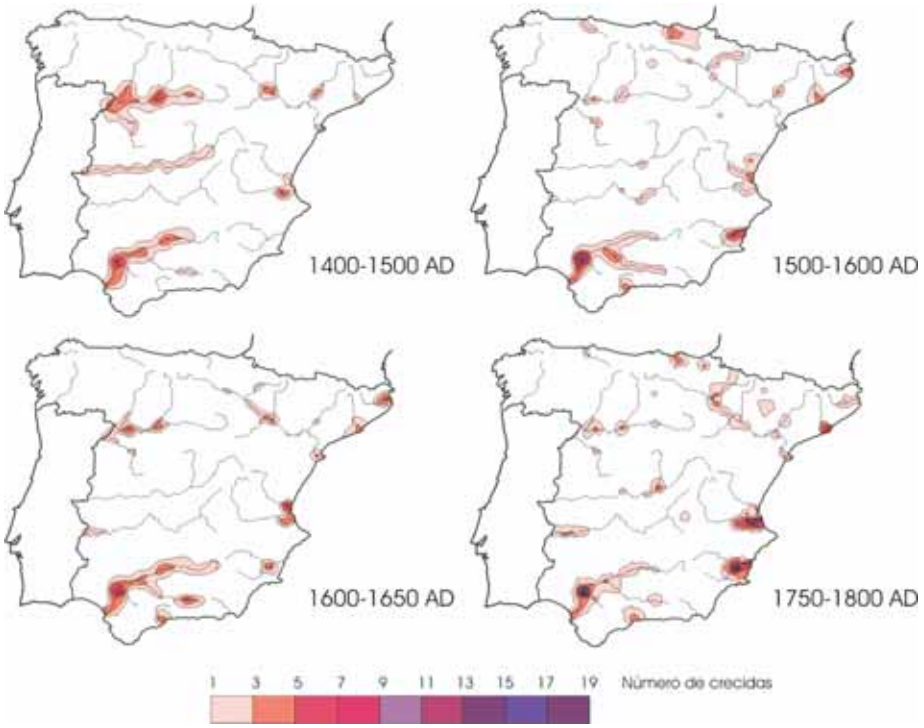


Fig. 12.A.5. *Distribución de las crecidas históricas en España en diferentes periodos (según Benito et al. 1996).*

Un aspecto digno de mención dentro de la miniglaciación es la identificación de episodios meteorológicos extremos cuya baja frecuencia ha impedido que se pudieran registrar durante el periodo instrumental moderno (Fig. 12.A.7). Ello implica la certeza de que en escenarios climáticos futuros pueden volver a repetirse, generando impactos probablemente no previstos. Sería el caso del evento de lluvias continuadas y torrenciales de enero-febrero de 1626 1708 1739 1856 1860 1876 1881 1895 y 1897 en las cuencas atlánticas (Guadalquivir, Guadiana, Tajo, Duero; Benito *et al*. 1996, 2003b) o el evento de noviembre de 1617 en la vertiente mediterránea, en todos los casos con inundaciones de efectos catastróficos en numerosos sistemas fluviales (Barriendos 1995, Fig. 12.A.6). También se detectan episodios excepcionales de otros fenómenos de más difícil apreciación en su duración y su magnitud, como la ola de frío de ámbito continental de diciembre de 1788-enero de 1789 (Barriendos *et al*. 2000) o la sequía de 1812-1824 en el litoral catalán (Barriendos y Dannecker 1999).

12.A.3. PRINCIPALES IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los impactos del cambio climático sobre los extremos hidrológicos pueden afectar al número de episodios de caudal extraordinario que se producen en un año, a su frecuencia interanual, a la duración y volumen de los hidrogramas y a los caudales punta. Las condiciones atmosféricas generales que generan crecidas son complejas, y resulta difícil establecer una relación directa y unívoca entre clima e inundaciones.

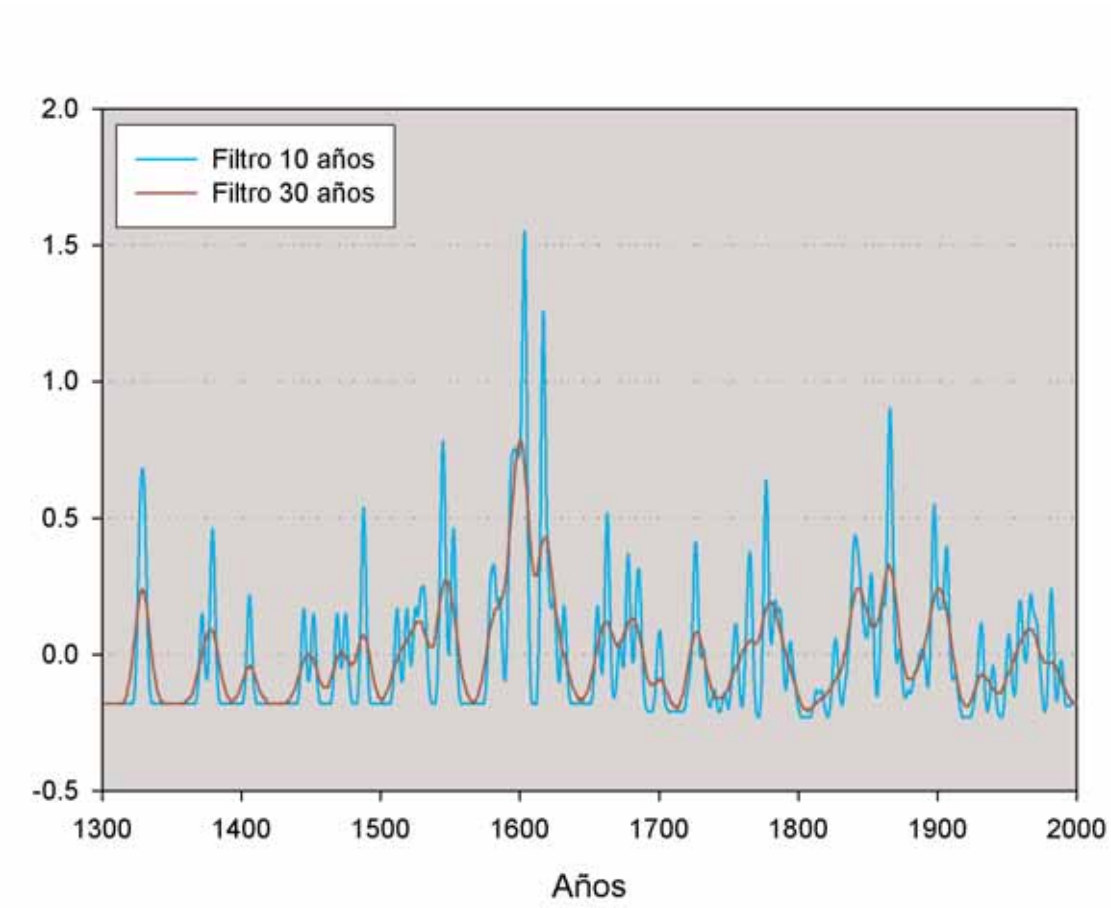


Fig. 12.A.6. *Evolución temporal de la frecuencia de las crecidas extraordinarias y catastróficas para el conjunto de los ríos de Cataluña. Los valores representados se han obtenido de aplicar un filtro de suavizado gaussiano de 10 y 30 años a la media normalizada (Datos de M. Barriendos).*

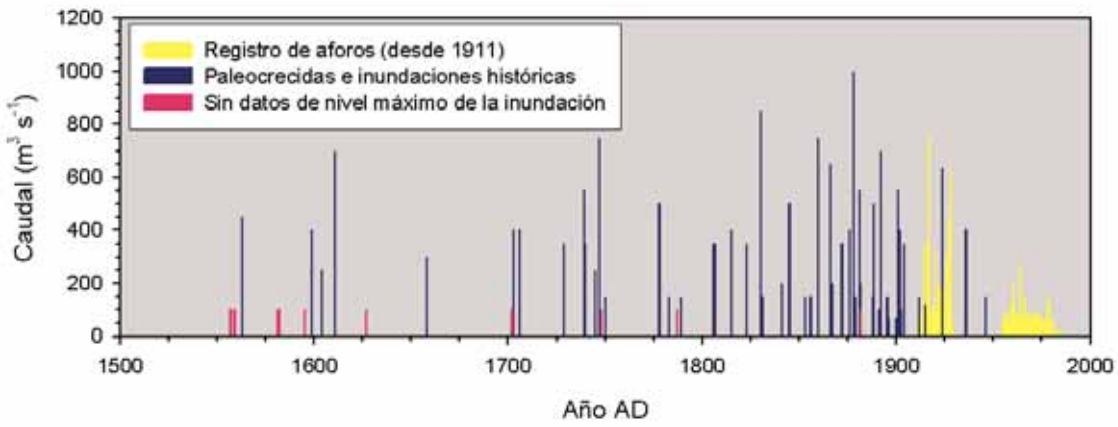


Fig. 12.A.7. *Caudales punta estimados para las paleocrecidas y crecidas documentales del río Tajo en Aranjuez (según Benito et al. 2003), y datos registrados en la estación de aforos desde 1911.*

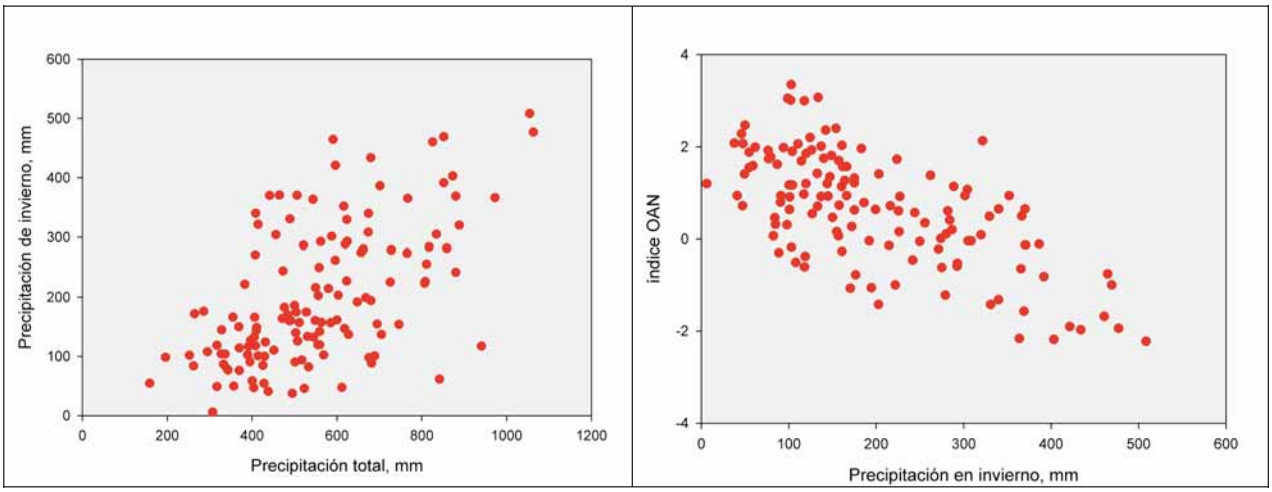


Fig. 12.A.8. *Relaciones de la precipitación de invierno (diciembre, enero y febrero) con la precipitación total anual (izquierda), y con el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (derecha) en la estación pluviométrica de Sevilla.*

Se han establecido diferentes índices que definen la posición de la circulación zonal en Europa, entre los que destaca el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (OAN; en inglés NAO: North Atlantic Oscillation index). Este NAO se define como la diferencia normalizada de presión a nivel del mar entre dos centros de presión regional: (1) centro de baja presión en Islandia y (2) centro de alta presión de las Azores (Walker y Bliss 1932, van Loon y Rogers 1978). Se han observado vínculos entre estas diferencias de presión y la distribución de las precipitaciones invernales y los caudales en las cuencas atlánticas de la Península Ibérica (Trigo *et al*. 2003), muy especialmente con el río Guadalquivir (Fig. 12.A.8). Los periodos con NAO en fase negativa se asocian con condiciones húmedas en el oeste del Mediterráneo y norte de África (Wanner *et al*. 1995), y aire frio en la Europa del norte. El estudio de la correlación invernal entre el índice NAO y la precipitación areal en las grandes cuencas hidrográficas para el periodo octubre 1897-septiembre 1998, muestra que las regiones mejor correlacionadas son las cuencas Centro Norte (Duero-Tajo) y Centro Sur (Guadiana-Guadalquivir), tal como indica la Tabla 1. En estudios recientes se ha apuntado que el NAO disminuye durante los máximos seculares de la actividad solar y aumenta durante los periodos de descenso en la actividad solar (Kirov y Georgieva 2002).

Tabla 12.A.1. *Coeficientes de correlación de Pearson entre el NAO (de diciembre a marzo) y las series de precipitación areal invernales de diferentes regiones pluviométricas (según Barrera 2004).*

Región	NAO(DEFM)
Noroeste	-0,43
Norte	-0,51
Noreste	-0,59
Centro-Norte	-0,62
Centro-Sur	-0,72
Levante	-0,45
Canarias	-0,42

Dada la complejidad en la modelización de extremos hidrológicos por parte de los Modelos de Circulación General de la atmósfera, se puede abordar la respuesta de las crecidas y sequías

en los escenarios de cambio global a través del establecimiento de relaciones entre NAOI, actividad solar y magnitud y frecuencia de crecidas. En la figura 12.A.9 se muestra la variación temporal del NAO reconstruido por Luterbacher *et al*. (2002) y su relación con las crecidas con caudales superiores a 3500 $m^3 s^{-1}$ para la serie histórica del Guadalquivir en Sevilla. En general se observa una buena relación entre los periodos con mayor número de crecidas extremas y los periodos con NAO negativo, tal y como cabría esperarse dada la relación de años húmedos y años de crecidas importantes en la cuenca del Guadalquivir. Por otro lado, valores de NAO negativos no siempre están relacionados con la existencia de crecidas extraordinarias. Este tipo de relaciones NAO-crecidas extremas se cumple igualmente en determinados periodos de la serie histórica de la cuenca del río Tajo (Benito *et al*. 2003b, 2004) y del río Guadiana (Ortega y Garzón 2004), e incluso se pueden establecer diversas relaciones de algunos periodos de crecidas con momentos de actividad solar máxima (Vaquero 2004).

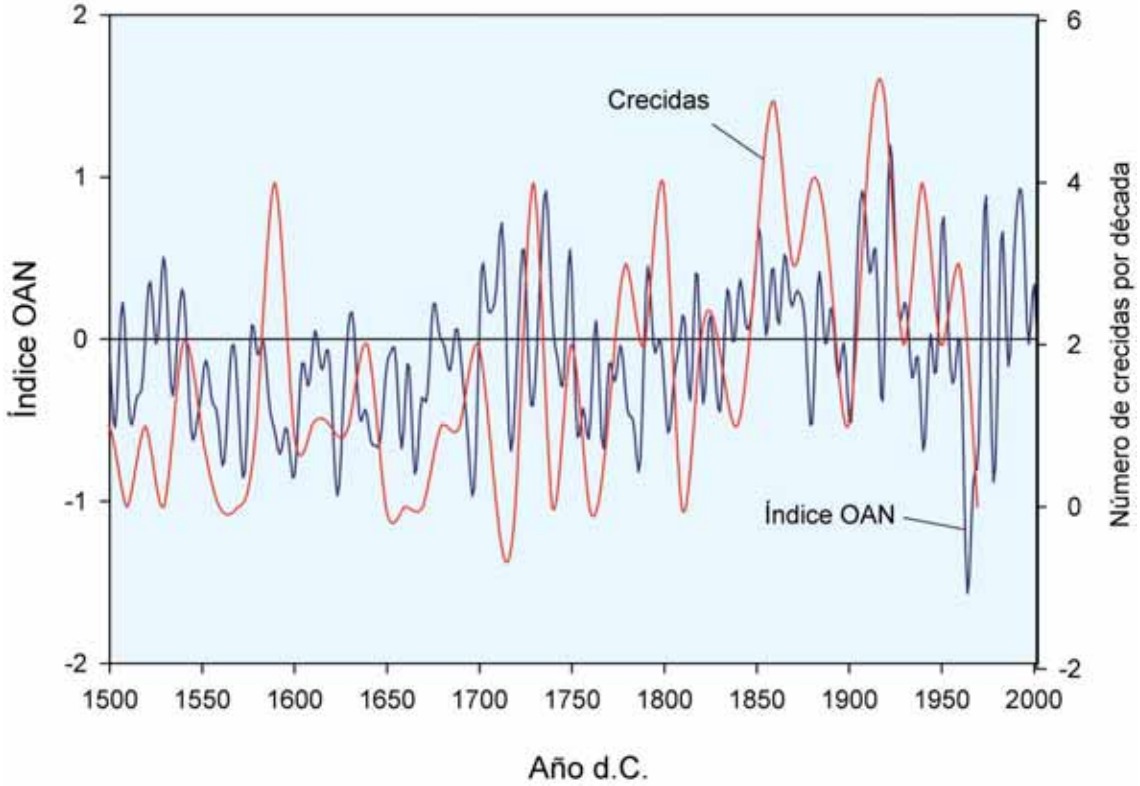


Fig. 12.A.9. *Relación del número de crecidas con caudales superiores a 3500 $m^3 s^{-1}$ y la variación de la media del NAO de los meses de invierno (dic-en-feb) desde el año 1500, con suavizado para intervalos de 3 años. Los valores del NAO se han tomado de Luterbacher et al. (2002).*

En la actualidad, se están generando escenarios y predicciones de las variaciones futuras de estos índices mediante modelos de simulación climática, de cuyas proyecciones se pueden establecer los patrones de comportamiento futuro de las crecidas de los ríos Atlánticos. La proyección de este índice en relación con el cambio climático debido al efecto invernadero no está clara y no existe consenso si la tendencia en fase NAO positiva de las décadas de los 1980s y 1990s, comparable a la que existió en el periodo 1900-1930, se mantendrá o se intensificará durante la primera mitad del siglo XXI. En este sentido, se puede apuntar que aproximadamente la mitad de los modelos predicen una intensificación positiva del índice asociada al cambio global, mientras que la otra mitad predicen que NAO se mantendrá en

niveles comparables a los presentados en las últimas décadas. En ambos casos, tanto si NAO aumenta o se mantiene en los niveles de las décadas pasadas, cabría esperar una tendencia clara a la disminución de crecidas extraordinarias en las cuencas atlánticas de la Península Ibérica en relación con los patrones de frecuencia existentes en la segunda mitad del último siglo. Esta proyección estaría de acuerdo con los GCM que predicen una reducción de un 10% en la precipitación. Sin embargo, un aumento en la variabilidad hidrológica puede favorecer la generación de crecidas con caudales punta ocasionalmente excepcionales (Tabla 12.A.2). En el caso de los ríos Duero y Ebro, los caudales punta pueden verse afectados por fenómenos de deshielo rápido como consecuencia de subidas bruscas en la temperatura durante los meses de invierno e inicios de primavera (Tabla 12.A.2). En el otro lado de la balanza, si atendemos a lo ocurrido en los últimos 400 años (Fig. 12.A.9), se observa una elevada variabilidad de este NAO, incluso en periodos de calentamiento del planeta (p.e. décadas posteriores a la miniglaciación), que se traduce en un incremento de la variabilidad hidrológica en un escenario de cambio climático.

En relación con las cuencas mediterráneas, los mecanismos que se establecen entre clima y crecidas son mucho más complejos y, hasta el momento, no se han establecido índices válidos ni se han desarrollado modelos que permitan realizar predicciones dentro de un escenario de cambio climático. En principio, resulta probable que el incremento de la temperatura durante los meses de verano puede favorecer la generación de tormentas (Tabla 12.1.2). Estas tormentas tendrían un carácter netamente local, y podrían desencadenar crecidas relámpago en cuencas de tamaño pequeño. En estos casos, las diferencias de temperatura entre el Mediterráneo y el continente favorecen la creación núcleos convectivos de precipitación especialmente en otoño.

En cuanto a la afección de los ríos mediterráneos de primer orden, las series de paleocrecidas y crecidas históricas indican que las avenidas extremas se han producido durante periodos de elevada irregularidad de la precipitación tanto estacional como anual (sequías seguidas de eventos de inundación; p.e. 2700 años B.P., inicio de la miniglaciación). En periodos recientes, se ha observado un incremento en la generación de fenómenos de lluvias intensas, como fue el caso de la década de los ochenta en el Mediterráneo que se interpretó como una respuesta al cambio climático, aunque dicha tendencia se ha invertido en los años noventa, lo que revela la complejidad de la señal climática en la generación de extremos.

Tabla 12.A.2. *Análisis cualitativo de la respuesta de diferentes cuencas españolas a posibles impactos del Cambio Climático.*

Posible impacto del Cambio Climático	**Guadalquivir Guadiana Tajo**	*Duero*	*Norte*	*Ebro*	**Cuencas Internas de Cataluña**	*Levante/Sur*
Cambio en la circulación zonal (NAO positiva)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)				
Aumento de fenómenos de gota fría			+Irregularidad de extremos		+Irregularidad de extremos	+Irregularidad de extremos crecida/sequías
Generación de núcleos convectivos	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago
Cambios bruscos en la temperatura		+Crecidas por deshielo		+Crecidas por deshielo	+Crecidas por deshielo	

12.A.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Las regiones más vulnerables a los riesgos hidrológicos son aquellas donde, además del posible aumento en los eventos extremos como consecuencia del cambio climático, existe una mayor sensibilidad o exposición de bienes. En este sentido, la vulnerabilidad a los fenómenos de crecida en España no debe leerse exclusivamente en términos de los posibles efectos del cambio climático, sino que existe una componente importante motivada por el desarrollo urbanístico incontrolado de las últimas décadas. A priori, el prototipo de zona altamente sensible a los extremos hidrológicos se presenta en zonas muy pobladas con desarrollos urbanísticos recientes y con sectores socio-económicos sensibles como turismo, industria, etc. Las previsiones de los modelos climáticos apuntan a una intensificación de los periodos secos en verano, y precipitación total en invierno similar a la actual, aunque concentrada en un menor número de meses. En las últimas décadas, se ha puesto de manifiesto que los eventos con mayor impacto socio-económico se han relacionado con crecidas relámpago que han afectado a cuencas de tamaño medio o pequeño. Como indicativo, se pueden considerar como zonas de mayor probabilidad de desencadenarse precipitaciones se localizan en la franja mediterránea, zonas del interior del valle del Ebro y zonas dispersas del interior peninsular asociadas a cuencas de pequeño tamaño. Las zonas vulnerables serán aquéllas donde la población se encuentre expuesta al desastre. Por tanto, las regiones con mayor riesgo resultarán de cruzar las áreas susceptibles de producir una precipitación anómala con las zonas de mayor exposición de bienes (y más vulnerables) (Fig. 12.A.10). En algunos casos, en zonas de moderada o baja amenaza a generar eventos extremos pueden presentar una elevada vulnerabilidad debido a su alta exposición y a existencia de una menor conciencia social del problema. Igualmente, las zonas torrenciales donde los eventos extremos son frecuentes pueden presentar una menor vulnerabilidad en el caso de que hayan tomado las medidas oportunas para reducir el riesgo. En líneas generales se puede apuntar que, aunque el número de fenómenos hidrológicos extremos hayan disminuido en número y magnitud en las últimas décadas respecto a los producidos a principios y mediados del siglo pasado, los daños globales computados han sido sustancialmente mayores (ver Capítulo 14) debidos al aumento de la vulnerabilidad y exposición de las actividades humanas próximas a los cauces como consecuencia de la expansión de zonas urbanas.

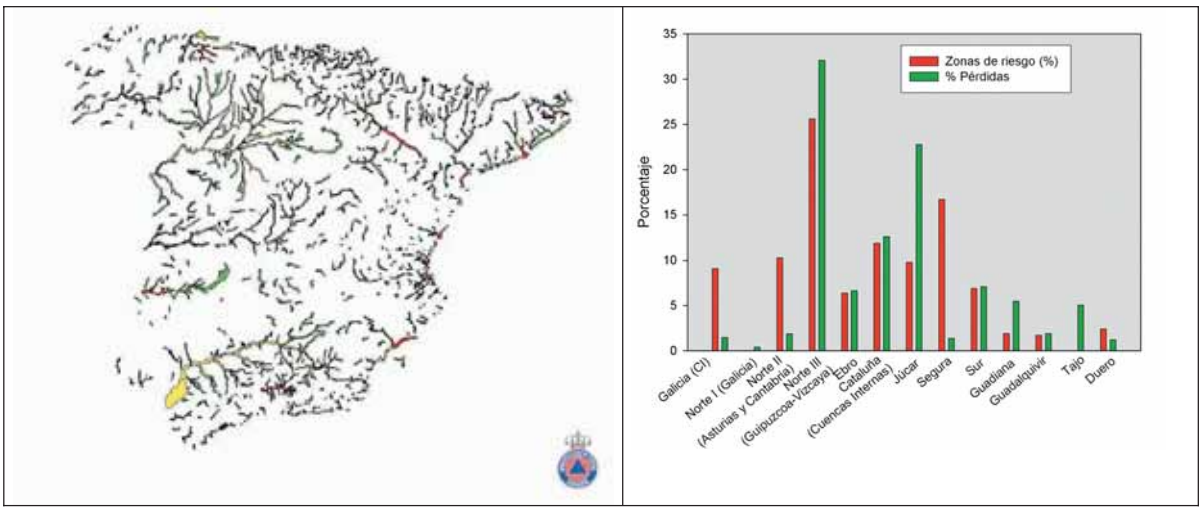


Fig. 12.A.10. *A: Mapa de puntos conflictivos por inundaciones en España (fuente Protección Civil). Leyenda: Rojo: Máximo riesgo; Verde: Riesgo moderado; Amarillo: Riesgo bajo. B: Porcentaje de zonas de riesgo y pérdidas económicas en diferentes cuencas (Pujadas 2002). Se observa en algunas cuencas los elevados porcentajes de pérdidas en relación con la proporción de las zonas de riesgo, lo que refleja su elevada vulnerabilidad a las crecidas.*

12.A.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

La variabilidad climática, hidrológica, fisiográfica y socio-económica de España conlleva a que las opciones adaptativas no pueden ser generalizables al conjunto de las regiones. En cualquier caso, la mejor opción adaptativa se deriva del avance en los sistemas y metodologías de prevención, predicción (sistemas de alerta en el caso de cuencas medianas y grandes), así como de la ordenación y gestión de las situaciones de riesgos. Estas buenas prácticas se pueden conseguir en tres niveles:

A *nivel técnico* se requiere la mejora de los sistemas de protección de bienes expuestos mediante medidas estructurales y no estructurales. En general, las medidas estructurales se aplican para proteger de los efectos de las crecidas a zonas con actividades humanas de cierta entidad como desarrollos urbanísticos. Como medida previa se deberían de favorecer las medidas no estructurales y de prevención apoyada en una normativa que regulara la construcción en las zonas susceptibles de inundación, sin que, a la vez, se desarrollen las medias de protección suficiente. Conviene reseñar que las actuaciones estructurales en los cauces (embalses, diques y canalizaciones) nunca pueden garantizar una protección absoluta.

A *nivel político y gestor* se debería incrementar el control legislativo en la mejora de la planificación de riesgos dentro de los planes urbanísticos e industriales. En este sentido, la legislación actual y normativas sectoriales sobre el medio hídrico así como la Ley del Suelo y Valoraciones resultan extraordinariamente ambiguas e inefectivas. Esta legislación debería contemplar la obligatoriedad de aplicación de las directrices de los Mapas de Riesgos en los diferentes ámbitos de planificación urbanística y en los Planes de Ordenación Territorial. En este sentido, se debe de preservar las características de la red de drenaje natural, especialmente su capacidad de desagüe, evitando actuaciones que puedan suponer un obstáculo al flujo y potenciando la recuperación ambiental de los espacios fluviales.

A *nivel educativo* se requiere implantar en la población una educación sobre el riesgo y los desastres naturales basada en la prevención y la reducción de la exposición. Por otro lado, se debería de incidir a nivel escolar en materia de riesgos y prevención incluyendo información de cómo actuar en caso de catástrofe. En este sentido, debemos aprender de las inundaciones pasadas, zonas previamente inundadas y sus consecuencias socio-económicas, ya que constituyen una fuente importante de información y conocimiento a tener en cuenta en el diseño de cualquier política o estrategia para hacer frente a las avenidas.

12.A.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

Sector Seguro. En España, los fundamentos del sistema de cobertura de catástrofes, y en particular de los daños por inundaciones, han estado basados en la aplicación de una prima indiferenciada para todos los riesgos cubiertos y para todo el territorio nacional, que gestiona el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS). En este sentido, un incremento en los daños por inundaciones no afectaría en gran medida al sector del seguro privado dado que todos los asegurados pagan una cantidad fija independientemente del grado de exposición al que se encuentren (Tabla 12.A.3). En el caso de los daños por sequías, las compañías privadas de seguros y reaseguros podrían verse afectadas económicamente debido fundamentalmente a los seguros agrícolas.

Sector Energético. Este sector sería principalmente afectado en situaciones de sequía prolongada, especialmente en el ámbito de la generación de electricidad (Tabla 12.A.3). Las crecidas, en caso de producirse, pueden afectar negativamente en el ámbito del transporte y distribución de la energía, mientras que pueden tener un impacto positivo en la generación de

energía hidroeléctrica, por cuanto las inundaciones pueden incrementar el recurso hídrico de forma estacional.

Sector Turístico. Las inundaciones y su repercusión mediática nacional e internacional afectan de forma negativa al sector turístico (Tabla 12.A.3). Por ejemplo, la ocupación turística en el valle de Tena con posterioridad a la crecida del barranco de Arás, donde fallecieron 87 personas, disminuyó en los años sucesivos a la catástrofe. Las condiciones de sequía tienen un efecto menor sobre el turismo, que en ocasiones puede estar favorecido por situaciones de calor prolongadas.

Sector de la Industria y Transporte. El sector del transporte y distribución resulta muy sensible al incremento de las crecidas, por cuanto éstas pueden suponer el corte temporal de vías de comunicación o de abastecimiento de mercancías (Tabla 12.A.3). Los periodos de sequía favorecen al sector transporte y distribución, pero pueden afectar negativamente a aquellas empresas que requieran cantidades importantes de agua en los procesos de producción.

Tabla 12.A.3. *Grado de repercusión positivo (+) y negativo (-) en diferentes sectores socioeconómicos. 0: Sin impacto; 1: bajo; 2: medio; 3: alto*

Sector afectado	**Crecidas**		**Sequías**	
	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución
Seguro	-1	+1	-3	+2
Energía (hidroeléctrico y biomasa)	+2	0	-3	+2
Turismo	-2	+3	-1	0
Industria	-3	0	-1	0
Transporte y distribución	-3	+2	+3	+2

12.A.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

En España, se están realizando avances en la caracterización de escenarios de extremos de precipitación y/o temperatura que pueden resultar válidos para aquellas cuencas cuyas crecidas se encuentran relacionadas con la frecuencia de la circulación zonal en los meses de invierno, como es el caso de las cuencas atlánticas. Sin embargo, en el caso de las cuencas mediterráneas el grado de incertidumbre es elevado debido a que resulta difícil modelar las complejas interacciones que se establecen en el entorno mediterráneo en relación con los eventos extremos.

Estos modelos requieren de series largas de fenómenos extremos para comprender la respuesta de las crecidas a nivel regional en relación con diferentes tipos de circulación atmosférica. En este sentido, los datos de paleocrecidas y documentales pueden aportar una casuística de los eventos hidrológicos extremos en España en relación con la variabilidad climática en los últimos milenios. Igualmente, el estudio de estas series de precipitación, en el periodo pre-industrial (anterior al siglo XX) permite separar la componente natural de la variabilidad climática de aquella otra componente inducida por el efecto invernadero desde el inicio de las emisiones masivas de CO_2 a la atmósfera.

12.A.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

Diversos autores han señalado la elevada sensibilidad de las inundaciones a ligeras variaciones en el clima. La detección del cambio se pone de manifiesto en las modificaciones en el patrón de magnitud y frecuencia de eventos extremos. Si analizamos las series temporales que disponemos sobre crecidas en los últimos 2500 años se observan diferentes cambios en el patrón de la frecuencia y magnitud, la mayor parte de ellos se producen en

momentos de transición climática, destacando entre ellos por el incremento y severidad de las inundaciones de 1580-1620 y 1840-1870 en el mediterráneo (Barriendos y Martín Vide 1998) y entre 1590-1610 1730-1760 1780-1810 1870-1900, en las cuencas atlánticas. En el siglo XX se observan dos periodos con incremento en la magnitud y frecuencia en las crecidas en las cuencas atlánticas entre 1930-1950 y 1960-1980, con una disminución en los caudales punta de las crecidas extraordinarias en los últimos 25 años. En la vertiente mediterránea se observa una fuerte irregularidad en los patrones, con aumento de los fenómenos de gota fría en la década de los 80 que generan máximos históricos de caudales en 1982 y 1987, y una reducción de los mismos en la década de los 90. Entre el año 1990 y 2000, se han incrementado las precipitaciones convectivas que generan crecidas relámpago en cuencas pequeñas, como las ocurridas en Yebra y Almoguera (Guadalajara), Biescas (Huesca), Alicante, y Badajoz, entre otros, y que han tenido dramáticas consecuencias sociales (207 víctimas). Este cambio en el patrón de la magnitud y frecuencia de diverso signo en las cuencas atlánticas y mediterráneas se puede interpretar como una señal del cambio en el clima actual.

12.A.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

Con independencia de la severidad del cambio climático, parece claro que los extremos hidrológicos (inundaciones y sequías) constituyen la seña distintiva del clima y la hidrología en España. Por tanto, la legislación existente debería resultar válida para abordar los problemas de la ordenación del territorio, incluso teniendo en cuenta la influencia del cambio climático en los riesgos hidrológicos. En este sentido, existen aspectos legislativos en materia de riesgos naturales que necesitan de modificaciones. Las implicaciones políticas del cambio climático en materia de riesgos naturales deben dirigirse hacia mejora en la gestión, mejora legislativa en materia de riesgos (Directriz Básica de Planificación de Protección Civil), mejora legislativa en leyes relacionadas con la gestión del territorio (Ley de Aguas y Ley del suelo), mejora y aplicación de los Planes Hidrológicos de Cuenca, y desarrollo del Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses. Los estudios técnicos desarrollados para la aplicación de la legislación deberían, en su caso, analizar las incidencias del cambio climático en las crecidas y establecer estrategias de respuesta donde se contemplen nuevos escenarios en relación a los eventos extremos en materia de gestión de los recursos y del territorio.

En relación con las crecidas, se deberían revisar las normas para la determinación de zonas de inundación potenciales y análisis de riesgos dentro del proceso de planificación del territorio, teniendo en cuenta las crecidas ocurridas en el pasado reciente. En la actualidad, tanto la Ley del Suelo (Real Decreto Legislativo 6/1998 de 13 de abril, donde se indica que las zonas con riesgo natural deben de declararse como suelo no urbanizable) como la Ley de Aguas (Real Decreto Legislativo 1/2001 de 20 de julio, o texto refundido de la Ley de aguas donde se establecen los perímetros de protección de Dominio Público Hidráulico) y el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (Real Decreto 849/1986, de 11 de abril) resultan ambiguas en materia de crecidas extraordinarias.

En el aspecto legislativo conviene señalar que en la actualidad la ordenación territorial y protección civil son competencia de las Comunidades Autónomas y, por tanto, son éstas las que deberían de tomar la iniciativa. En general, las Comunidades Autónomas no han desarrollado prácticamente legislación en materia de riesgos de crecidas, con las excepciones de País Vasco, Cataluña y la Comunidad Valenciana, Galicia y Navarra. Estas comunidades han desarrollado sus propios planes de emergencia por inundaciones, que deben posteriormente homologarse por la Dirección General de Protección Civil, así como legislación sobre ordenación territorial en zonas inundables, y han elaborado una cartografía de riesgo para todo su territorio.

En el ámbito europeo, la Directiva Marco Europea en Política de Aguas (DIRECTIVA 2000/60/CE de 23 de octubre de 2000) tiene como objeto establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas. En fechas recientes se han publicado diversos documentos sobre buenas prácticas en relación con los riesgos de crecidas ("*Best practices on flood prevention, protection and mitigation*"). En este documento se menciona explícitamente el incremento del riesgo de inundación como consecuencia del cambio climático, y constituye un primer paso para el desarrollo de medidas legislativas que afecten a los distintos estados miembros y que tengan en cuenta este aspecto. Igualmente, dentro del ámbito europeo se han establecido instrumentos financieros, como el denominado Fondo de Solidaridad de la Unión Europea (FSUE), para paliar los daños económicos derivados de catástrofes naturales, y que surgieron a raíz de las devastadoras inundaciones que tuvieron lugar en agosto de 2002 en los países de Europa central. En estos fondos subyace la idea de poder hacer frente a la repetición previsible de catástrofes relacionadas con los efectos medioambientales negativos de las actividades humanas, y especialmente a la aceleración del cambio climático.

12.A.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

En este informe se pone de manifiesto el escaso conocimiento que se dispone en la actualidad sobre las repercusiones del cambio climático en la frecuencia y magnitud de las inundaciones. En este sentido, las líneas principales de investigación que se deberían desarrollar en un futuro son la siguientes:

- Reconstrucción de series de crecidas del pasado a partir de indicadores geológicos (paleocrecidas) y documentales.
- Análisis de la respuesta de las crecidas a la variabilidad climática durante el pasado en diferentes regiones de España.
- Mejora de la reconstrucción de las situaciones atmosféricas asociadas a eventos extremos para escalas temporales largas.
- Desarrollo de modelos de circulación atmosférica regionales y locales para la obtención de escenarios fiables para los extremos hidrológicos teniendo en cuenta las particularidades de las cuencas atlánticas y mediterráneas.
- Desarrollo de modelos acomplados clima-hidrología para la simulación de eventos extremos a nivel de cuenca.
- Incorporación de previsiones de cambio climático al análisis de frecuencia de crecidas encaminadas a la planificación territorial y el diseño de obras de alto riesgo. Introducción de la no estacionaridad en la planificación de riesgos teniendo en cuenta diferentes escenarios de cambio climático.

12.A.11. BIBLIOGRAFÍA

Barrera A. 2004. Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España. Trabajo realizado para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados. Universidad de Barcelona. DAM/250999-15/0406.

Barriendos M. 1995. La climatología histórica en el estudio de los riesgos climáticos. El episodio de noviembre de 1617 en Catalunya. En: Creus J. (Ed.), Situaciones de riesgo climático en España, Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Jaca. Pgs. 73-83.

Barriendos M. 2002. Los riesgos climáticos a través de la historia: avances en el estudio de episodios atmosféricos extraordinarios. En: F.J. Ayala-Carcedo y J. Olcina (Eds.). Riesgos naturales, Ariel, Barcelona. Pgs. 549-562.

Barriendos M. y Coeur D. 2004. Systematic, palaeoflood and historical data for the estimation of flood risk assessment.

Barriendos M. y Llasat M.C. 2003. The Case of the `Maldá' Anomaly in the Western Mediterranean Basin (AD 1760–1800): An Example of a Strong Climatic Variability. Climatic Change 61: 191-216.

Barriendos M. y Martín Vide J. 1998. Secular Climatic Oscillations as Indicated by Catastrophic Floods in the Spanish Mediterranean Coastal Area (14th-19th Centuries). Climatic Change 38: 473-491.

Barriendos M., Peña J.C., Martín Vide J. y Jonsson P. 2000. The Winter of 1788-1789 in the Iberian Peninsula from meteorological reading observations and proxy-data records, Actas del Congreso Giuseppe Toaldo e il Suo Tempo 1719-1797. Scienza e Lumi tra Veneto ed Europa, Padova. Pgs. 921-942.

Benito G., Machado Mª.J. y Pérez-González A. 1996. Climate change and flood sensitivity in Spain. En: Branson J., Brown A.G. y Gregory K.J. (Eds.). Global Continental Changes: the context of Palaeohydrology. Geological Society of London Special Publication No. 115. Pgs. 85-98.

Benito G., Machado M.J. y Pérez-González A. 1997. Respuesta de las inundaciones al Cambio Climático durante el último milenio.En: Ibáñez JJ., Valero Garcés B.L. y Machado C. (Eds.). El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación. Geoforma Ediciones, Logroño. Pgs. 203-219.

Benito G., Sopeña A., Sánchez-Moya Y., Machado M.J. y Pérez-González A. 2003a. Palaeoflood record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene. Quaternary Science Reviews 22. 1737-1756.

Benito G., Díez-Herrero A. y Fernandez de Villalta M., 2003b. Magnitude and frequency of flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium. Climatic Change 58: 171-192.

Benito G., Díez-Herrero A., y Fernández de Villalta M., 2004. Flood response to NAO and Solar Activity in the Tagus Basin (Cental Spain) over the last millennium. Climatic Change 66: 27-28.

CCS-CONSORCIO DE COMPENSACIÓN DE SEGUROS 2003. Estadística de riesgos extraordinarios. Serie 1971-2002. Madrid, Ministerio de Economía. 148 pgs.

CTEI-COMISIÓN TÉCNICA DE EMERGENCIA PARA INUNDACIONES 1983. Estudio de inundaciones históricas. Mapas de riesgos potenciales. Dirección General de Protección Civil- Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid.

Flohn H. 1993 Climatic Evolution During the Last Millennium: What Can We Learn from It?. En: Eddy J.A y Oeschger H. (eds.). Global Changes in the Perspective of the Past, Chapter 19. John Wiley and Sons Ltd. Pgs. 295-314.

IPCC. 1996. Climate Change 1995. Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Watson R.T., Zinyowera M.C. y Moss R.H. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 880 pgs.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC. McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. y White K.S. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1005 pgs.

Jansà A., Genovés A., Riosalido R. y Carretero O. 1996. Mesoscale cyclones vs heavy rain and MCS in the Western Mediterranean. MAP Newsletter 5: 24-25.

Kirov B. y Georgieva K. 2002. Long term variations and interrelations of ENSO, NAO and solar activity. Physics and Chemistry of the Earth 27: 441-448.

Llasat M. 1991. Gota fría. Boixareu Universitaria. Barcelona. 165 pgs.

Llasat M.C. y Puigcerver M. 1990. Cold air pools over Europe. Meteorology and Atmospheric Physics 42: 171-177.

Llasat M.C., Rigo T. y Barriendos M. 2003 The 'Montserrat-2000' flash-flood event: a comparison with the floods in the Northeastern Iberian Peninsula since the 14th century. International Journal of Climatology 23: 453-469.

Luterbacher J., Xoplaki E., Dietrich D., Jones P.D., Davies T.D., Portis D., Gonzalez-Rouco J.F., von Storch H., Gyalistras D., Casty C. y Wanner H., 2002. Extending North Atlantic Oscillation Reconstructions Back to 1500. Atmospheric Science Letters 2: 114-124.

Masachs V. 1950. Aportación al conocimiento del régimen fluvial mediterráneo. Comptes Rendus du Congrès International de Géographie. UGI. Lisbonne 1949. Vol. II. Pgs. 358-390.

Olcina J y Ayala-Carcedo F. 2002. Riesgos naturales. Conceptos fundamentales y clasificación. En: Ayala-Carcedo F.J. y Olcina J. (coord.). Riesgos Naturales, Ariel Ciencia, Barcelona. Pgs. 41-73.

Olcina J., Ayala-Carcedo F.J., Miró Pérez J. y Pérez A.P. 2002. Anexo II. Relación de catástrofes naturales importantes acontecidas en España en la segunda mitad del Siglo XX. En: Ayala-Carcedo F.J. y Olcina J. (coord.). Riesgos Naturales, Ariel Ciencia, Barcelona. Pgs. 1475-1480.

Ortega J.A. y Garzón G. 2004. Influencia de la Oscilación del Atlántico Norte en las inundaciones del río Guadiana. En: Benito G. y Díez Herrero A. (eds.). Riesgos naturales y antrópicos en Geomorfología. SEG y CSIC. Madrid. Pgs. 117-126.

Parry M.L. (Ed.) 2000. Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: The Europe ACACIA project. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK. 320 pgs.

Pujadas J. 2002. Las inundaciones en España: Impacto económico y gestión del riesgo. En: Ayala-Carcedo F.J. y Olcina J. (coord.). Riesgos Naturales, Ariel Ciencia, Barcelona. Pgs. 879-888.

Thorndycraft V.R, Benito G., Rico M., Sánchez-Moya Y., Sopeña A. y Casas A. 2004. A Late Holocene palaeoflood record from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. Journal Geological Society of India 64: 549-559.

Trigo R.M., Pozo-Vázquez D., Castro-Díez Y., Osborn T., Gamis-Fortis S. y Esteban-Parra M.J. 2003. NAO Influence on Precipitation, River Flow Regimes and Hydroelectric Power Generation in the Iberian Peninsula. Geophysical Research Abstracts 5: 05494.

van Loon H. y Rogers J.C. 1978. The Seesaw in Winter Temperatures Between Greenland and Northern Europe. Part I: General Description. Mon. Wea. Rev. 106: 296-310.

Van Geel B., Van der Plicht J., Kilian M.R., Klaver E.R., Kouwenberg J.H.M., Ressen H., Reynaud-Farrera I. y Waterbolk H.T. 1998. The sharp rise of $\delta^{14}C$ at ca. 800 cal. BC. Possible causes, related climatic teleconnections and the impact on human environments. Radiocarbon 40: 335-350.

Vaquero J.M. 2004. Solar Signal in the number of floods recorded for the Tagus River Basin over the Last Millenium. Comment on "Magnitude and frequency in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium" by G. Benito *et al*. 2003. Climatic Change 66: 23-26.

Walker G.T. y Bliss E.W. 1932. World Weather V. Memories of the Royal Meteorological Society 44: 53-84.

Wanner H., Brazdil R., Frich P., Frydendahl K., Jonsson T., Kington J.A., Pfister C., Rosenorn y Wishman E. 1994. Synoptic interpretation of monthly weather maps for the late Maunder Minimum 1675-1704. En: Frenzel B., Pfister C. y Glaser B. (Eds.). Climatic Trends and Anomalies in Europe.

12. IMPACTOS SOBRE LOS RIESGOS NATURALES DE ORIGEN CLIMÁTICO

B. RIESGO DE INESTABILIDAD DE LADERAS

Jordi Corominas

Contribuyentes

F. J. Ayala, A. Cendrero, J. Chacón, J. R. Díaz de Terán, A. González, J. Moya, J. M. Vilaplana

Revisor

C. Bonnard

RESUMEN

La inestabilidad de laderas produce un impacto económico evaluado en cientos de millones de euros anuales, que afecta fundamentalmente a vías de comunicación y, en menor medida, a núcleos de población. Mientras que el número de víctimas mortales por deslizamientos se ha reducido en las últimas décadas, el producido por aludes de nieve ha aumentado debido a una mayor frecuentación de la montaña.

Los deslizamientos y aludes se concentran en las principales cordilleras montañosas, especialmente en los Pirineos, la Cordillera Cantábrica y las Cordilleras Béticas. No obstante, en las márgenes de los ríos de las grandes cuencas Terciarias también son inestables. El relieve junto al componente litológico explican la distribución geográfica de las roturas en por deslizamiento mientras que es la acumulación en la zona supraforestal y el relieve lo que determina el origen de los aludes de nieve. En las zonas costeras, las roturas se concentran en los acantilados rocosos abiertos a la erosión marina.

Los principales mecanismos desencadenantes de deslizamientos son la lluvia, la fusión de la nieve, las sacudidas sísmicas, las erupciones volcánicas, la socavación por el oleaje y erosión fluvial. Los deslizamientos también pueden ocurrir de forma espontánea sin ningún desencadenante aparente. Los deslizamientos por causas climáticas son los más frecuentes. No obstante, la relación entre el clima y la inestabilidad de laderas es compleja debido a la gran variedad de mecanismos de rotura. Las lluvias de gran intensidad y corta duración (superiores a 100 mm en la Cordillera Cantábrica y a 180 mm en el Pirineo) producen de manera generalizada deslizamientos superficiales, corrientes de derrubios y desprendimientos. Lluvias de intensidad baja o moderada prolongadas durante algunos días o semanas reactivan deslizamientos y coladas de barro. Los grandes deslizamientos tienen un comportamiento muy dependiente del contexto geológico-geomorfológico en el que se encuentran pero, con frecuencia, sus reactivaciones están asociadas a períodos anormalmente húmedos estacionales. De todos modos, no hay que olvidar que, las modificaciones antrópicas (talas forestales, filtraciones, sobrecargas) son causa importante de la aparición de nuevas roturas, aparentemente espontáneas.

En el siglo pasado se han detectado dos periodos húmedos de mayor actividad, los 1905-1930 y 1958-1987, y un periodo de relativa tranquilidad que abarca desde los años 30 hasta los 50. Esta aparente ciclicidad ha sido observada también en otras regiones europeas aunque no de manera simultánea. En lo que se refiere a los aludes de nieve, en los últimos decenios no se ha observado ningún cambio de tendencia ni en la frecuencia ni tipología de los mismos.

La incertidumbre sobre el aumento de la frecuencia de las precipitaciones torrenciales y de los episodios anormalmente húmedos no permite realizar afirmaciones concluyentes. El aumento de la torrencialidad conllevará un mayor número de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios, cuyos efectos pueden verse exacerbados por los cambios de uso del suelo y un menor recubrimiento vegetal. Como consecuencia de ello, es previsible el aumento de la erosión en las laderas que se traducirá en una pérdida de calidad de las aguas superficiales, por el aumento de la turbidez, y un mayor ritmo de colmatación de los embalses.

El descenso de la precipitación nival no implicaría necesariamente una reducción de los aludes debido al aumento de los aludes de fusión, aunque es de esperar una menor extensión geográfica.

La planificación territorial y urbana evitando las áreas más susceptibles es la mejor herramienta adaptativa. El turismo invernal, sin embargo, puede verse afectado desfavorablemente por la menor innivación.

Es necesario disponer de un inventario completo de deslizamientos y una mejor estimación de los daños, que son muy superiores a las cifras conocidas. Es necesario profundizar en las relaciones entre los eventos lluviosos y los distintos tipos de deslizamiento.

12.B.1. INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de laderas es la rotura y desplazamiento de una masa de rocas o tierras hacia el exterior de la misma, con una componente descendente inducida por la acción de la gravedad. También recibe el nombre genérico de deslizamiento. A diferencia de otros peligros naturales, los deslizamientos tienen lugar de manera dispersa en el territorio, especialmente en zonas montañosas y poco pobladas. Por este motivo, los daños materiales y las pérdidas humanas son menores que en las crecidas fluviales o los terremotos. De todos modos, desde el año 1000, han provocado la muerte de, al menos 280.000 personas en todo el mundo (Ayala-Carcedo 1994). La previsión de pérdidas en España para el periodo 1986-2016 ha sido estimada para una hipótesis de riesgo medio, en más de 4500 millones de euros (Ayala-Carcedo *et al*. 1987).

La rotura de laderas incide de manera notable en la economía local. Poblaciones como Alcoi (Alicante); Castellbisbal, El Papiol y Sant Sadurní d'Anoia (Barcelona); Arcos de la Frontera y Medina Sidonia (Cádiz); Benamejí (Córdoba); Blanes, Castellfollit de la Roca y L'Estartit (Girona); Albuñuelas, Almuñécar, Izbor, Monachil, y Olivares (Granada); Rosiana (Gran Canaria); Brallans y Tamarite de Litera (Huesca); Abella de la Conca, Cabdella, El Pont de Bar, La Coma, La Guingueta, Puigcercós, Sort-Bressui (Lleida); Argueda, Azagra, Falces, Funes, Lodosa, Peralta, Valtierra, (Navarra), por citar algunas de ellas, han sufrido daños de diversa consideración. Asimismo, algunos movimientos han comprometido la construcción de presas como las de Zahara (Cádiz), Arenós (Castellón), Beninar (Granada), Lanuza (Huesca), Giribaile (Jaén), La Viñuela (Málaga), Las Picadas y el Atazar (Madrid), Urdalur (Navarra), Contreras y Cortes de Pallás (Valencia). Habiendo sido necesarios onerosos trabajos de contención y programas detallados de auscultación de los movimientos (Sánchez y Soriano 2001).

Sin embargo, los mayores daños son debidos a causas antrópicas. En particular, por los cambios de uso del suelo (talas forestales, alteraciones del drenaje de las laderas) y la ejecución de excavaciones y desmontes. Así, en vías de comunicación son frecuentes las caídas de los taludes y roturas en los terraplenes, en ocasiones, dejando aislados valles enteros y a sus poblaciones, como ocurrió en La Massana (Principado de Andorra) en octubre de 1987 que dejó incomunicado el valle de la Valira del Nord durante un mes. Aunque no existen cifras oficiales, los costes de roturas en desmontes superan con creces los cientos de millones de euros anuales. Sólo las lluvias de invierno de 1995-96 y 1996-97 en Andalucía dieron lugar a cientos de roturas en desmontes y terraplenes de las principales vías de comunicación. Por ejemplo, en la provincia de Málaga, sólo en un tramo de apenas 10 km entre Ardales-Campillo se contabilizaron más de 100 roturas en desmontes (González *et al*. 1997). El coste y las molestias producidas en las retenciones kilométricas por el hundimientos de terraplenes en marzo y mayo de 2004, en la autopista A-3 en Perales de Tajuña (Madrid) o en la AP-7 en Viladesens (Girona), respectivamente, son de difícil estimación.

El uso creciente del espacio en regiones de montaña asociado al turismo y a las actividades deportivas, comporta una concurrencia inusitada en áreas de marcada inestabilidad. Las nuevas vías de comunicación y núcleos urbanos se extienden por lugares en los que los deslizamientos, desprendimientos y otros movimientos ocurren con relativa frecuencia, aumentando así el riesgo para las personas e instalaciones. Por este motivo, el número de incidencias aisladas aumenta año tras año (Tabla 12.B.1).

Tabla 12.B.1. *Roturas ocurridas los últimos 150 años con víctimas y daños de relevancia (elaboración propia a partir de diversas fuentes).*

Localidad	fecha	tipo	consecuencias
Felanitx (Mallorca)	31 marzo 1844	rotura terraplén	414 muertos y 200 heridos
Azagra (Navarra)	1856	desprendimiento	11 muertos
Azagra (Navarra)	21 julio 1874	desprendimiento	92 muertos y 72 casas destruidas
Puigcercós (Lleida)	13 enero 1881	deslizamiento	Casas destruidas. Abandono pueblo
Albuñuelas (Granada)	25 diciembre 1884	deslizamiento	102 muertos y más de 500 heridos. 463 casas destruidas
Azagra (Navarra)	20 enero 1903	desprendimiento	2 muertos
Bono (Lleida)	26 octubre 1937	Alud derrubios	Obtura río
Rocabruna (Girona)	18 octubre 1940	corriente derrubios	6 muertos
Alcalá de Júcar (Albacete)	1946	desprendimiento	12 muertos y varias casas destruidas
Azagra (Navarra)	13 mayo 1946	desprendimiento	2 muertos
Rosiana (Gran Canaria)	17 febrero 1956	deslizamiento	Puente y casas destruidos. 250 evacuados
Benamejí (Córdoba)	Febrero 1963	deslizamiento	55 viviendas destruidas y 50 dañadas
Senet, Benasque (Huesca),	3 agosto 1963	Corriente de derrubio	Obtura río. Afecta carretera
Villanueva de San Juan (Sevilla)	Mayo 1964	Colada de tierras	Obstrucción parcial río. Corta carretera
Alcoi (Alicante)	Diciembre 1964	Deslizamiento rotacional	Agrieta casas
Pont de Bar (Lleida)	7 noviembre 1982	deslizamiento	Casas destruidas. Abandono pueblo
Capdella (Lleida)	7 noviembre 1982	corriente derrubios	3 muertos
Cabra del Camp (Tarragona)	Septiembre 1987	desprendimiento	1 muerto. Autobús alcanzado
Guixers (Lleida)	Octubre 1987	desprendimiento	2 muertos. Vehículo alcanzado
La Massana (Andorra)	Octubre 1987	Deslizamiento	2 muertos. Vehículo alcanzado
Benamejí (Córdoba)	27 diciembre 1989	Deslizamiento	Afectadas decenas de viviendas
Camprodón (Girona)	Mayo 1992	Corriente derrubios	2 muertos

Collado Escobal (Asturias)	Diciembre 1993	Deslizamiento - Corriente derrubios	3 muertos. Destruye vivienda
Sant Corneli (Barcelona)	17 diciembre 1997	Deslizamiento	1 herido grave. Carretera cortada
Ampuero (Cantabria)	10 enero 1999	Deslizamiento – colada de tierras	Destruye varias casas
Montserrat (Barcelona)	10 junio 2000	Corrientes derrubios y desprendimientos	Daños diversas carreteras y funicular
Tenerife	31 marzo 2002	desprendimientos	Carreteras TF-1, TF-2 y TF-5 cortadas
Mogán – Gran Canaria	12 diciembre 2002	desprendimiento	1 muerto –vehículo alcanzado
Cala Sr. Ramon de Palafrugell - Girona	25 Agosto 2003	desprendimiento	2 muertos y 2 heridos
Barruera – Vall de Boí- Lleida	20 septiembre 2003	desprendimiento	2 heridos. Carretera cortada.
Buscabrero de Salas (Asturias)	16 noviembre 2003	Corrimiento – corriente derrubios	2 muertos - vivienda

Dentro de la inestabilidad de laderas, los aludes de nieve tienen un impacto creciente. El auge de los deportes de invierno durante los últimos 15 años ha comportado una mayor frecuentación de la montaña en los distintos macizos ibéricos. A la práctica habitual del esquí alpino dentro los dominios esquiables delimitados, hay que añadir el esquí fuera pista, el esquí de montaña o de travesía y el montañismo invernal. El gran desarrollo de los centros de esquí lleva asociado la urbanización de los valles de alta montaña, los cambios de uso del suelo y la necesidad de mantener los accesos viarios abiertos durante todo el invierno. En consecuencia, en España, zonas de alta montaña tradicionalmente expuestas al peligro de los aludes, que tienen en la actualidad una notable presencia de esquiadores, montañeros, edificaciones, carreteras y otras infraestructuras.

Entre los años 1990 y 1999, 47 personas fallecieron en España por causa de los aludes de nieve. Los macizos o cordilleras con más accidentalidad fueron los Pirineos con 41 víctimas, pero también la hubo en Sierra Nevada (1) y en la Cordillera Cantábrica (5). El número de víctimas por aludes en las últimas décadas ha ido en aumento: 25 en los setenta, 38 en los ochenta y 47 muertos y 37 heridos en los noventa (Base de datos ICC, López *et al* 2000, Rodés 1999). La media anual de víctimas mortales por causa de los aludes desde 1970 es de entre 3 y 4 personas (3.5 muertos de media en los últimos 30 años). En la década 1990 – 1999, la media anual aumenta hasta 4.7 fallecidos. Este incremento se explica por la alta siniestralidad de los eventos ocurridos en la temporada 1990 – 1991 que, con 22 víctimas mortales, representa prácticamente el 50% de las víctimas totales de la década. En esta temporada ocurre uno de los accidentes más graves por su elevado número de víctimas mortales. Un grupo de militares en prácticas de esquí de montaña en el Pico de Paderna (Valle de Benasque) desencadena un alud de placa muriendo nueve personas en el accidente.

Ante el aumento de la actividad en montaña durante el periodo invernal se inició en el año 1990 en el Pirineo de Cataluña un programa de recogida de información sistemática sobre todos los aludes en los que se vieran implicadas personas. Los datos obtenidos de esta información muestran que un número importante de personas han puesto en peligro su vida por causa de los aludes, un total de 187 personas en 38 accidentes durante la década de

los noventa. Desgraciadamente, un 20% de ellas corresponden a víctimas mortales o heridos graves (6% muertos y 14% heridos).

12.B.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA

12.B.2.1. Sensibilidad al clima actual

12.B.2.1.1. Factores desencadenantes de los deslizamientos y aludes

Un desencadenante es un estímulo externo que causa la rotura de forma casi inmediata mediante el aumento rápido de las tensiones o reduciendo la resistencia del material de la ladera. Los principales mecanismos desencadenantes de deslizamientos son la lluvia, la fusión de la nieve, las sacudidas sísmicas, las erupciones volcánicas, la socavación por el oleaje y erosión fluvial. Los deslizamientos también pueden ocurrir de forma espontánea sin ningún desencadenante aparente.

La lluvia es el factor desencadenante más frecuente y extendido en España. Produce inestabilidad por infiltración del agua en la ladera con el consiguiente aumento de las presiones en los poros y juntas del terreno, reduciendo así su resistencia. La relación entre la cantidad de agua infiltrada y la que brota de la ladera controla los cambios en la presión del agua subterránea. Con la infiltración de la lluvia las presiones de agua aumentan hasta un nivel crítico en el que tiene lugar la rotura. El ritmo de infiltración está controlado por la pendiente de la superficie topográfica, el recubrimiento vegetal y la permeabilidad de los materiales. Por otro lado, la estabilidad de la ladera está condicionada por la resistencia del terreno y por la geometría de la misma. La lluvia crítica para producir la rotura cambiará de una ladera a otra y, por tanto, el establecimiento de umbrales regionales de lluvia que den lugar a la rotura de las laderas, tiene notables incertidumbres. A pesar de ello, los umbrales obtenidos son de una inestimable ayuda para la gestión del riesgo.

Hay que tener presente que las actuaciones humanas condicionan en gran medida la aparición de situaciones de inestabilidad en las laderas, dando lugar a deslizamientos que se desarrollan aparentemente de forma espontánea. Así, pérdidas en la red de abastecimiento de aguas o en la de alcantarillado, alteraciones en la cobertera vegetal o cambios en el tratamiento o manejo del terreno (talas masivas de superficie arbórea, desarrollo de pastizales, excavaciones, minas, etc.) producen modificaciones en la distribución de fuerzas en las laderas. Estas actuaciones favorecen, a menudo, la ruptura de las laderas, en condiciones relativamente moderadas de los factores desencadenantes.

La influencia humana es también evidente en el desencadenamiento de aludes de nieve. Si analizamos el número de víctimas involucradas por accidentes según el tipo de aludes, los de placa son aquellos que mayor riesgo comportan para los montañeros. El número de víctimas por aludes de nieve reciente le corresponde el 44% del total, los aludes de placa el 38% y los de fusión o de nieve húmeda el 18%. En general los aludes de nieve reciente son avalanchas de nieve polvo de grandes dimensiones desencadenadas por factores naturales y que inciden sobre las víctimas con una gran presión de impacto. En cambio, los aludes de placa que implican a esquiadores y montañeros suelen ser desencadenados de forma accidental por las mismas víctimas que se encuentran sobre la placa. En los accidentes relacionados con aludes de fusión o de nieve húmeda (flujos de nieve densa producidos en situaciones de aumento de la temperatura) las víctimas suelen ser alcanzadas por el flujo en las laderas o en las vaguadas.

12.B.2.1.2. Condiciones meteorológicas y estabilidad de laderas

A pesar del posible origen múltiple de los deslizamientos, en la Península Ibérica una inmensa mayoría de las roturas se debe al régimen de precipitaciones. Todos los grandes movimientos registrados en Cataluña en el siglo XX, se deben a episodios lluviosos. En la cuenca carbonífera asturiana, un análisis sobre 213 roturas producidas entre 1980 y 1995 (Domínguez 2003) muestra que el 80% de las mismas se debieron directamente a la lluvia mientras que el resto tenía un origen antrópico (obras, filtraciones, minería,…). En Cantabria se tiene constancia de la ocurrencia de dos episodios de lluvias (1983 y 1994) muy intensas (superiores a 100 mm en 24 h) que ocasionaron numerosos deslizamientos por toda la región (González-Díez 1995). En una revisión de 20 deslizamientos repartidos por toda la geografía española Ferrer y Ayala (1997) observaron que las roturas y reactivaciones en deslizamientos, coladas de tierras y corrientes de derrubios se producían en episodios lluviosos anormalmente elevados, con valores que oscilan entre el 15 y el 120% de la lluvia media anual. Lamas *et al*. (1997), encontraron que las lluvias responsables del episodio de deslizamientos en Andalucía de 1996-97 superaron los máximos históricos de los últimos 100 años en el 30% de las estaciones meteorológicas. Las lluvias acumuladas entre noviembre de 1996 y enero de 1997 fueron, en todos los observatorios del sudeste andaluz, más de doble del valor medio correspondiente al mismo periodo estacional.

La duración e intensidad de los episodios lluviosos, los materiales que componen la ladera y la morfología la misma, son los principales factores condicionantes del tipo de deslizamiento producido. En el Pirineo se han distinguido tres situaciones que dan lugar a rotura de laderas o reactivaciones de deslizamientos (Moya y Corominas 1997, Corominas *et al*. 2002): (a) lluvias de gran intensidad y corta duración provocan deslizamientos superficiales, corrientes de derrubios y desprendimientos de forma generalizada; (b) episodios lluviosos de intensidad moderada a baja, prolongados durante varios días o algunas semanas, reactivan deslizamientos rotacionales, traslacionales y coladas de barro; (c) episodios estacionales e interanuales anormalmente húmedos producen reactivaciones en grandes deslizamientos. En contextos geológicos particulares las reactivaciones también pueden ocurrir con lluvias de corta duración.

En la Cordillera Cantábrica, se ha podido establecer, para los últimos 100.000 años, una relación entre períodos de aumento de las precipitaciones e incremento de la frecuencia de deslizamientos (González-Díez *et al*. 1996, 1999). A escala de las últimas décadas, es bien conocida la relación entre episodios de lluvias intensas (p.ej., en agosto de 1983) y deslizamientos, sobre todo superficiales (Remondo 2001, Remondo *et al*. 2004, Cendrero 2003, Cendrero *et al* 2004, Remondo *et al*. 2004).

Los desprendimientos son frecuentes en épocas de lluvia. Sin embargo, también se producen por efecto de ciclos de hielo-deshielo, penetración de raíces o de manera espontánea inducidos por mecanismos de meteorización. Por este motivo, la relación con la precipitación es débil. Tanto en las laderas escarpadas de valles modelados por procesos glaciares, como en el resto de cantiles rocosos muestran juntas abiertas por descompresión que son fuente de desprendimientos. El ritmo de ocurrencia de desprendimientos parece estar sujeta a las fluctuaciones de la temperatura alrededor de 0° más que al régimen de precipitaciones como ocurrió durante la Pequeña Edad de Hielo (Grove 1972).

Deslizamientos superficiales y desprendimientos

En laderas recubiertas por depósitos de vertiente (coluviones) y rocas alteradas, las lluvias de gran intensidad y corta duración tienen capacidad para desencadenar deslizamientos y corrientes de derrubios y desprendimientos. En el Pirineo Oriental, el análisis de las isoyetas y su relación con la distribución de roturas en diversos episodios recientes ha permitido

establecer un umbral de intensidad de lluvia de 180-190 mm en 24-36 h (Gallart y Clotet 1988, Corominas y Moya 1999). En estos casos no era preciso lluvia antecedente. Por el contrario, lluvias persistentes de intensidad baja o moderada apenas provocan deslizamientos superficiales. Ello se debe a la presencia de grandes huecos interparticulares en los coluviones y de macroporos (moldes de raíces, tubificación, perforaciones de animales) en formaciones arcillosas meteorizadas que facilitan el drenaje rápido de las aguas de infiltración de las lluvias de baja intensidad y moderadas. Sólo las lluvias de gran intensidad permiten generar aumentos significativos de las presiones de agua en los poros que conducen a la rotura. Este umbral no está muy alejado de los 171 mm en 19 horas que en junio de 2000 provocaron numerosas corrientes de derrubios, deslizamientos y desprendimientos en Montserrat (Marquès *et al*. 2001).

Determinados contextos locales pueden modificar estas relaciones. En Cantabria, se ha comprobado la aparición de deslizamientos superficiales sobre las laderas de pendientes fuertes, esculpidas sobre materiales del Keuper, con intensidades de precipitación entre 50 y 65 mm/h, muy por debajo de lo esperado. La hipótesis que se está barajando es que durante los meses con mayor pluviosidad acumulada, se desarrolla un flujo de agua subterránea de alto caudal a través de tubificaciones existentes en arcillas del Keuper, ricas en yesos. En el momento que se produce un incremento de la intensidad de lluvia, los caudales se concentran rápidamente a través de las tubificaciones y son capaces de desencadenar argayos (deslizamientos superficiales) justo en el lugar de surgencia.

En desmontes de carreteras y ferrocarriles estos umbrales pueden variar substancialmente a la baja. Esto se debe a que la estabilidad de los desmontes está también condicionada por la geometría (ángulo y altura del desmonte) y el procedimiento de excavación que, según haya sido con procedimientos mecánicos o con explosivos puede afectar a la calidad de la roca. Así, el umbral de lluvia para generar roturas en laderas y desmontes de Asturias se ha establecido en 60 mm en 24 horas (Domínguez *et al*. 1999, Domínguez 2003) y en el Pirineo Oriental en 110 mm en 24 horas (Moya y Corominas 1997, Moya 2002), muy por debajo del observado en laderas naturales. Esta disminución se explica teambién por la escasez de suelo capaz de almacenar agua en pendientes de desmontes.

Deslizamientos y coladas de tierras

Las coladas de tierras y los deslizamientos rotacionales y traslacionales, con volúmenes de algunas decenas a cientos de miles de metros cúbicos, suelen reactivarse durante episodios de moderada intensidad, entre 40 y 100 mm de lluvia en 24 h, con la condición de que se hayan acumulado 90 mm o más de lluvia en los días precedentes (Corominas y Moya 1999). Este tipo de deslizamientos tienen lugar en formaciones geológicas arcillosas y limo-arcillosas de baja permeabilidad. En estas formaciones la infiltración del agua de lluvia está controlada por el tamaño de las partículas y, en menor medida, por las fisuras y la recarga a través de capas más permeables como las areniscas interestratificadas. Los citados autores han establecido el siguiente umbral para el Pirineo:

$$I = 66.1\ D^{-0.59}$$

Donde I, es la intensidad media de lluvia en milímetros por día y D es la duración de la tormenta en días. La expresión es válida para episodios lluviosos de más de una semana de duración, que hayan acumulado, por lo menos, 90 mm de lluvia.

Grandes deslizamientos

Los registros históricos muestran que la mayoría de primeras roturas de grandes deslizamientos han sido desencadenadas por factores no climáticos (Corominas 2000). Por el contrario, la lluvia es la causa más frecuente de la reactivación de deslizamientos latentes y de la aceleración de los ya activos. La relación entre la lluvia y la actividad de los deslizamientos no se puede establecer fácilmente; esto es debido a que el comportamiento hidrológico de los grandes deslizamientos no se comprende todavía suficientemente. El avance en este campo requiere una modelación mecánico-hidrológica compleja que requiere gran cantidad de datos del terreno e instrumentales, raramente disponibles. En general los largos periodos húmedos (a escala estacional, anual o decenal) parecen tener cierta influencia en la reactivación de los grandes deslizamientos (figura 12.B.1) aunque, a menudo, la relación sólo puede establecerse de manera cualitativa.

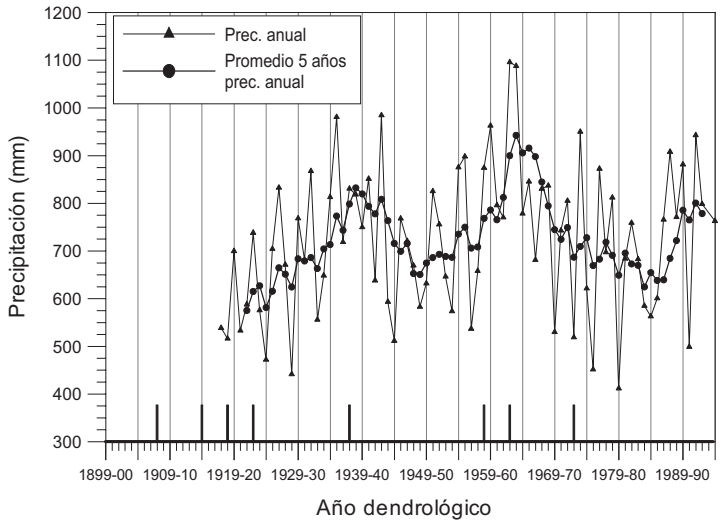


Fig. 12.B.1 *. Episodios de reactivación (barras verticales) del deslizamiento del Barranco de Boés en Llavorsí (Pirineo Central) y su relación con la lluvia media anual y la de cinco años registrada en la estación meteorológica de Capdella. Los episodios de reactivación se han identificado mediante análisis dendrogeomorfológico (Corominas et al. 2004).*

Sin embargo, en contextos geológicos muy particulares que favorecen la inestabilidad, sea por el aporte extraordinario de agua subterránea (p.ej. contacto con macizos cársticos) o por cambios topográficos bruscos (p.ej. la erosión del pie), los deslizamientos pueden reactivarse con episodios de lluvia de corta duración gran intensidad. Algunos casos se pudieron observar durante las intensas lluvias de 6-7 de Noviembre de 1982 en el Pirineo Oriental (Corominas y Alonso 1990). Asimismo, algunos deslizamientos están en permanente movimiento, como en Vallcebre (Pirineo Oriental), con un volumen estimado de más de $20x10^6$ m^3 (Corominas *et al*. 1999). La presencia de grietas, que facilitan la entrada directa del agua de lluvia al deslizamiento, junto con la erosión del pie por un torrente posibilitan la aceleración del movimiento en cuestión de unas pocas horas (figura 12.B.2).

La omisión de estos aspectos puede conducir a una equivocada percepción del papel del clima en el desencadenamiento de los deslizamientos.

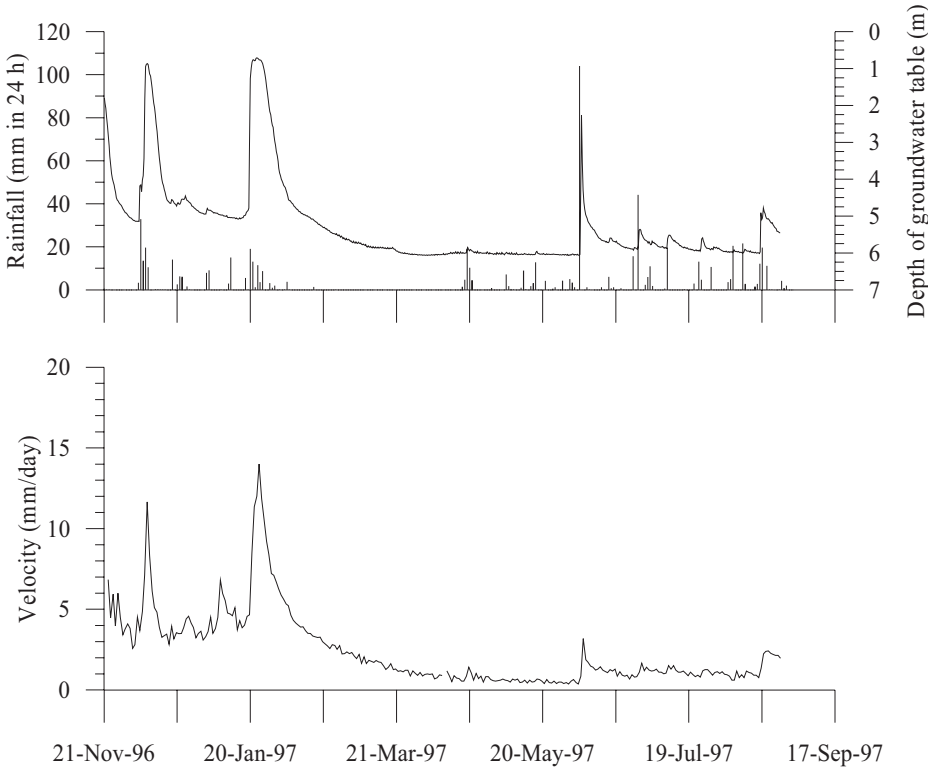


Fig. 12.B.2. *Episodio lluviosos y respuesta del deslizamiento de Vallcebre (Barcelona). Arriba: registro de lluvia (barras verticales) y cambios de los niveles de agua subterránea en el sondeo S-2. Abajo: velocidad de desplazamiento horizontal de la superficie del terreno en la boca del sondeo (Corominas et al. 1999).*

12.B.2.1.3. Distribución espacial de la inestabilidad

La distribución de los deslizamientos por España está controlada por dos elementos fundamentales: el relieve y la presencia de materiales susceptibles (tabla 12.B.2). También influyen, pero en menor medida, la vegetación y el tipo de uso del terreno. El clima, la erosión y los terremotos son, por ese orden los mecanismos desencadenantes más frecuentes. Los sectores occidental y central de la Península, que constituyen el zócalo hercínico de la Meseta, son los menos problemáticos. Esto se debe a las características resistentes de los materiales (rocas plutónicas, gneises, cuarcitas y esquistos) y a la suave morfología (Araña *et al*. 1992). Por el contrario, las cordilleras alpinas presentan el mayor número de fenómenos, favorecido por el joven relieve de las cordilleras, la elevada pluviosidad y la presencia de litologías susceptibles. La naturaleza eminentemente carbonatada de los rebordes montañosos de la Meseta, confiere a estas zonas una relativa estabilidad; no obstante las formaciones arcillosas y arenosas, abundantes en ciertas áreas de la Cordillera Cantábrica, son altamente inestables. En las depresiones terciarias, son usuales los relieves tabulares debido a la disposición subhorizontal de los estratos. Los ríos que drenan estas depresiones excavan amplios valles en los que las vertientes constituidas por materiales arcillosos o limolíticos experimentan abundantes procesos de inestabilidad.

Tabla 12.B.2. *Litologías inestables en España, tipos de roturas asociadas y su distribución geográfica (síntesis a partir de datos de Corominas 1985, Corominas 1989, Araña et al. 1992, Corominas 1993).*

Litología	Edad	Tipo de rotura	Area
Pizarras negras	Silúrico	Deslizamientos, Coladas de tierras	Pirineo
Yesos y arcillitas	Keuper	Deslizamientos rotacionales y traslacionales, coladas de tierras	Pirineo, Cordilleras Costeras Catalanas, Cordillera Cantábrica, Sistema Ibérico, Sierra Tramuntana, Subbéticas
Arcillas rojo-violaceas, margas y limolitas (Facies Weald)	Cretácico inferior	Deslizamientos rotacionales y traslacionales	Cordillera Cantábrica Sistema Ibérico
Alternancias de margas azules con calizas	Aptiense	Deslizamientos rotacionales y coladas de tierras	Sistema Ibérico
Alternancias de lutitas, areniscas rojas, lignitos (Facies Garum)	Cretácico Superior	Deslizamientos rotacionales, traslacionales, coladas de tierras	Pirineo
Arcillas margosas	Eoceno inferior - Luteciense	Deslizamientos rotacionales, coladas de tierras	Prepirineo Sierras Prebéticas
Margas y alternancias de arenisca, margas y calizas (Facies Flysch)	Eoceno inferior	Coladas de tierras, deslizamientos	Pirineo, Costa Cantábrica
Yesos masivos	Oligoceno	Desprendimientos y vuelcos	Depresión del Ebro
Arcillas, limos arenosos	Mioceno	Deslizamientos rotacionales, coladas de barro	Cuenca del Duero, Tajo. Depresiónes intramontañosas del Vallès-Penedès, Cerdanya, Granada, Hoya de Alcoy
Grandes bloques y gravas rodeados de matriz arenosa-limosa o arcillosas (Till glaciar)	Pleistoceno	Corrientes y aludes de derrubios. Deslizamientos rotacionales	Pirineo, Cordillera Cantábrica,
Gravas, arenas, limos y arcillas (coluvión)	Pleistoceno-Holoceno	Deslizamientos y corrientes de derrubios	Todas las cordilleras
Basaltos	Mioceno, Plioceno, Pleistoceno	Grandes deslizamientos Desprendimientos	Islas Canarias, Región de Olot

Teniendo en cuenta el contexto morfolitológico, hay que distinguir tres grandes dominios para los deslizamientos: (a) las principales cordilleras, (b) las depresiones neógenas y (c) las costas acantiladas.

(a) *Roturas en las grandes cordilleras*. Los Pirineos, la Cordillera Cantábrica, Sistema Ibérico, las Cordilleras Béticas y las Sierras Costeras Catalanas, concentran una parte importante de las roturas debido a la coincidencia de un relieve acusado, esculpido en gran parte por sistemas morfogenéticos glaciares y/o periglaciares (activos o relictos), la presencia de terrenos susceptibles, y un régimen de lluvias favorable, especialmente en el entorno mediterráneo. Dos factores del relieve, favorecedores de la inestabilidad, destacan sobre los demás: el empinamiento de las laderas por la acción erosiva de los glaciares pleistocenos y el encajamiento de la red fluvial actual, en algunos casos favorecida por mecanismos de levantamiento orogénico (i.e. valle del río Guadalfeo, Cordilleras Béticas). Los materiales susceptibles a deslizar son claves en la aparición de roturas. Diversas son las formaciones litoestratigráficas sensibles que están con frecuencia afectadas por fenómenos de inestabilidad.

Una síntesis de las litologías más susceptible en los Pirineos puede encontrarse en Corominas y Alonso (1984). En esta cordillera las pizarras silúricas han dado lugar a grandes roturas en Pardines y Nevà (Girona), Pont de Bar y Arduix (Lleida), preferentemente coladas de tierras pero también deslizamientos traslacionales (Bru *et al*. 1984a, Fleta 1988). Asimismo las margas y yesos del Keuper causan deslizamientos rotacionales y coladas en Pont de Suert. Las facies flysch mesozoicas originan roturas complejas rotacionales y coladas o deslizamientos sobre capas desde la zona de los Nogueras hasta de depresión de Jaca. En los depósitos glaciares (tills) son abundantes las corrientes y aludes de derrubios, y los deslizamientos rotacionales (Brocal 1984, Bru *et al* 1984b). Las roturas de estos materiales han dejado profundas cicatrices en La Guingueta, Artíes, Taüll, Capdella y Bono (Lleida), Senet y Benasque (Huesca). Los coluviones recubren gran parte de las laderas y dan lugar deslizamientos y coladas de derrubios. Han sido especialmente significativos los sucesos de octubre de 1937 en la cuenca alta del Segre, octubre de 1940 en la cuenca del Ter, noviembre de 1982 en las cuencas de los ríos Llobregat, Segre y Nogueras.

En la cordillera Cantábrica son particularmente abundantes las formaciones sedimentarias de arcillas con intercalaciones de margas y limolitas de la Facies Weald y las facies del Keuper. Estas formaciones dan lugar a deslizamientos rotacionales y traslacionales como en el valle del Pas (Fernández-Montero y García Yagüe 1984) y en los valles del Miera, Saja y Besaya (García-Yagüe y García-Álvarez 1988, González-Diez *et al*. 1996). Los niveles de lignitos presentes en las formaciones del Carbonífero del valle del Sil favorecen también los grandes deslizamientos traslacionales. Igual que en los Pirineos, los recubrimientos coluviales son la fuente de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios; así quedó de manifiesto en agosto de 1983 en el País Vasco y Cantabria. En las Cordilleras Béticas los materiales inestables son relativamente jóvenes. Las arcillas y margas del Cretácico inferior-medio originan coladas de barro como en los Olivares (Rodríguez-Ortiz y Durán 1988, Chacón y López 1988). En el dominio Bético abundan los deslizamientos traslacionales y rotacionales y las corrientes de derrubios, especialmente en filitas (El Hamdouni 2001, Chacón *et al*. 2003) mientras que en el Subbético, el predominio de afloramientos de margas jurásicas y cretácicas se refleja en una abundancia de coladas de tierras (Irigaray y Chacón 1991, Irigaray 1995). En la cordillera Ibérica, las intercalaciones margosas entre las formaciones calcáreas han permitido el desarrollo de grandes deslizamientos y coladas de tierras, como en Puebla de Arenoso (Castellón).

Además de la presencia de una formación litológica susceptible, también la disposición estructural de la misma condiciona la aparición de roturas. Incluso en formaciones rocosas resistentes ocurren fenómenos de inestabilidad con cierta frecuencia, que aprovechan debilidades estructurales (planos de estratificación, diaclasas, fallas, planos de esquistosidad). Cuando estas últimas buzan de modo desfavorable en relación a la orientación de la ladera, pueden producirse deslizamientos de grandes dimensiones tanto en formaciones calcáreas, como en granitos o en areniscas. Esto especialmente observable en los conjuntos sedimentarios del Prepirineo, Cordillera Cantábrica y Cordilleras Béticas. De este modo se explican los grandes deslizamientos traslacionales como los de Vallcebre (Corominas *et al*. 1999), los del valle del Magdalena-Pas y Miera en Cantabria (González-Diez 1995, González-Diez *et al*. 1999), los de la Cuenca Carbonífera Asturiana (Menéndez 1994; Domínguez 2003). En cordilleras Béticas los deslizamientos traslacionales están asociados a metapelitas y los rotacionales a filitas y esquistos (Chacón y Soria 1992, Fernández *et al*. 1997a).

Asimismo, el relieve empinado junto con las condiciones climáticas rigurosas (heladas), facilitan el desarrollo y apertura de grietas facilitando la aparición de desprendimientos y vuelcos en estas formaciones rocosas. En los relieves calizos y de cuarcitas cantabros, la desfavorable orientación de los estratos y diaclasas ha favorecido el desarrollo de avalanchas de rocas (Jiménez 1997, Menéndez y Marquínez 2002).

Los aludes de nieve tienen lugar en las principales cordilleras. Si atendemos al número de víctimas mortales por cordilleras, se observa que el 61% de las mismas se han producido en el Pirineo de Aragón y Navarra y el 26% en el Pirineo de Cataluña. La accidentalidad ha sido el doble en el Pirineo de Cataluña que en él de Aragón, no obstante la gravedad de los accidentes ha producido más víctimas en esta última zona. El número de víctimas mortales en la Cordillera Cantábrica fue de 5 muertos (4 en Asturias y 1 en Palencia) y en Sierra Nevada (Granada) de uno para el mismo período considerado.

(b) *Depresiones neógenas*. Los valles del Duero, del Tajo y del Guadalquivir así como las depresiones intramontañosas como las de la Cerdanya, Vallès-Penedès, el Bierzo, Hoya de Alcoy o Depresión de Granada, se encuentran rellenas de potentes formaciones detríticas entre las que aparecen importantes paquetes de arcillas continentales y marinas así como formaciones yesíferas interestratificadas con margas. La migración de los meandros de los cursos principales, que conlleva la erosión del pie de las laderas, es la causa principal de deslizamientos traslacionales y rotacionales en las márgenes del Duero (Berganza y Modrano 1978, Martínez y García Yagüe 1988, Monterrubio *et al*. 2001), de desprendimientos y vuelcos en las márgenes del Ebro (Gutiérrez *et al*. 1994) y del Guadalquivir. Mientras que el encajamiento de la red afluente inestabiliza las laderas en la cuenca baja del río Llobregat (Bordonau y Vilaplana 1987), en la cuenca del río Anoia (Barcelona), en la cubeta del Bierzo (Alonso y Lloret 1988) y en la Depresión de Granada (Chacón *et al*. 2001 y 2003). Aunque estos deslizamientos no suelen ser de grandes dimensiones algunos alcanzan varios millones de metros cúbicos como en Benamejí (Córdoba) o Hontoria y Tariego de Cerrato (Valladolid).

(c) *Acantilados costeros e Islas Volcánicas*. El conjunto de la costa cantábrica desde el País Vasco hasta Asturias muestra numerosos fenómenos de deslizamiento por erosión y descalce de los acantilados. Especialmente los afloramientos de flysch eoceno en el País Vasco (Salazar y Ortega 1990) y bahía de Cádiz (Andreu y Martínez-Alegria 1984), las facies Keuper de Asturias (González-Villarías 2001) y la costa norte de Mallorca (Ferrer *et al*. 1997, Mateos 2001). Los macizos graníticos y de calizas fracturadas en la Costa Brava, dan lugar a frecuentes desprendimientos de bloques y cuñas rocosas. En el archipiélago canario, la erosión y retroceso de los apilamientos de lava genera imponentes acantilados con frecuentes desprendimientos.

Las Islas Canarias suponen un contexto muy particular. El apilamiento de sucesivas coladas de lava y materiales piroclásticos ha construido edificios volcánicos en los que se han originado las roturas de mayores dimensiones conocidas en España, del orden de varios kilómetros cúbicos, como la del valle de la Oratava y Teguise en Tenerife (Bravo 1962, Ancochea *et al*. 1990, Watts y Masson 1995) la del Golfo en Hierro (Soler 1997), la Palma (Carracedo *et al* 1999) etc. Estas roturas son prehistóricas y aunque las hipótesis de rotura más aceptadas apuntan hacia un origen asociado a la acumulación de materiales volcánicos, las inyecciones de diques y sismicidad relacionada, así como erosión marina, no hay que descartar la influencia climática como factor coadyuvante (Hürlimann *et al*. 1999) e, indirectamente, el descenso del nivel del mar asociado a los episodios glaciales (Carracedo *et al* 1999, Ablay y Hürlimann 2000). En Gran Canaria, las superficies de rotura de los grandes deslizamientos de la Depresión de Tirajana han aprovechado la presencia de niveles débiles (tobas, cenizas e ignimbritas) intercalados entre las coladas de lava (Lomoschitz *et al*. 2002).

12.B.2.1.4. Distribución estacional de la inestabilidad de laderas

Existe una marcada heterogeneidad en la distribución temporal de las roturas entre el entorno mediterráneo y el resto de la península. En el siglo pasado, los episodios más importantes de inestabilidad de laderas en las Sierras Costeras Catalanas, Pirineo Oriental y Cordillera Ibérica, se han concentrado fundamentalmente en otoño – Octubre y Noviembre - aunque

esporádicamente ha habido episodios distribuidos por las otras estaciones. En la Cordillera Cantábrica, en las Cordilleras Béticas y en las Depresiones Neógenas predominan las roturas en la época invernal. Un análisis de las roturas de la Cuenca Carbonífera Asturiana a lo largo de un periodo de 15 años (1980-1995) muestra que la mayoría de las 213 roturas producidas tienen lugar en noviembre, diciembre y abril (Domínguez 2003). Sin embargo, no son insólitos los episodios de lluvias de primavera-verano que dan lugar a numerosos deslizamientos. Por ejemplo, el ya citado de agosto de 1983 ha sido probablemente él que más deslizamientos ha causado en las últimas décadas en Cantabria y el País Vasco (Remondo *et al*. 2004). En las Islas Canarias, los deslizamientos y desprendimientos se concentran preferentemente durante los meses de invierno.

12.B.2.1.5. Cambio en la frecuencia de las roturas y reactivaciones recientes

Los últimos decenios del siglo pasado han sido especialmente activos en los que se refiere a la ocurrencia de nuevas roturas y reactivaciones. En el Pirineo central y oriental, las reactivaciones de deslizamientos y coladas de tierras de tamaño mediano y grande (figura 12.B.3) se han incrementado. Observando el registro de reactivaciones obtenido mediante técnicas dendrogeomorfológicas, que cubre la totalidad del siglo pasado, se observa una cierta ciclicidad con la presencia de dos periodos húmedos de mayor actividad: 1905-1930 y 1958-1987. La existencia de un periodo de relativa tranquilidad abarca desde los años 30 hasta los 50 así como el aumento de la actividad en el último tercio de siglo pasado ha sido también observado en algunas regiones europeas, aunque no se produce de manera simultánea (Eisbacher and Clague 1984, Brunsden and Ibsen 1994, Janbu *et al*. 1995, Noverraz *et al*. 1998).

De todos modos, no debe olvidarse que las alteraciones de origen antrópico pueden traducirse en cambios significativos en la frecuencia de las roturas. Análisis llevados a cabo en la zona cantábrica (Remondo 2001, Remondo *et al*. 2004, Cendrero 2003, Cendrero *et al*. 2004) han puesto de manifiesto que la frecuencia de deslizamientos y el volumen movilizado por los mismos se multiplicó prácticamente por diez entre 1954 y 1997, sin que ese notable aumento se haya podido correlacionar con incrementos comparables en la precipitación total, número de tormentas o número anual de días de lluvia por encima de determinados umbrales, que no muestran cambios significativos. Sí parece existir, por otra parte, una relación entre el grado de intervención humana sobre el territorio, a través de acciones muy diversas ligadas a su vez a la actividad económica en su conjunto. Lo que parece indicar esto es que la intervención humana modifica la sensibilidad de la capa superficial a la acción del principal agente desencadenante, la lluvia, de modo que disminuye de forma importante la resistencia a la rotura y, por tanto, el umbral de precipitación necesario para desencadenar deslizamientos.

Hay pocos datos en España referentes a series temporales que nos informen directamente sobre la actividad de aludes de nieve. En Cataluña, la comunidad donde se empezó a recoger datos sistemáticos sobre aludes y su peligrosidad (Vilaplana y Martínez 1996) los datos analizables del ICC, dan alguna idea sobre tendencias. Si tenemos en cuenta los factores climáticos que condicionan el manto nivoso (temperatura y precipitación de la temporada invernal), la interpretación termopluviométrica nos indica que entre la temporada 1977-78 (inicio de la serie nivo meteorológica del Pirineo catalán) y 1986-87 se aprecia un equilibrio de los valores anuales de temperatura y precipitación en relación a los valores medios de la serie con una cierta desviación hacia los valores más fríos. En cambio, entre las temporadas entre 1987-88 y 2001-2002 se aprecian unos valores más desequilibrados, con una preferencia a desviarse hacia valores más cálidos (entre 0.5 y 2.5ºC con respecto a la media), alternando inviernos más secos con inviernos más cálidos.

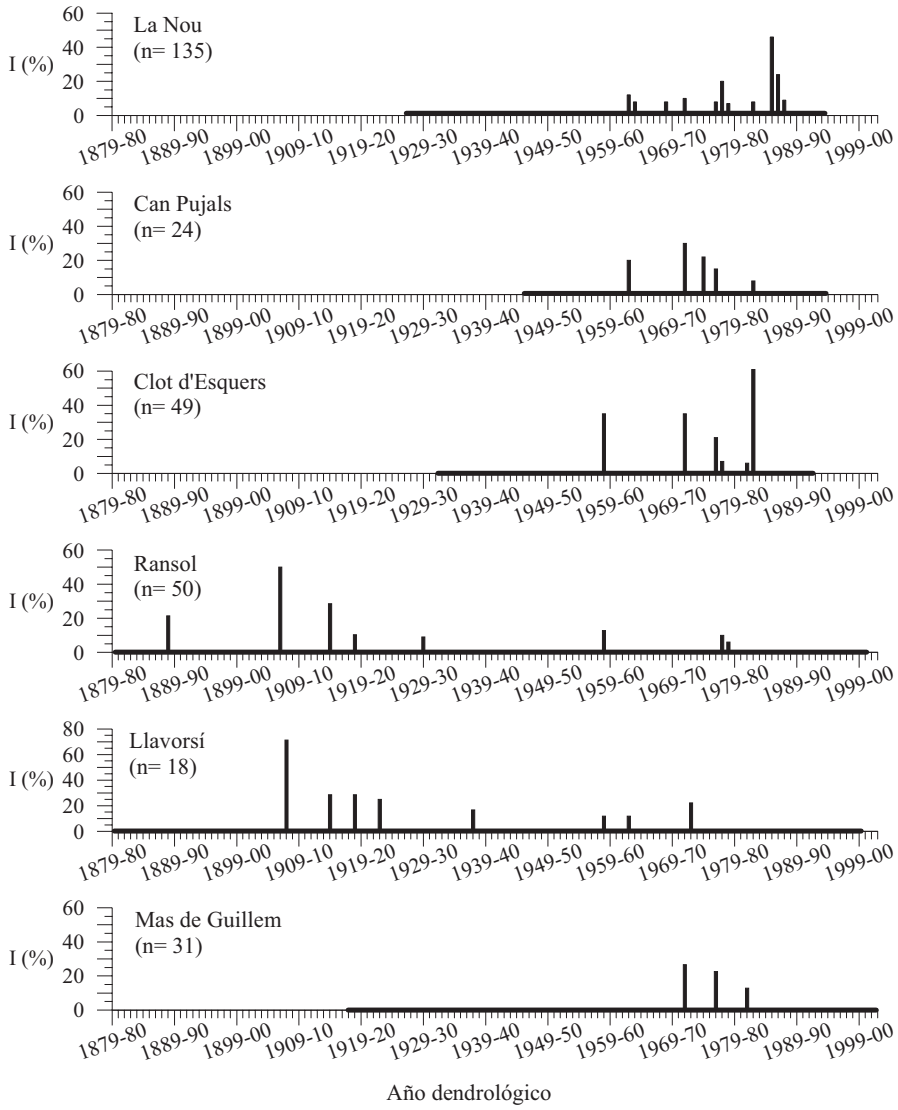


Fig. 12.B.3. *Sucesos de reactivación, expresados por barras verticales, deducidos del análisis dendrogeomorfológico de seis movimientos repartidos por el Pirineo Oriental. I: índice de actividad (porcentaje de árboles muestreados que presentan respuesta); n: número de árboles muestreados; la línea gruesa inferior indica el periodo cubierto con los árboles muestreados (Corominas et al. 2004).*

En la base de datos del ICC se recoge una serie nivometeorológica de los últimos 25 años. La información actualmente disponible sobre la actividad de aludes es muy fragmentaria por lo que difícilmente se pueden extraer conclusiones. Para los últimos años de la serie la información es más precisa pero abarca un período no representativo. A pesar de que en los últimos años se producen más nevadas en primavera, no se puede establecer relación con respecto a la actividad de aludes ni a su tipología. En los eventos de mayor magnitud no se aprecia que los aludes de nieve reciente disminuyan a favor de los aludes de fusión. Tampoco se aprecia la aparición de episodios de slush flow, únicamente hay uno reseñado en el Pirineo de Lleida (Furdada *et al*. 1999).

12.B.2.2. La inestabilidad de laderas en el pasado. Relación con el clima

12.B.2.2.1 Criterios para establecer el origen climático de la inestabilidad de laderas respecto otros posibles orígenes

La evidencia que las lluvias son los principales responsables de la rotura de muchas laderas lleva a la pregunta de si los diferentes tipos de deslizamientos llevan asociados señales climáticas específicas. La pregunta la podemos trasladar al momento actual: ¿la actividad de los deslizamientos actuales permite inferir un contexto climático inequívoco? ¿qué otros factores pueden cuestionar las interpretaciones climáticas de la actividad de los deslizamientos?

Los primeros trabajos sobre el tema (Starkel 1985) sugerían un sincronismo de las fases de avance glaciar, de solifuxión y de descenso del límite superior del bosque en coincidencia con tormentas intensas, lluvias persistentes y años húmedos y una mayor actividad de los deslizamientos. Sin embargo, estudios recientes más completos muestran que los factores no climáticos a menudo difuminan las señales climáticas (Berrisford y Matthews 1997) y que las series de deslizamientos contienen con frecuencia movimientos de origen no climático. Por este motivo, antes de establecer relaciones causa-efecto, hay que realizar una selección cuidadosa del grupo de deslizamientos para asegurar que sólo el clima es responsable de su actividad.

No existe ningún tipo concreto de rotura de ladera o característica morfológica en una rotura aislada que indique de manera inequívoca que ha sido provocada por las lluvias o fenómenos climáticos. Tanto las lluvias como los terremotos causan desprendimientos, deslizamientos, corrientes de derrubios, coladas de tierras y grandes deslizamientos. Cuando se trata de deslizamientos recientes, ocurridos en las últimas décadas o en el último centenar de años, es posible, en principio, inferir el mecanismo desencadenante de los mismos contrastando su edad con los registros de lluvias, de inundaciones y de terremotos. Lo anterior no es factible en el caso de deslizamientos antiguos (de varios centenares a miles de años de edad). Sin embargo, el mecanismo desencadenante puede deducirse, en ocasiones, a partir del análisis de poblaciones de deslizamientos. Los métodos utilizados se basan en la presencia de diversos rasgos concurrentes. Para ello se necesita de una población de deslizamientos contemporáneos de edad conocida. La hipótesis principal consiste en que la agrupación de los deslizamientos en un mismo lapso de tiempo indica que comparten el mismo mecanismo desencadenante. La tipología de la población de deslizamientos puede proporcionar alguna clave para la identificación del factor desencadenante (tabla 12.B.3). Existe una relación directa entre la distribución espacial de los deslizamientos y en relación al mecanismo desencadenante: clima, sismo, incisión fluvial (Palmquist y Bible 1980, Crozier 1991). Los dos primeros causan roturas distribuidas por grandes áreas. Sin embargo, los deslizamientos desencadenados por un sismo tienden a ajustarse a una elipse cuyo eje mayor está centrado en la falla que lo ha causado mientras que la lluvia provoca deslizamientos distribuidos de manera más homogénea por la región. Además, el tamaño modal de los deslizamientos causados por sismos es mayor que los inducidos por las lluvias. Los episodios lluviosos pueden producir roturas aisladas de grandes deslizamientos pero aparentemente sólo los sismos pueden producir numerosas roturas profundas de las laderas de forma simultánea. Los deslizamientos producidos por la incisión fluvial se encuentran sólo al pie de las laderas, en el fondo del valle.

Otros tipos de movimientos de ladera, como las avalanchas rocosas han sido considerados como inducidos por los sismos (Schuster *et al*. 1992). La inferencia sísmica se ha obtenido también a partir de la ocurrencia masiva de desprendimientos rocosos (Bull *et al*. 1994). Desprendimientos datados mediante liquenometría fueron considerados como resultado de las sacudidas sísmicas después de calibrar las distribuciones de frecuencia del tamaño de los líquenes con la actividad sísmica histórica.

Tabla 12.B.3. *Características de los deslizamientos en relación con el clima y los terremotos*.

Tipo de deslizamiento	Causa sísmica	Causa climática
Roturas generalizadas	Roturas aparecen distribuidas en torno a la falla activa, construyendo una elipse con el semieje mayor paralelo a la traza de la misma. Tamaño modal grande	Roturas distribuidas por regiones distantes Tamaño modal menor que los producidos por sismos
Desprendimientos	Desprendimientos simultáneos	Asociados a ciclos de hielo-deshielo A menudo provocados por la lluvia Umbrales sin lógica
Avalanchas rocosas	Agrupaciones de avalanchas rocosas	Raramente por causas climáticas
Corrientes de derrubios y deslizamientos superficiales	Posible si el contenido de agua en la ladera es grande	Tormentas de gran intensidad y corta duración
Coladas de tierras	Frecuentes durante los terremotos	Intensidad moderada y larga duración para reactivar movimientos latentes Poca lluvia para movimientos activos
Deslizamientos rotacionales y traslacionales	Tienen relación con los terremotos, si bien suelen activarse después de algunos días	Intensidad moderada y larga duración para reactivar movimientos latentes
Grandes deslizamientos	Agrupaciones de primeras roturas	Raramente primeras roturas Lluvia estacional o anual reactiva deslizamientos latentes o acelera activos. Relación compleja.

Los movimientos más característicos por causas climáticas son las corrientes de derrubios y los deslizamientos superficiales aunque el origen sísmico no puede descartarse en regiones tectónicamente activas. Los deslizamientos rotacionales y las coladas de tierras son producidos tanto por lluvias como por sismos. Hay que prestar atención a los movimientos de flujo (coladas de tierras) ya que pueden permanecer activos durante siglos. En este caso, no es posiible establecer una relación con los mecanismos desencadenantes.

No hay que olvidar que algunos periodos con mayor frecuencia de deslizamientos están asociados a la erosión costera o fluvial. El clima ejerce un control directo sobre las crecidas fluviales y temporales marinos pero la erosión continuada de la base de los acantilados y la de los depósitos acumulados al pie de los mismos son los que controlan la estabilidad a largo plazo.

Las técnicas de análisis multicriterio (análisis de rasgos geomorfológicos, relaciones de yacencia, dataciones absolutas y relativas) han sido utilizadas en Canarias (Lomoschitz y Corominas 1992, Lomoschitz *et al*. 2002) y la Cordillera Cantábrica (González-Díez 1995, González-Díez *et al*. 1996, González-Díez *et al*. 1999, Jiménez 1997) para agrupar los deslizamientos en poblaciones de edad parecida.

A pesar de que el clima no constituya el único desencadenante de deslizamientos ejerce un importante papel en la resistencia del terreno, a través de su control de las presiones de agua en el mismo; y, por lo tanto, tiene una gran influencia, aunque indirecta, en la formación de deslizamientos desencadenados por otros mecanismos.

12.B.2.2.2. Efectos de la variabilidad climática sobre inestabilidad de laderas a partir de series de deslizamientos datados

Como se ha indicado, no todos los deslizamientos prehistóricos pueden atribuirse a condicionantes del clima. Las enormes aberturas laterales de los edificios volcánicos en Gran Canaria (Barranco de Tirajana) o en Tenerife (Valle de la Oratava, Valle de Güimar) se deben al deslizamiento de gigantescos paquetes de lava y piroclastos, durante el Plioceno y Pleistoceno y su origen se atribuye en general a la sismicidad asociada a erupciones volcánicas, a las presiones de gases y diques inyectados en los edificios volcánicos, a la erosión marina, etc.

En zonas de sismicidad moderada o reducida se puede suponer que la actividad de los grandes deslizamientos ha sido asociada a los periodos húmedos. En el valle del Pas, la distribución espacial y la tipología de los deslizamientos, agrupados según su edad, ha permitido establecer hipótesis razonables sobre el origen climático, sísmico, por incisión fluvial y antrópico (González-Díez 1995, González-Díez *et al*. 1996,; González-Diez *et al*. 1999). Ello ha permitido el uso de los deslizamientos datados como indicadores del clima pasado (figura 12.B.4).

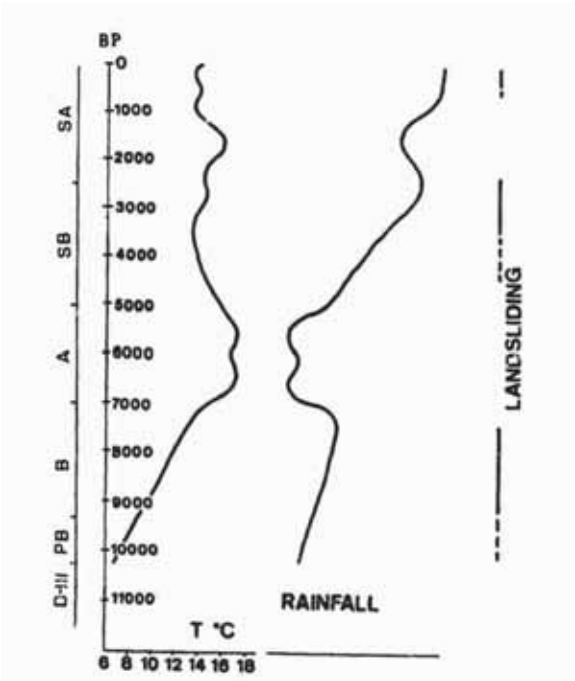


Fig. 12.B.4. *Relación entre pluviosidad, temperatura y ocurrencia de deslizamientos en el Valle del Magdalena-Pas, Cordillera Cantábrica (González-Diez et al. 1996)*.

Los datos de la Cordillera Cantábrica (González-Diez *et al*. 1999) indican que los periodos de mayor actividad de los deslizamientos corresponderían al inicio del último periodo interglacial (125.000 BP), al inicio del deshielo glacial coincidiendo con un aumento de las temperaturas (50.000-45.000 BP), en un corto episodio interglacial (25.000-20.000 BP), coincidiendo con la deglaciación y el aumento de la pluviosidad al final del Dryas III (15.000-5.000 BP), coincidiendo con la colonización Neolítica y la subsiguiente deforestación y un aumento de la precipitación (5.000-3.000 BP), en la segunda mitad del periodo 3.000-200 BP, especialmente los siglos XVI-XVIII, fase en la que la actividad de los astilleros implicó una importante tala de

bosques de la región y, por último, en el siglo XIX coincidiendo con el final de la Pequeña Edad de Hielo y con un aumento de la precipitación y una mayor intervención humana. En los Pirineos varias de estas fases también han sido observadas (Moya *et al*. 1997).

12.B.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Basándonos en los escenarios previstos para la Península Ibérica (ver Capítulo 1), cuatro aspectos se han tenido en cuenta en relación a las consecuencias del cambio climático sobre la estabilidad de las laderas: (a) un aumento de la precipitación invernal en la Cornisa Cantábrica y cuenca norte del río Duero; (b) reducción de la precipitación en términos absolutos y posible aumento de la irregularidad de las precipitaciones en el arco mediterráneo; (c) ascenso moderado del nivel del mar; y (d) aumento de las temperaturas con el consiguiente desplazamiento altitudinal de la vegetación.

En lo relativo a aludes de nieve, el trabajo de Glazovskaya (1998) pronostica que la innivación y la actividad de aludes en la Península Ibérica no sufrirán cambios en el futuro, pero pone de manifiesto la necesidad de estudios más precisos, en un contexto regional mejor delimitado en relación a esta temática.

12.B.3.1. Cambios esperables en la aparición de nuevas roturas según la tipología de los movimientos

No se espera la aparición de nuevas roturas de grandes dimensiones debido a la ausencia de largos episodios húmedos y porque el ascenso del nivel del mar será un factor que reduce las posibilidades de encajamiento de la red fluvial. Sólo en las cordilleras Béticas las crecidas torrenciales pueden favorecer la formación de nuevas roturas, por socavación lateral, en las laderas constituidas mayoritariamente por pizarras. Existe gran incertidumbre sobre el aumento de las lluvias torrenciales. Christensen y Christensen (2003) prevén un incremento en la frecuencia de lluvias torrenciales durante los meses de verano en Europa, aunque los resultados en la Peninsula Iberica tienen un alto grado de incertidumbre. Otros autores (ver Capítulo 1), por el contrario, consideran que no se alteraría significativamente el grado de torrencialidad de las precipitaciones. De todos modos, es de esperar el aumento de deslizamientos superficiales, corrientes de derrubios y desprendimientos debido a las alteraciones de origen antrópico y a una menor protección de las laderas por la vegetación que tendrá unas condiciones climáticas más adversas para su desarrollo y se verá afectada por el aumento de los incendios. La substitución de las especies vegetales favorece las roturas especialmente en aquellas zonas en las que la vegetación autóctona es substituida por otra con raíces más superficiales y que proporciona una menor sujeción de la formación superficial. En la Comarca de los Serranos (Valencia), se ha observado que el umbral de lluvias capaces de producir de las roturas ha disminuido después de varios incendios (Izquierdo y Abad 1997).

El aumento de la temperatura en las cordilleras alpinas favorecerá del aumento de los desprendimientos en las cotas más elevadas que, en la actualidad, están protegidas de los contrastes térmicos por la presencia de un manto nival prácticamente desde el mes de diciembre hasta mayo. La fusión del permafrost puede incrementar las corrientes de derrubios. Aunque no se dispone de datos sobre la distribución actual del permafrost, su extensión es, en el mejor de los casos, muy reducida y restringida a las cotas más elevadas de la cordillera Pirenaico-Cantábrica y de las Béticas. Finalmente, en las costas rocosas, el ascenso del nivel del mar favorecerá la erosión, descalce y rotura de los acantilados constituidos por formaciones pétreas débiles (flysch, arcillas y areniscas, lavas y piroclastos, etc.). En el siglo XXI, sin embargo, las últimas previsiones reducen dicho ascenso a apenas algunos decímetros (Sánchez-Arcilla *et al*. 2004), lo que limitará la aparición de nuevas roturas.

Para aludes de nieve, el Informe sobre el cambio climático en Cataluña, elaborado por el *Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de la Generalitat de Catalunya,* pronostica que el aumento de la temperatura provocará un desplazamiento altitudinal en la posición del manto nivoso en el Pirineo que se situaría por encima de los 2000 m y disminuiría su superficie total. En consecuencia podríamos interpretar una disminución del área expuesta a aludes. El mismo informe advierte que, en base a algunos estudios globales sobre predicción de precipitación, es esperable, en nuestras latitudes, una disminución de los días de precipitación pero un incremento de la precipitación global, lo que implicaría un aumento en la intensidad de los eventos. En relación a la tipología de aludes, sería esperable una mayor frecuencia de los aludes de fusión y, eventualmente de los aludes tipo *slush flow.* De todas maneras es necesario recabar muchos más datos de actividad y tipos de aludes en todas las cordilleras españolas, antes de anticipar cualquier pronóstico.

12.B.3.2. Cambios esperables en magnitud y frecuencia de las reactivaciones según los diversos tipos de movimientos

La consecuencia inmediata de una mayor frecuencia de las precipitaciones intensas será el aumento de los deslizamientos superficiales, corrientes de derrubios y desprendimientos rocosos. A medio-largo plazo, sin embargo, el ritmo de aparición de roturas está limitado también por la disponibilidad de material movilizable en la ladera (Marqués *et al*. 2001). Dos sucesos lluviosos de gran intensidad muy próximos entre sí pueden producir resultados dispares. El primer suceso puede arrastrar grandes cantidades de coluvión y suelos meteorizados de las laderas más susceptibles. Las laderas que han sido purgadas no producirán nuevas roturas por falta de material. El relleno de las hondonadas con nuevo material y la meteorización puede requerir varios decenios.

El aumento de las precipitaciones invernales en la Cordillera Cantábrica y extremo septentrional de la cuenca del Duero, favorecerá la reactivación de algunos grandes deslizamientos rotacionales y coladas de tierra, especialmente si el aumento de las precipitaciones se acompaña de crecidas fluviales capaces de proseguir la acción erosiva de los meandros en las márgenes fluviales. En el resto de la península la pérdida de lluvia estacional e interanual hará que algunos grandes movimientos pasen a la consideración de latentes. Las excepciones se encontrarán en los grandes deslizamientos asociados a condiciones geológicas particulares como los deslizamientos alimentados por formaciones kársticas de gran extensión y que aportan a los mismos una cantidad extraordinaria de agua en caso de aguaceros intensos (Pont de Bar, La Coma y Gòsol en Lleida o Intza en Navarra) o los situados en las márgenes de los ríos y barrancos que experimenten crecidas extraordinarias.

Los deslizamientos relictos, parcialmente desmantelados y desconectados de la red de drenaje actual como ocurre con los más antiguos (Plioceno Superior- Pleistoceno Medio) de la Depresión de Tirajana (Lomoschitz *et al*. 2002) tiene muy pocas posibilidades de reactivación.

12.B.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Como consecuencia de lo indicado en los apartados anteriores, los grandes deslizamientos de la Cordillera cantábrica son los más susceptibles a experimentar reactivaciones, especialmente en los valles del Pas, Besaya, Magdalena-Pas y Miera, en los que existen concentraciones de deslizamientos y coladas de tierra de grandes dimensiones. En el resto de cordilleras las reactivaciones de grandes movimientos solo tendrán lugar en contextos particulares (zonas de alimentación extraordinaria de agua subterránea, zonas de erosión fluvial).

Si las lluvias torrenciales se hacen más frecuentes, el aumento de los deslizamientos superficiales, corrientes de derrubios y desprendimientos tendrá lugar prácticamente en todas

las cordilleras, incluso en el ámbito cantábrico. Sin embargo, en la Cordillera Central y en el sector mediterráneo de la Ibérica y las Béticas el aumento será menor debido a la naturaleza calcárea de las formaciones rocosas y al escaso recubrimiento actual de suelos susceptibles de romper. En cambio, en la Cordillera Pirenaica y las Sierras Costeras Catalanas, por los cambios de vegetación, hay que esperar un aumento significativo.

El ascenso del nivel del mar, así como de la frecuencia de los temporales marinos dará lugar a socavación, desprendimiento y deslizamiento del terreno especialmente en cantiles rocosos constituidos por rocas blandas como las formaciones triásicas y miocenas de la costa norte de Mallorca (Banyalbúfar, Valldemossa), costa Cantábrica (flysch de Zumaya, triásico de Asturias), apilamientos lávicos de las Islas Canarias y, en menor medida, los macizos rocosos fracturados Costa Brava y Costa del Sol.

12.B.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

El impacto por el incremento de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios puede mitigarse, en parte, mediante políticas de reforestación de laderas y mantenimiento de especies mejor adaptadas a las condiciones del entorno. El crecimiento de las masas boscosas es también un elemento netamente sostenible para la protección contra los desprendimientos rocosos (bosque de protección). Por todo ello, las políticas de reforestación y lucha contra los incendios forestales deberán ser primadas en el futuro.

La mejor herramienta adaptativa es la confección de planes urbanísticos y de planificación territorial que tengan en cuenta y eviten, en la medida de lo posible, el desarrollo en las áreas más susceptibles a la inestabilidad de laderas.

Las obras públicas, en especial las obras viarias y ferroviarias, deberán tener en cuenta procedimientos constructivos para evitar la reactivación de los grandes deslizamientos. Para ello se dispone de un amplio abanico de soluciones que van desde la minimización de los desmontes a excavar, reducción de sobrecargas en las laderas (terraplenes ligeros), obras de contención (muros y sistemas de anclaje) y sobre todo de drenaje.

Difícilmente van a poder abordarse medidas de protección contra la erosión y descalce de los acantilados costeros excepto para casos puntuales muy justificados en los que las citadas medidas sean económicamente viables. Del mismo modo, sólo aquellos grandes deslizamientos que tengan propiedades e infraestructuras de valor podrán ser objeto de corrección y contención.

12.B.6 REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

Desde el punto de vista socioeconómico, tanto el aumento de las cotas de innivación como del desplazamiento de la innivación hacia la primavera, causará pérdidas en el turismo invernal durante el inicio del invierno (período de navidades y año nuevo).

Los ríos que nacen en cuencas altimontanas podrían ver afectados sus regímenes hidrológicos debido al retardo del período de fusión nival mientras que el posible incremento de la carga de sedimentos en suspensión puede acelerar el proceso de colmatación de los embalses, reduciendo su capacidad y con las consiguientes implicaciones en la producción de energía hidráulica y en la garantía de abastecimiento.

12.B.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

La previsión del comportamiento futuro de las laderas está basada en los distintos escenarios contemplados en los modelos de cambio climático disponibles. Estos escenarios presentan hoy en día grandes incertidumbres en lo que se refiere tanto a la distribución areal como a la frecuencia de las precipitaciones irregulares de la Península Ibérica. En este sentido, a pesar que el aumento de la temperatura del mar debería favorecer las perturbaciones en el ámbito mediterráneo, no puede afirmarse que los aguaceros torrenciales vayan a ser más frecuentes aunque algunos estudios en los Alpes lo pretendan (Bader y Kunz 1998). Por otro lado, las predicciones de aumento de la temperatura y las precipitaciones en la Cordillera Cantábrica no se corresponden con las respuestas de los deslizamientos en el pasado. En efecto, en la figura 12.B.4 se observa que las fases de mayor temperatura durante el periodo Holoceno han ido acompañadas de una reducción de las precipitaciones y de la actividad de los grandes deslizamientos. Por todo ello, a medida que los modelos climáticos permitan una mejor definición del régimen de precipitaciones en la Península Ibérica, habrá que confirmar las conclusiones del presente capítulo.

Existen todavía importantes incertidumbres sobre la respuesta frente a los episodios de lluvia tanto de los grandes como los pequeños deslizamientos. A pesar de que en la literatura científica se han propuesto diversos umbrales de lluvia para desencadenar deslizamientos superficiales, éstos varían enormemente dependiendo de las condiciones geológicas, morfológicas y climáticas de cada región. En España se han definido umbrales de lluvia crítica en el Pirineo Oriental pero falta establecerlos en el resto del territorio. Por otro lado, se desconoce la respuesta de hidrológica de la mayoría de grandes deslizamientos activos o latentes distribuidos por las principales cordilleras.

12.B.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

La detección del cambio está relacionada con el aumento de la frecuencia, según el tipo de movimiento, de las primeras roturas y reactivaciones.

En el ámbito mediterráneo el cambio vendrá indicado por el aumento de la frecuencia de lluvias de gran intensidad y, en consecuencia, del número de corrientes de derrubios y deslizamientos superficiales. El aumento experimentado de estos mecanismos en los últimos veinte años puede deberse a este motivo, sin olvidar que ahora existe un mayor conocimiento e interés sobre estos fenómenos y antes podían pasar desapercibidos.

El incremento de la frecuencia de reactivaciones invernales de las coladas de tierra y grandes deslizamientos así como la de los temporales marítimos y los fenómenos de inestabilidad en los acantilados sensibles serían también indicadores del cambio.

12.B.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

12.B.9.1. Políticas ambientales

El incremento de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios como consecuencia de la mayor irregularidad de las precipitaciones supone el aporte directo a los cauces del material movilizado y la erosión de los escarpes de deslizamiento constituidos por coluviones y formaciones arcillosas. Como consecuencia se producirá un aumento significativo de la materia sólida en suspensión en los cauces con una reducción de su calidad y la posibilidad que se produzcan aterramientos en embalses situados aguas abajo. Por ejemplo, en el área de Vallcebre con importantes campos de badlands proporciona el 13% de la carga de sedimento en suspensión de la cuenca alta del río Llobregat mientras que su área apenas ocupa del 4%.

De esta cuenca, el 50% de la carga sólida es proporcionada por los badlands que ocupan el 3,7% de la superficie y un 32% de la carga es debida a la erosión de escombreras que ocupan el 4% de la superficie. La erosión media anual es de 1000 Tn/km^2/año (Balasch 1986; Clotet y Gallart 1983). En esta cuenca, el volumen de los deslizamientos es 20 veces el volumen de sedimento exportado anualmente de la cuenca mientras que el gran deslizamiento de Vallcebre supone unas 500 veces.

Los aludes de nieve de grandes dimensiones producen destrucción de la masa forestal en amplios sectores del Pirineo. A modo de ejemplo, en período comprendido entre los días 5 al 8 de febrero de 1996, en el Parque Nacional de Aigüestortes y Estany de Sant Maurici se contabilizaron 30 grandes aludes con daños en el bosque, los cuales destruyeron un total estimado de 97 hectáreas de masa forestal. Una disminución del número y magnitud de los aludes influiría en la expansión de la masa arbórea.

12.B.9.2. Políticas relacionadas con la gestión del riesgo

A nivel general es imprescindible disponer de un inventario completo y actualizado de las zonas inestables. Asimismo es imprescindible realizar cartografías de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo de las zonas más sensibles, en especial aquellas habitadas o sujetas a mayor presión de desarrollo.

Es imprescindible evitar que instalaciones sensibles (escuelas, hospitales, etc) así como instalaciones peligrosas se sitúen en las áreas susceptibles a sufrir roturas o reactivaciones.

En algunos grandes deslizamientos que se encuentran habitados deberían desarrollarse estrategias de prevención y mitigación del riesgo. Por un lado y si es viable, la realización de trabajos de protección y contención. Si ello no es posible, hay que establecer dispositivos de alerta temprana y protocolos de evacuación en caso de emergencia.

12.B.9.3. Políticas de infraestructura y obras

Las grandes obras de infraestructura (autopistas, ferrocarril,..) deben estar diseñadas con extremo cuidado para no atravesar las zonas potencialmente inestables. Las infraestructuras cuya rotura pueden provocar importantes impactos ambientales (i.e. oleoductos) también deberían evitar las zonas conflictivas o ser diseñadas adecuadamente.

Desde el punto de vista socioeconómico, tanto el aumento de las cotas de innivación como del desplazamiento de la innivación hacia la primavera, podría suponer pérdidas en el turismo invernal durante el inicio del invierno (período de navidades y año nuevo), como ya se observa en los Alpes suizos. También los ríos que nacen en cuencas altimontanas podrían ver afectados sus regímenes hidrológicos debido al retardo del período de fusión nival.

12.B.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

12.B.10.1. Respuesta de los distintos tipos de movimientos de ladera a la variabilidad climática actual en diferentes regiones de España. Modelos de comportamiento

Es imprescindible disponer de un inventario de los deslizamientos actualmente en actividad, latentes, durmientes, relictos, estabilizados etc. Este inventario debería considerar también los grandes deslizamientos en situaciones geológicas particulares.

La relación lluvia-deslizamientos es muy dependiente de las condiciones geológicas locales y condiciones climáticas regionales. Es preciso definir umbrales de lluvias desencadenantes de deslizamientos para distintas regiones y tipologías de roturas.

En lo que se refiere a aludes de nieve, es indispensable consolidar estrategia preventivas para mitigar el riesgo (Vilaplana 2001). Para ello, es básico elaborar un cadastro general de los aludes de España (Martí *et al*. 1995, Ferrer *et al*.,2000) que aborde dos frentes: la cartografía y caracterización de las zonas de aludes en todo el territorio expuesto, y el establecimiento de una base de datos nivometeorológica y de aludes alimentada por una red de estaciones de montaña.

12.B.10.2. Respuesta de movimientos de ladera a la variabilidad climática del pasado en diferentes regiones de España

El comportamiento futuro de los deslizamientos puede predecirse, en parte, gracias a la observación de la respuesta de las laderas en el pasado. Es necesario completar series históricas y prehistóricas de roturas y reactivaciones. Esta labor requiere además una mejora de las técnicas de reconstrucción de series de deslizamientos antiguos y un mejor análisis de la relación con las situaciones climáticas (eventos lluviosos extremos, eventos lluviosos persistentes).

12.B.10.3. “Downscaling” de las situaciones previstas por los modelos de cambio climático

La inestabilidad de laderas aunque en algunas ocasiones tenga lugar de una manera generalizada en una región, es un fenómeno local dependiente de la cantidad de lluvia recogida en su entorno más próximo. Por este motivo, las predicciones de los modelos de circulación global tienen que precisar las precipitaciones a escala de detalle. El análisis de aguaceros de las últimas décadas muestra que las variaciones de la precipitación en áreas de montaña, donde tienen lugar la mayoría de roturas, son significativas.

12.B.10.4. Mejora de los modelos hidrológicos y mecánicos de los movimientos de ladera para reproducir los efectos del cambio climático

En grandes deslizamientos se ha podido comprobar que no pueden establecerse relaciones sencillas entre pluviosidad y actividad de los deslizamientos. Recientemente se han desarrollado diversos modelos hidrológicos y mecánicos que permiten abordar el comportamiento de los deslizamientos complejos con diversidad de materiales y propiedades hidrógico-mecánicas, cuando se conocen bien las condiciones climáticas y geomecánicas (Laloui *et al*. 2004). Son precisamente los grandes deslizamientos los que suponen una mayor amenaza en caso de reactivación. Por este motivo, es necesario mejorar los modelos existentes con la ayuda de datos de auscultación y de investigación por sondeos profundos de los deslizamientos. De este modo, podrían validarse las hipótesis y la capacidad predictiva de las herramientas.

12.B.11. BIBLIOGRAFÍA

Ablay G.J. y Hürlimann 2000. Evolution of the north flank of Tenerife by recurrent giant landslides. J. Volcanol. Geotherm. Res. 103: 135-159.

Alonso E. y Lloret A. 1988. Estabilidad de laderas en arcillas terciarias de la Depresión del bierzo. II Simposio sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. Pgs. 89-100.

Ancochea E., Fuster J.M., Ibarrola E., Cendrero A., Coello J., Hernán F., Cantagrel J. y Jamond C. 1990. Volcanic evolution of the island of Tenerife (Canary Islands) in the light of the new K-Ar data. J. Vocanol. Geotherm. Res. 44: 231-249.

Andreu F.J. y Martínez-Alegría R. 1984. Aspectos geológicos incidentes en la construcción de oleoductos y gasoductos. Experiencia en el sur de la Península Ibérica. Actas I Congreso Español de Geología. Segovia. Vol. 3: 387-399.

Araña V., Badiola E.R., Berga L., Carracedo J.C., Cendrero A., Coello J., Corominas J.,Dabrio C., Díaz de Terán J.R., Durán J.J., Elízaga E., Ferrer M., García M., Garzón M.G., Goy J. L., López J., Martínez-Goytre J. Mezcua J., de la Nuez J., Salinas J.L., Soler V., del Val J., y Zazo C. 1992. Riesgos geológicos en España. Estado de la cuestión. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología. Tomo 2. pgs. 671-745.

Ayala-Carcedo F.J. 1994. Socioeconomic impacts and vulnerability resulting from slope movements. En J. Corominas y K. Georgakakos (eds.). U.S.-Spain workshop on Natural Hazards. Iowa University. pp. 235-254.

Ayala-Carcedo F.J., Elízaga E. y González de Vallejo L.I. 1987. Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España. Serie Geología Ambiental. IGME. Madrid 91 pp. + mapas.

Bader S. Kunz P. 1998. Klimarisiken – Herausforderung f[r die Schweiz. Programmleitung NFP31. V/d/f Hochschulverlag AG Zürich.

Balasch J.C. 1986. La conca de Vallcebre (Alt Llobregat). Anàlisi de la dinàmica geomorfològica contemporània i balanç previ de sediments. Tesina de Grado. Facultad de Geologia. Universidad de Barcelona. Inédito.

Berganza F. y Modrano R. 1978. The instability phenomenon of the banks of the river Duero in its passage through Aranda (Burgos) in Tertiary soils. III International Congres IAEG. Sect. I(1). Madrid: 197-208.

Berrisford M.S. y Matthews J.A. 1997. Phases of enhanced mass movement and climatic variation during the Holocene: a synthesis. Palaeoclimate Research 19: 409-440.

Bordonau J. y Vilaplana J.M. 1987. Movimientos de masa actividad antrópica y riesgo geológico: El Papiol (Baix Llobregat) un ejemplo. Comunicaciones III Reunión Nacional Geol. Ambiental y Ordenación del Territorio. Valencia. Vol. 2: 1003-1019.

Bravo T. 1962. El arco de las Cañadas y sus dependencias. Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural (Geología) 60: 93-108.

Brocal J. 1984. Obras hidráulicas realizadas en el valle de Arán y Alto Ribagorzana. Jornadas sobre inestabilidad de laderas en el Pirineo. Barcelona. I.3.1-I.3.11.

Bru J., Julià R. y Marquès M.A. 1984a. El movimiento de masa de Pont de Bar. Dinámica geomorfológica. Jornadas sobre inestabilidad de laderas en el Pirineo. Barcelona. I.2.1-I.2.10.

Bru J., Serrat D. y Vilaplana J.M. 1984b. La dinámica de la cuenca del Torrent de Jou-La Guigueta. Jornadas sobre inestabilidad de laderas en el Pirineo. Barcelona. I.2.1-I.2.10.

Brunsden D. e Ibsen M.L. 1994. The temporal causes of landslides on the south coast of Great Britain. En: Casale R., Fantechi R. y Flageollet J.C. (eds.). Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community. Final Report. Uropean Commission-Epoch Programme. Vol. 1: 339-383.

Bull W.B., King J., Kong F., Moutoux T. y Philips W.M. 1994. Lichen dating of coseismic landslide hazards in alpine mountains. Geomorphology 10: 253-264.

Carracedo J.C., Day S.J., Guillou H., y Torrado F.J.P. 1999. Giant Quaternay landslides in the evolution of La Palma and El Hierro Canary Islands. Journal Volcanol. Geotherm. Res. 94: 169-190.

Cendrero A. 2003. De la comprensión de la historia de la tierra al análisis y predicción de las interacciones entre seres humanos y medio naturalReal Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales Madrid. 98p.

Cendrero A. V. Rivas J. y Remondo. 2004 (en prensa)**.** Influencia humana sobre los procesos geológicos superficiales, consecuencias ambientales. En. Incidencia de la especie

humana sobre la Tierra. J.M. Naredo (ed.). Colección Economía y Naturaleza Fundación César Manrique Lanzarote.

Chacón J. y López A. 1988. El deslizamiento de Olivares (Moclín Granada): geología composición morfología y evolución dinámica durante los 15 primeros meses de su inicio (12-4-86). II Simposio sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. pp. 723-739.

Chacón J. y Soria F. J. 1992. Inventario y caracterización de movimientos de ladera en la vertiente septentrional de Sierra Nevada. III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. La Coruña. Vol. 1: 149 -160.

Chacón J., El Hamdouni R., Arroyo J.M., Irigaray C. y Fernández T. 2001. Slope instability in the north-eastern sector of the Granada basin (Spain): events following recent rainfall (1995-1998). En C. Sáenz de Galdeano A. Peláez y A.C. López Garrido. La Cuenca de Granada: Estructura Tectónica Activa Sismicidad Geomorfología y Dataciones Existentes. CSIC-Universidad de Granada. pp. 189-197.

Chacón J., Irigaray C., Fernández T. y El Hamdouni R. 2003. Susceptibilidad a los movimientos de ladera del Sector Central de la Cordillera Bética. En: F.J. Ayala y J. Corominas (eds.) Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España. IGME Madrid: 83-96.

Christensen J.H. y O.B. Christensen. 2003. Severe Summer Flooding in Europe Nature 421 805-806.

Clotet N. y Gallart F. 1983 Sediment yield in a mountainous basin under high Mediterranean climate. Zeitschrift für Geomophologie.

Corominas J. 1985. Els riscos geològics. A Història Natural del Països Catalans. Volum 3. Recursos Geològics i sòls. Fundació Enciclopèdia Catalana. Barcelona: 225-270.

Corominas J. 1989. Litologías inestables. Monografía nº 3. Sociedad Española de Geomorfología. Zaragoza: 81-96.

Corominas J. 1993. Landslide occurrence a review of the Spanish experience. U.S.-Spain Workshop on Naturals Hazards Barcelona: 175-194.

Corominas J. 2000. Landslides and Climate. In E.N. Bromhead (ed.). VIII International Symposium on Landslides Cardiff UK Keynote lectures CD_ROM 2000.

Corominas J. y Alonso E. 1984. Inestabilidad de laderas en el Pirineo catalán. Tipología y Causas. Jornadas sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo. Barcelona. C.1-C.53.

Corominas J. y Alonso E.E. Geomorphological effects of extreme floods (November 1982) in the southern Pyrenees In Hydrology in mountainous regions. IAHS 1990 Publ. 194: 295-302.

Corominas J. y Moya J. 1999. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin Eastern Pyrenees Spain. Geomorphology 30: 79-93.

Corominas J., Moya J., Ledesma A., Rius J., Gili J.A. y Lloret A. 1999. Monitoring of the Vallcebre landslide Eastern Pyrenees Spain. Proceedings Intern. Symp. on Slope Stability Engineering: IS-Shikoku'99. Matsuyama. Japan 2. pgs. 1239-1244.

Corominas J., Moya J. y Hürlimann M. 2002. Landslide rainfall triggers in the Spanish Eastern Pyrenees. Proceedings 4th EGS Conference on Mediterranean Storms. Mallorca. CD-ROM.

Corominas J., Moya J., Masachs I., Baeza C. y Hürlimann M. 2004. Identificación de episodios de reactivación en grandes deslizamientos pirenaicos mediante técnicas dendrocronológicas. VIII Reunión Nacional de Geomorfología. Todelo (en prensa).

Crozier M. 1991. Determination of palaeoseismicity from landslides. 6th International Symposium on Landslides. Christchurch. Bell (Ed.). A.A. Balkema Rotterdam. Vol. 2: 1173-1180.

De Castro M., Martín-Vide J. y Alonso S. 2004. El clima de España: pasado presente y escenarios de clima para el siglo 21. Evaluación de los Impactos del Cambio Climático en España (ECCE).

Domínguez M.J. 2003. Geomorfología e inestabilidad de laderas en la cuenca carbonífera central (valle del Nalón Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno. Tesis Doctoral inédita. Universidad de Oviedo. 221 pgs. + anejos

Domínguez M.J., Jiménez M., y Rodríguez A. 1999. Press archives as temporal records of landslides in the North of Spain: relationships between rainfall and instability slope events. Geomorphology 30: 125-132.

Eisbacher G. H. y Clague J.J. 1984. Destructive mass movements in high mountains: hazard and management. Geological Survey of Canada Paper 84-16: 230 pgs.

El Hamdouni R. 2001. Estudio de los movimientos de ladera en la cuenca del rí Ízbor mediante un SIG: contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 429 pgs. + 8 mapas.

Fernández T., Brabb E., Delgado F., Martín-Algarra A., Irigaray C., Estévez A. y Chacón J. 1997a. Rasgos geológicos y movimientos de ladera en el sector Izbor-Velez Benaudalla de la cuenca del río Guadalfeo (Granada). IV Simposio Taludes y laderas inestables. Granada. Vol. 2: 795-808.

Fernández-Montero A. y García-Yagüe A. 1984. Movimientos de ladera en el curso alto del río Pas (Cantabria). Actas I Congreso Español de Geología. Segovia. Vol. 3: 423-430.

Ferrer M. y Ayala F.J. 1997. Relaciones entre desencadenamiento de movimientos y condiciones meteorológicas para algunos deslizamientos en España. IV Simposio Taludes y Laderas. Granada. Vol. 1: 185-197.

Ferrer M., López J.M., Mateos R., Morales R. y Rodríguez A. 1997. Análisis y estimación del riesgo de desprendimientos rocososo en la cala de Banylabufar (Mallorca). IV Simposio Taludes y Laderas. Granada. Vol. 1: 365-376.

Ferrer P., Furdada G., Vilaplana J.M., 2000. Organización e Informatización del Catastro de aludes de Andorra. Geotemas. Vol. 1: 173 - 176.

Fleta J. 1988. Litología y deslizamientos en la cuenca alta del río Ter. II Simposio sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. pgs. 31-40.

Furdada G. , Oller P., Martínez P., Vilaplana J.M. 1999. Slushflows at the El Port del Comte (Northeast Spain). Journal of Glaciology. Vol.45 151:555-558.

Gallart F. and Clotet N. 1988. Some aspects of the geomorphic process triggered by an extreme rainfall event: the November 1982 flood in the Eastern Pyrenees. Catena Suppl. 13:75-95.

García-Yagüe A. y García-Álvarez J. 1988. Grandes deslizamientos españoles. II Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables. Andorra la Vella. pgs. 599-612.

Glazovskaya T.G. 1998. Global distribution of snow avalanches and changing activity in the northern hemisphere. Annals of glaciology 26: 337-342.

González B., Recchi C., Oliveros M.A. y Ortuño L. 1997. Adaptación de dos proyectos de carreteras a las condiciones geológico-geotécnicas reales deducidas de la experiencia en tramos cercanos. IV Simposio Taludes y laderas inestables. Granada. Vol. 1: 157-169.

González-Díez A. 1995. Cartografía de movimientos de ladera y su aplicación al análisis del desarrollo temporal de los mismos y de la evolución del paisaje. Tesis Doctoral inédita. Universidad de Oviedo. 415 pp. + anejos.

González-Díez A., Salas L., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 1996. Late Quaternary climate changes and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region Spain. Geomorphology 15: 291-309.

González-Díez A., Remondo J., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 1999. A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. Geomorphology 30: 95-113.

González-Villarías F.J. 2001. Estudio de estabilidad del acantilado de Rebolleres y Sequiro (Candas-Asturias). IV Simposio Taludes y laderas inestables. Granada. Vol. 1: 267-284.

Grove J.M. 1972. The incidence of landslides avalanches and floods in Western Norway during the Little Ice Age. Artic and Alpine Research 4: 131-138.

Gutiérrez F., Arauzo T. y Desir G. 1994. Deslizamientos en el escarpe en yesos de Alfajarín (Zaragoza). Cuaternario y Geomorfología 8: 57-68.

Hürlimann M., Ledesma A. y Martí J. 1999. Conditions favouring catastrophic landslides on Tenerife (Canary Islands). Terra Nova 11: 106-111.

Irigaray C. 1995. Movimientos de ladera : Inventario análisis y cartografía de susceptibilidad

mediante un G.I.S. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga España). Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

Irigaray C. y Chacón J. 1991. Los movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga). Revista. Sociedad Geológica de España 4: 203-214.

Izquierdo F. y Abad P. 1997. Inestabilidades de laderas en la Comarca de los Serranos (Valencia). Efectos de la pluviometría y de los incendios forestales. IV Simposio Taludes y laderas inestables. Granada. Vol. 1: 227-237.

Janbu N., Nestvold J. y Grande L. 1995. Winter slides-A new trend in Norway. Proceedings 6th International Symposium on Landslides. Christchurch. New Zealand. Vol. 3: 1581-1586.

Jiménez M. 1997. Movimientos en masa en la cabecera del río Nalón (Cordillera Cantábrica NO España). Cuaternario y Geomorfología 11: 3-16.

Laloui L., Tacher L., Moreni M. y Bonnard Ch. 2004. Hydro-mechanical modeling of crises of large landslides : application to the La Frasse Landslide. Proc. IXth Int. Symp. On Landslides Rio de Janeiro 1103-1110. Balkema.

Lamas F., El Hamdouni R., Fernández T., Irigaray C. y Chacón J. 1997. Influencia de las lluvias medidas entre noviembre de 1996 y marzo de 1997 en la generación de movimientos de ladera en Andalucía suroriental. IV Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 1: 213-225.

Lomoschitz A. y Corominas J. 1992. Cronología relativa de los deslizamientos de la Depresión de Tirajana (Isla de Gran Canaria). En: López Bermudez F., Conesa C. y Romero M.A. (eds.). Estudios de Geomofología en España. Vol. 2: 455-463.

Lomoschitz A., Meco J. y Corominas J. 2002. The Barranco de Tirajana basin Gran Canaria (Spain). A major erosive landform caused by large landslides. Geomorphology 42: 117-130.

López J., Carcavilla L., Chicharro E y Escalante E. 2000. Neve e valanghe in Spagna. Neve e Valanghe nº39: 6 -19.

Marquès M.A., Martín E. y Gascón M. 2001. Episodio extremo y distribución espacial de movimientos de laderas en Montserrat (Barcelona España). V Simposio Taludes y Laderas Inestables. Madrid. Vol. 3: 1315-1326.

Martí G., Oller P., Bisson B., Gavaldà J., García C. y Martínez 1995. Project of elaboration of a cadastre of avalanche paths in the Catalan Pyrenees. En ANENA-CEMAGREF (Eds.): Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige glace et avalanches. pgs. 103-108.

Martínez J.M. y García Yagüe A. 1988. Importancia de los fenómenos de laderas en el Mioceno continental: estudio del río Matayeguas. II Siposio sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. pgs 79-88.

Mateos R.M. 2001. Los movimientos de ladera en la Sierra de Tramuntana (Mallorca). Caracterización geomecánica y análisis de peligrosidad. Tesis Doctoral. Inédita. Universidad Complutense de Madrid.

Menéndez R. 1994. Geomorfología del area de Somiedo (Cordillera Cantábrica N de España). Aplicaciones de los sistemas de Información Geográfica al estudio del relieve. Tesis doctoral. Inédita. Universidad de Oviedo. 254 pgs.

Menéndez R. y Marquínez J. 2002. The influence of the environmental and lithologic factors on rockfall at a regional scale: an evaluation using GIS. Geomorphology 43: 117-136.

Monterrubio S., Yenes M., Sánchez J., Blanco J.A., Fernández B. y Santos G. 2001. Características geotécnicas de la facies Dueñas del sector central de la cuenca del Duero y sus implicaciones en la fm de grandes deslizamientos rotacionales de la zona. V Simposio Taludes y Laderas. Madrid. Vol. 1: 149-160.

Moya J. 2002. Determinación de la edad y de la periodicidad de los deslizamientos en el Prepirineo oriental. Tesis Doctoral. Inédita. Univ. Politècnica de Catalunya 248 pgs.

Moya J. y Corominas J. 1997. Condiciones pluviométricas desencadenantes de deslizamientos en el Pirineo Oriental. IV Simposio Taludes y Laderas. Granada. Vol. 1: 199-212.

Moya J., Vilaplana J.M. y Corominas J. 1997. Late Quaternary and historical landslides in the South-Eastern Pyrenees. Paleaclimate Research 19: 55-73.

Noverraz F. Bonnard Ch. Dupraz H. Huguenin L. 1998. Grands glissements de versants et climat. Rapport final PNR 31. 314p. V/d/f Hochschulverlag AG Zürich.

Palmquist R.C. y Bible G. 1980. Conceptual modelling of landslide distribution in time and space. Bulletin Association Engineering Geologists 21: 178-186.

Remondo J. 2001. Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial. Tesis Doctoral Universidad de Oviedo.

Remondo J., González-Díez A., Soto J., Díaz de Terán J.R. y Cendrero A. 2004 (enviado). Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas. Geomorphology.

Rodés P. 1999. Análisis de los accidentes por aludes de nieve en España. Una aproximación a la revisión histórica. Ediciones Ergo. Madrid. 76pp.

Rodríguez Ortiz J.M y Durán J.J.. 1988. El deslizamiento de Olivares (Granada) de abril de 1986. II Simposio sobre taludes y laderas inestables. Andorra la Vella. pgs. 681-691.

Salazar A. y Ortega L.I. 1990. Los deslizamientos en la alineación costera guipuzcoana (Sector Menditorrotz-Igueldo). Actas 1ª Reunión Nacional de Geomorfología. Teruel: 551-560.

Sánchez F.J y Soriano A. 2001. Metodología para el estudio de la estabilidad de laderas en embalse. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid. Vol. 1: 87-98

Sánchez-Arcilla A., Cendrero A. y Zazo C. 2004. Riesgo litoral. Evaluación de los Impactos del Cambio Climático en España (ECCE).

Schuster R.L., Logan R.L. y Pringle P.T. 1992. Prehistoric rock avalanches in the Olympic Mountains Washington. Science 258: 1620-1621.

Soler C. 1997. Gigantescos deslizamientos en islas volcánicas y su repercusión en la hidrogeología insular. IV Simposio Taludes y Laderas. Granada. Vol. 1: 325-337.

Starkel L. 1985. The reflection of the Holocene climatic variations in the slope and fluvial deposits and forms in the European mountains. Ecologia Mediterranea 11: 91-97.

Vilaplana J.M. y Martínez P. 1996. El riesgo de aludes en el Pirineo de Cataluña. Sexto Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio. Granada. Vol.I: 595-603.

Vilaplana J.M. 2001. La gestion spatiale du risque d'avalanches: les cas de l'Espagne et de l'Andorre. En: Bilan et perspectives de 30 ans de gestion du risque d'avalanche en France. ANENA. p. 119-124.

Watts A.B. y Masson D.G. 1995. A giant landslide on the north flank of Tenerife Canary Islands. Journal of Geophysical Research 100: 24487-24498.

12. IMPACTOS SOBRE LOS RIESGOS NATURALES DE ORIGEN CLIMÁTICO

C. RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES

José M. Moreno

Contribuyentes

E. Chuvieco, A. Cruz Treviño, E. García Díez, E. de Luis Calabuig, B. Pérez Ramos, F. Rodríguez Silva, J. San Miguel, R. Vallejo, J.A. Vega, R. Vélez Muñoz, G. Zavala

Revisores

M. Casal, C. García-Vega, C. Hernando, J.C. Mérida, J. Pausas, J. Piñol, J. Raventós, A. Vázquez

D. X. Viegas, P. H. Zedler

RESUMEN

En España se registran cada año más de 20.000 incendios forestales, que afectan a más de 150.000 ha repartidas por toda nuestra geografía. Los incendios se dan principalmente en verano y son causados por las personas, en su mayoría de forma accidental. Los incendios se ven favorecidos por vegetación inflamable y condiciones climáticas desecantes (alta temperatura, baja humedad relativa del aire, sequía). En España, los incendios han sido más numerosos bajo altas temperaturas o índices de peligro y bajas precipitaciones, siendo las situaciones anómalas extremas más importantes que las medias.

Los índices de peligro, que se basan en un número pequeño de variables meteorológicas, son buenos predictores de la ocurrencia de incendios. Los índices de peligro aumentan de Oeste y Norte a Este y Sur, y con ello la probabilidad de que los incendios sean grandes. Cuanto mayor es el peligro más alta es la variabilidad del tamaño de los incendios y ésta se hace menos predecible en función de la climatología.

Con el cambio climático aumentarán las temperaturas así como la sequedad del suelo, en particular la frecuencia de escasez de agua, lo que inducirá una mayor desecación de los combustibles vivos y muertos y, por tanto, un aumento de su inflamabilidad. Por otro lado, las aridificación de algunas áreas reducirá la acumulación de combustible.

Durante el siglo XX, el índice medio de peligro ha aumentado constantemente, y lo seguirá haciendo en el siglo XXI. Las zonas con peligro alto, la duración de éste durante el año y las situaciones extremas de peligro se incrementarán con el tiempo. Estos aumentos hacen suponer que la frecuencia de incendios aumente. Las igniciones causadas por rayos aumentarán.

El abandono de tierras marginales continuará. La vegetación más mesofítica será reemplazada por otra más xerofítica. El aumento de superficie quemada se traducirá en más vegetación de matorral. En suma, el potencial de inflamabilidad del territorio aumentará. Las zonas más vulnerables serán el Norte de España, la alta montaña o las zonas de paramera, ya que se verán expuestas a un régimen de incendios más adverso que el actual.

La revisión de la política de lucha contra incendios, la inclusión del riesgo de incendio asociado a un determinado uso, la mejora en los sistemas de vigilancia y alerta precoz, así como una mejor formación e información de la población son algunas de las opciones adaptativas para mitigar los impactos adversos. Los esquemas de gestión basados en la exclusión total del fuego deben modificarse. El fuego debe incorporarse como herramienta de gestión para reducir la peligrosidad en ciertas áreas.

El potencial productivo del sector forestal disminuirá, así como el riesgo de pérdida de suelo y de biodiversidad. El uso residencial del monte se verá afectado. Desconocemos cómo cambiará el número de igniciones, el papel del paisaje en determinar la superficie quemada, el riesgo asociado al uso recreativo del territorio y la importancia de procesos que aumenten la necromasa de la vegetación, tales como plagas o sequías.

La detección del cambio en la ocurrencia de incendios requiere mantener la base de datos EGIF de incendios forestales de España. El cambio en el régimen de incendios afectará a las políticas de lucha y prevención de incendios forestales, de conservación del suelo y desertificación, de conservación de la biodiversidad y de utilización del territorio. Las necesidades de investigación más relevantes pasan por conocer la interacción entre sequía, el peligro de incendio y la respuesta de la vegetación al fuego, además de disponer de escenarios climáticos y de vegetación con resolución espacial y temporal adecuada.

12.C.1. INTRODUCCIÓN

12.C.1.1. Antecedentes sobre clima e incendios

Los incendios forestales son uno de los factores que más influyen sobre la estructura y funcionamiento de gran parte de los ecosistemas terrestres. Estos son responsables de la emisión a la atmósfera de grandes cantidad de CO_2 y otros gases (Prentice *et al*. 2000). Actualmente, se queman más de 1000 Mha al año, mayoritariamente en las sabanas tropicales, así como en los bosques tropicales y boreales (Levine 1991). Las zonas mediterráneas y del Sur de Europa son, igualmente, áreas con una alta incidencia de incendios (Vélez 2000a).

En el pasado, la relación entre cambio climático e incendios forestales ha sido estrecha (Clark 1988, Carcaillet *et al*. 2002), de manera que han sido más frecuentes en los periodos cálidos que en los fríos. En España, la relación entre el cambio climático pasado, la vegetación y los incendios comienza a ser conocida, sobre todo a partir del Holoceno (Peñalba 1994, Goñi y Hannon 1999, Carrión y van Geel 1999, Santos *et al*. 2000). Durante este periodo la vegetación española ha sido enormemente dinámica, con cambios asociados al clima. La presencia de restos de carbón en los registros sedimentarios es intermitente. La relación entre clima e incendios puede verse bien en la reconstrucción de la Sierra de Gádor: La creciente aridificación a partir el Holoceno medio se tradujo en un aumento en la frecuencia de los eventos extremos de incendios (pasándose de picos de 300-400 años a otros de 100-200 años), así como en un cambio de la vegetación (Carrión *et al*. 2003). La irrupción del hombre supuso un incremento en la frecuencia de incendios en la mayoría de los sitios estudiados, así como una alteración de la vegetación dominante.

Aunque es común encontrar referencias históricas sobre los incendios forestales (Lloret y Mari 2001, Pausas 2004), o sobre normativas relacionadas con los mismos (Vélez 2000a), la reconstrucción del régimen de incendios de España a partir de datos históricos no ha sido posible, y menos aún de su cambio con el clima. Por otro lado, la falta de masas arbóreas viejas ha dificultado poder descifrar el grado de recurrencia de los incendios. La datación de las cicatrices de *Pinus pinaster* en Sierra Bermeja muestra que los incendios de superficie ocurrieron durante la última parte del siglo XIX y la primera del XX con elevada frecuencia (recurrencias de 11-35 años), y probablemente estuvieron ligados al pastoreo (Vega 2000).

12.C.1.2. Tendencias en el número y área quemada por los incendios en España

El número de incendios registrados en España ha aumentado durante las últimas décanas, hasta estabilizarse últimamente. La tendencia en la superficie anual quemada es diferente. Entre los años 60 y 80 la superficie quemada se multiplicó hasta alcanzar una situación como la actual, caracterizada por su enorme variabilidad anual (Fig. 12.C.1). Aunque parte de este cambio es debido al hecho de que la estadística antigua se centraba en terrenos gestionados públicamente, el hecho es que, con el tiempo, los incendios se han ido extendiendo desde unos pocos puntos hasta la práctica totalidad de la geografía española (Moreno *et al*. 1998). No obstante, existen unas cuantas áreas, localizadas en el Noroeste, Centro, Levante y Sur y Suroeste, en las que son particularmente abundantes (Fig. 12.C.2).

El origen de los incendios es mayoritariamente humano (>95%), destacando Galicia entre las regiones con mayor número de incendios intencionados. Los incendios ocasionados por rayo son poco importantes, aunque en algunas zonas lo son: en la provincia de Teruel más de la mitad de los incendios son causados por rayo, un tercio de la superficie quemada en las comunidades de Valencia, Castilla-La Mancha o Aragón entre los años 1989-1995 lo fue a causa del rayo, el rayo ha sido el causante de buena parte de los incendios mayores de 10000 ha (Vélez 2000b). Los incendios ocurren mayoritariamente en verano aunque existe cierta variabilidad a lo largo de nuestra geografía y en relación con la causa del incendio. Así,

mientras que los incendios por rayo están claramente circunscritos a esta estación, los incendios de origen humano pueden ocurrir en otros momentos del año (Fig.12.C.3).

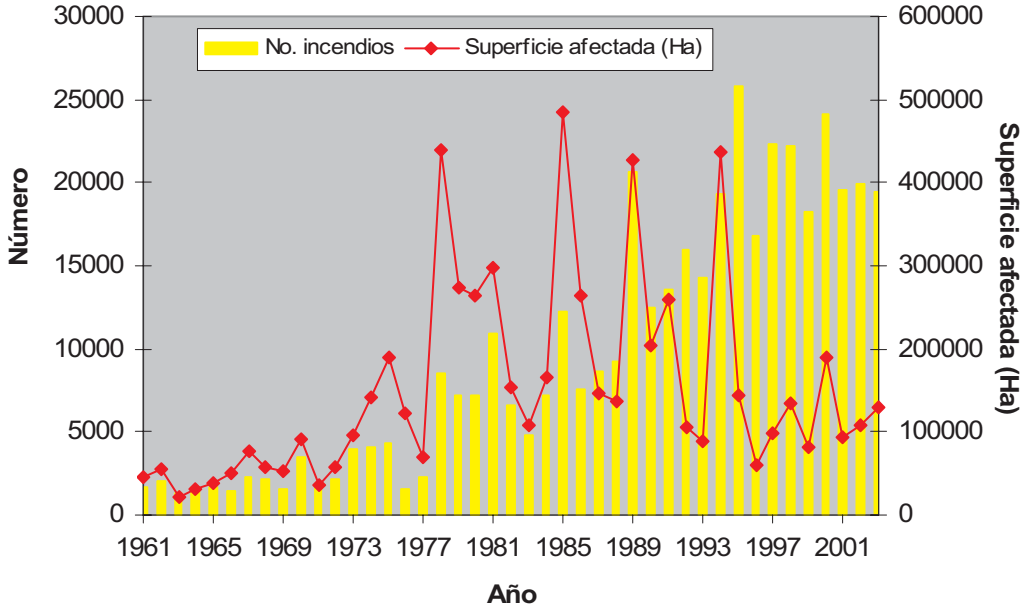


Fig. 12.C.1. *Variación anual de los incendios registrados y superficie afectada por los mismos durante las últimas décadas. Fuente: EGIF (DGB, MIMAM) y elaboración propia.*

Por otro lado, la naturaleza de lo que se quema ha ido cambiando con el tiempo: durante los últimos años se aprecia una tendencia hacia la dominancia de las superficies desarboladas en detrimento de las arboladas (Fig. 12.C.4). Entre las masas quemadas dominan las coníferas, en particular *Pinus halepensis y Pinus pinaster*. La edad media de los árboles quemados apenas alcanza los 25 años (Moreno *et al*. 1998). Entre las frondosas dominan los *Quercus* y *Eucalyptus*.

12.C.1.3. Importancia de los incendios en España

En promedio, durante los años 1991-2002 la superficie quemada anualmente fue un 0,55% de la superficie forestal. Esto es, si todo el territorio forestal se quemase por igual se necesitarían 180 años para que ardiese una vez. Esta cifra global enmascara el hecho de que hay grandes diferencias en el tiempo de recurrencia. En 100 años, algunas zonas se quemarán varias veces, mientras que otras no lo harán ninguna (Vázquez y Moreno 1998a, b). Las pérdidas que ocasionan los incendios, bien en productos primarios bien en beneficios ambientales, son cuantiosas, pudiendo superar en años particularmente malos los 400 M€ en beneficios directos y los 1000 M€ en los totales (EGIF, DGB, MIMAM). Por otra parte, los costes relacionados con la prevención, extinción y restauración de los daños son también cuantiosos. Si tomamos como ejemplo la Generalitat de Valencia, en la década de los 90 se pasó de invertir 9,34 M€, la mayor parte (77%) en extinción, a 60,77 M€ en 2000 (65% en extinción). Este aumento de casi 7 veces en extinción y de 10 veces en prevención no se corresponde con una disminución equivalente en la superficie quemada (Vega García 2003). En paralelo a las administraciones regionales, la administración central del estado invierte sumas importantes, siendo el promedio anual durante la última década de 50 M€, 35% en prevención y 65 % en extinción (DGB, MIMAM). Esto indica que la capacidad de controlar la superficie quemada tiene límites, y mayores inversiones no necesariamente suponen una mayor efectividad. En este sentido, las

políticas que ponen énfasis en los aspectos preventivos, con planes específicos de prevención por propiedad, como se hace en algunas Comunidades Autónomas, pueden ser más eficaces.

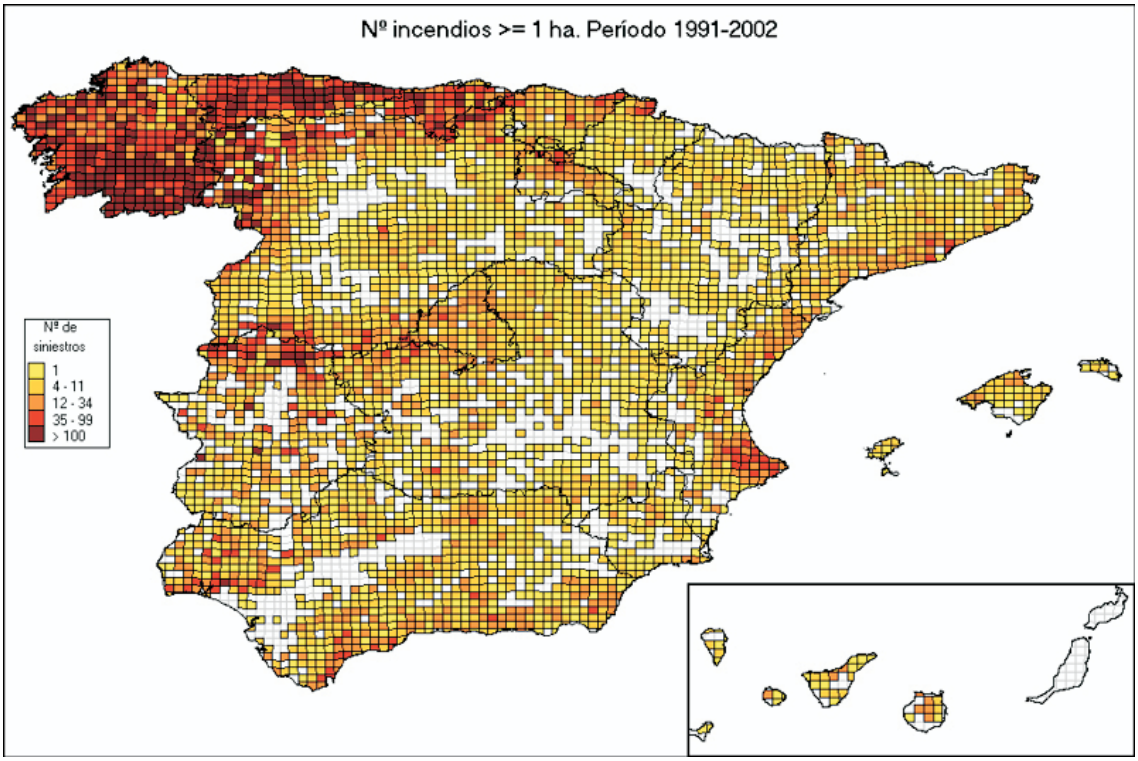


***Fig. 12.C.2**. Distribución de los incendios forestales iguales o mayores de 1 ha en España durante el periodo 1991-2002. Fuente: DGB, MIMAM.*

12.C.2 SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

12.C.2.1. Factores que controlan los incendios forestales

Clima, vegetación y combustible

El clima determina la vegetación dominante en una región (Rivas Martínez 1987) y, por tanto, la cantidad y tipos de combustible disponible para propagar el fuego. Consecuentemente, las relaciones clima-vegetación suelen ser buenas (Moreno *et al*. 1990, Fernández Palacios 1992, Gavilán y Fernández-González 1997, Ojeda *et al*. 1998). En general, en España, la vegetación madura compuesta por caducifolios domina en las zonas más lluviosas, mientras que la de perennifolios lo hace en las zonas secas. La intensa utilización de nuestro país hace que la vegetación natural madura no abunde, siendo más frecuente la vegetación natural procedente de la sucesión secundaria o de la reforestación. En muchos casos, la inflamabilidad de esta vegetación secundaria es mayor que la de la vegetación natural madura. Esto es particularmente así en el caso de que la vegetación pioneras esté dominada por especies acumuladoras de combustible fino y necromasa. Por ello, la relación entre inflamabilidad de la vegetación y clima no es simple. Durante la última parte del siglo XX, la vegetación dominante ha ido incrementado su potencial combustible como consecuencia de la menor explotación y pastoreo, el abandono de cultivos marginales y la falta de aprovechamiento de leñas (Vélez 2000a). Además, la vegetación que crece tras la quema de algunas plantaciones de coníferas o de frondosas tipo eucalipto es, con frecuencia, altamente inflamable.

Meteorología

Las variables meteorológicas que mayor papel juegan sobre el desarrollo de un incendio son la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la estabilidad de la atmósfera (Mérida 2000). En los ambientes estables y secos del verano la energía que se recibe del sol aumenta la temperatura lo que hace que disminuya la humedad relativa del aire. Ambas variables (temperatura y humedad relativa del aire) controlan el estado de hidratación de los combustibles muertos. El viento es otro elemento crítico: la velocidad de propagación del frente de llamas es directamente proporcional a la velocidad del viento. Las situaciones de mayor peligro son aquellas que vienen acompañadas de vientos fuertes y secos. Son particularmente críticos los vientos de tipo *föhn*, esto es, aquellos que se dan a sotavento de las montañas como consecuencia de la compresión adiabática del aire al descender por sus laderas (Millán *et al*. 1998), siendo los causantes de algunos de los grandes incendios de España (Gómez-Tejedor *et al*. 2000).

El incendio calienta el aire y hace que se eleve, produciendo una depresión a la que fluye aire fresco, aportando el oxígeno que mantiene la combustión. Cuando hay viento, este efecto se ve aumentado a sotavento por el flujo producido por éste. La estabilidad de los niveles bajos de la atmósfera es determinante para que el viento local originado por el incendio sea más o menos intenso. Las situaciones de inestabilidad atmosférica favorecen el movimiento vertical del aire caliente, facilitando el movimiento lateral del aire hacia el frente de llamas. Por el contrario, bajo condiciones de estabilidad los incendios son relativamente menos peligrosos. Así, con dos parámetros de la estabilidad atmosférica Díez *et al*. (2000) calcularon con alto nivel de precisión la ocurrencia diaria de incendios en Galicia. Las situaciones sinópticas que determinan los estados de la atmósfera son, por tanto, determinantes de la ocurrencia de incendios forestales (Díez *et al*. 1994). Éstas determinan el flujo atmosférico y, a través de él, el viento, la precipitación o las descargas de rayos, entre otros (Gómez-Tejedor *et al*. 2000, González-Hidalgo *et al*. 2001, Goodess y Jones 2002, García-Herrera *et al*. 2003, Muñoz-Díaz y Rodrigo 2003, Tomás *et al*. 2004). Consecuentemente, buena parte de los incendios ocurren bajo condiciones sinópticas determinadas (Bardají *et al*. 1998). Esto es similar en el resto del mundo (Da Camara *et al*. 1998, Johnson y Wowchuk 1993).

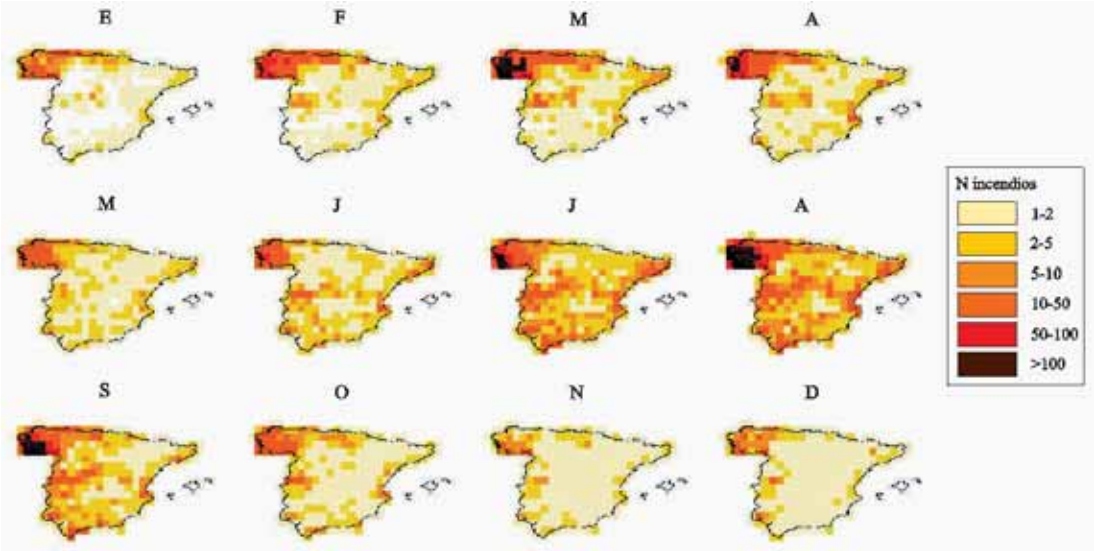


Fig. 12.C.3. *Ocurrencia de incendios en la España Peninsular en los distintos meses del año durante la década 1990-1999. (Se muestra el número medio de incendios por mes). Datos de Moreno, Zavala* y *Díaz (no publicados) según datos de EGIF (DGB, MIMAM).*

Combustibles

Humedad del combustible ligero vivo: El contenido en humedad de los combustibles finos vivos varía a lo largo del año, siendo máximo en primavera y mínimo a finales de verano. El contenido en humedad está relacionado con la fenología y disponibilidad de agua en el suelo, por lo que se relaciona bien con índices de sequía (Viegas *et al*. 2001, Castro *et al*. 2003)(Fig. 12.C.5). La relación es tal que los efectos más importantes ocurren en las fases primeras de falta de agua en el suelo. Esta relación varía según las especies. Así, el contenido de humedad de las especies pioneras suelen variar más, y está más estrechamente vinculado a la ocurrencia de lluvia que el de otras especies más tardías en la sucesión, y con acceso a agua a mayor profundidad (Moreno y Cruz 2000, Peñuelas *et al*. 2001, Viegas *et al*. 2001, Filella y Peñuelas 2003). Por tanto, el estado de los combustibles vivos depende de cuanto llueve y de cuándo llueve. Igualmente, el contenido en humedad puede variar con la edad de la planta (Baeza *et al*. 2002).

Composición química: Además del agua, la composición química de los vegetales determina su contenido energético e inflamabilidad. Las sustancias extractivas en éter (aceites esenciales, resinas, etc.) favorecen la inflamabilidad (Trabaud 1976). Las especies forestales sufren variaciones estacionales acusadas en su contenido químico (Elvira y Hernando 1989, Núñez-Regueira *et al*. 1999), haciendo que su inflamabilidad cambie también a lo largo del año (Núñez-Regueira *et al*. 2000).

Humedad del combustible ligero muerto: La humedad de los combustibles vivos se mantiene debido al transporte de agua desde el suelo, de ahí que las hojas vivas y ramas tengan contenidos de humedad relativametne altos incluso en épocas secas. Sin embargo, el contendio de los combustibles muertos fluctúa amplieamente en respuesta a las variaciones en la humedad relativadel aire, junto con la lluvia, o la radiación solar, entre los tres factores más importantes. La propagación del fuego es muy sensible al combustible ligero muerto ($\phi \leq 6$ mm), pues es el que más rápidamente se inflama al estar expuesto a un foco calorífico. Además, este combustible también es el que se ajusta más rápidamente a las condiciones meteorológicas. La humedad de los combustibles muertos en pie varía a lo largo del año, siendo más baja en verano. En atmósferas estables, la humedad relativa disminuye al aumentar la temperatura, de ahí que el contenido en humedad de estos combustibles sea máximo a primeras horas del día y mínimo al comenzar la tarde. Igualmente, el contenido en humedad de la hojarasca depende de las condiciones meteorológicas, de su exposición al sol así como del contenido en humedad del suelo. Cuanto más desecante sea la atmósfera y menor la humedad del suelo, más seca estará la hojarasca, lo que aumentará su inflamabilidad y combustibilidad, así como la de los combustibles muertos en pie (Valette 1988, Viegas 1998).

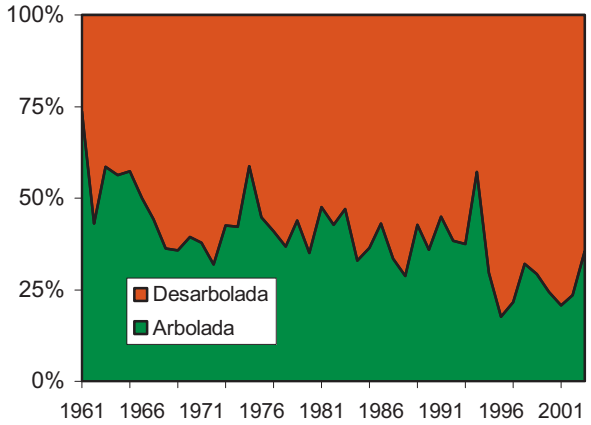


Fig. 12.C.4. *Variación a lo largo de las últimas décadas del tipo de superficie recorrida por el fuego. Fuente: Anónimo y EGIF(DGB, MIMAM) (elaboración propia).*

Topografía

La propagación del fuego aumenta con el ángulo que ofrece la superficie al frente de llamas. Por ello, la propagación a favor de pendiente es rápida y peligrosa. Los incendios no ocurren al azar, sino que son más frecuentes en ciertas posiciones topográficas (Vázquez y Moreno 2001, Lloret *et al*. 2002). Aunque la topografía no cambia, sí cambia la vegetación, sobre todo tras el fuego. Esto hace que la peligrosidad de un sitio dado varíe con el tiempo en la medida que cambie la vegetación y según las condiciones topográficas del lugar donde ésta se asiente.

El rayo como fuente de ignición

En España, la frecuencia de descargas de rayos está relacionadas con la temperatura del mar (de Pablo y Soriano 2002, Soriano y de Pablo 2002), siendo mayor cuanto más alta es aquélla. Los rayos son más frecuentes en zonas de montaña (Pirineos, Sistema Ibérico, y Sistema Central), con un gradiente de abundancia de menor (suroeste) a mayor (noreste) (Soriano *et al*. 2001a, b). La mayor frecuencia de descargas se da en verano (Ju, Jl, Ag), seguida del otoño (Se, Oc) y primavera (My). El número de descargas está relacionada con ciertos tipos sinópticos circulatorios (Tomás *et al*. 2004), siendo las situaciones ciclónicas y con flujos del Este las que mas descargas aportan. La distribución geográfica de los incendios ocasionados por los rayos es, a grandes rasgos, concordante con la distribución de estos, pero diferente de la de los incendios causados por las personas (Vázquez y Moreno 1998b).

12.C.2.2. Índices de peligro

El peligro de incendio es un medida de la probabilidad de que ocurra un incendios forestal y se basa en la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y dirección y la sequedad de los combustibles (Vélez 2000c, Viegas *et al*. 2000). Por lo tanto, los índices de peligro son medidas útiles para representar la probabilidad de un incendio en el tiempo y espacio. La representación de uno de estos índices (el Índice de Peligro Canadiense) para España durante los seis meses críticos de la estación cálida muestra cómo el peligro de incendio aumenta primero en el Centro-Oeste de España y luego se amplia hacia el Este y Centro y a lo largo de la costa conforme aumenta el verano (Fig. 12.C.6). El norte y Noroeste, debido a su clima más fresco y húmedo, se mantiene con índices de peligro bajos durante la estación de máximo peligro. Comúnmente, los días con incendio, o con incendios múltiples o de gran tamaño suelen ser más frecuentes cuanto mayores son los índices de peligro (Andrews *et al*. 2003). Consecuentemente, una mayor frecuencia de índices altos implica una mayor probabilidad de que se den ese tipo de incendios. Las posibilidades de que ocurra un gran incendio forestal se relacionan con la presencia de masas de aire inestable y con bajo contenido de humedad (Haines 1988). Acorde con lo anterior, la ocurrencia de incendios en España ha estado relacionada con la climatología, variando según zonas y fuente de ignición (Vázquez y Moreno 1993) (Fig. 12.C.7). No obstante, antes que los valores medios de una determinada variable o índice, las situaciones extremas, esto es, el número de días particularmente cálidos, o el transcurrido desde la última lluvia, parece ser crítico (Vázquez y Moreno 1993, Piñol *et al*. 1998, Pausas 2004).

Los índices de peligro están basados en el clima, pero dado que las personas pueden producir incendios en cualquier momento del año, es posible que se tengan incendios incluso en situaciones en las que el índice de peligro no sea alto. (Fig. 12.C, 6). No obstante, dado que el hombre es el principal causante de los incendios, estos pueden darse incluso en momentos del año en los que la peligrosidad general es baja. Vázquez y Moreno (1995) encontraron que la temporada de incendios, entendida como el periodo para que ocurra un 50% de los incendios que se dan en un año, o se queme una superficie similar, es mayor en el Levante que en la zona Centro, pero no que en el Noroeste. Esto se contradice con lo que cabría esperar en

función de la duranción de situaciones de alto peligro de incendio. Además, en el Noroeste los años con un mayor número de días con temperaturas altas, años en los que la superficie quemada fue mayor. No obstantte, la temporada de incendios fue más corta, no más larga. Estas relaciones estuvieron condicionadas, en parte, por la fuente de ignición, siendo los incendios intencionados los que más reflejaron este patrón. En consecuencia, la estación de peligro puede no necesariamente determinar la temporada de incendios. En aquellas zonas donde los incendios intencionados son dominantes, es el agente causante del incendio el que puede determinar la temporalidad.

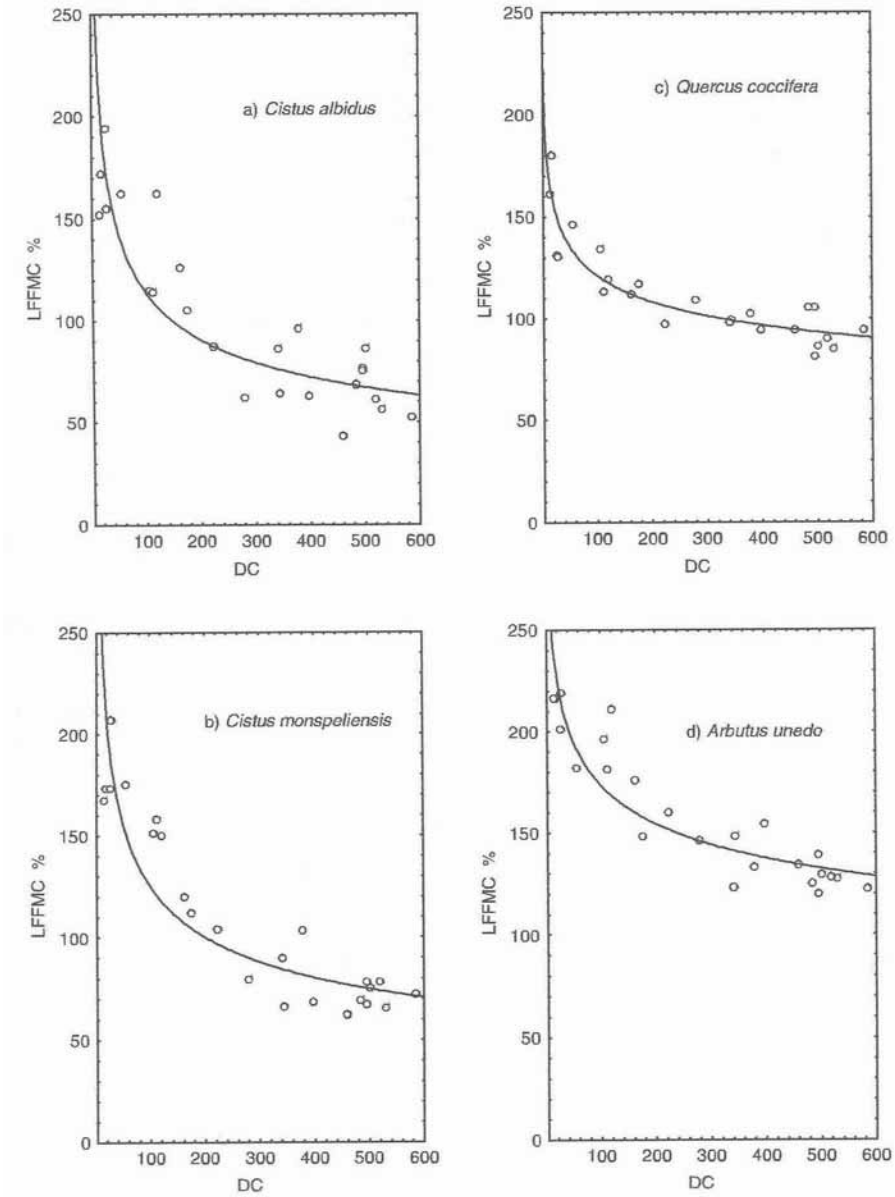


Fig. 12.C.5. *Contenido en humedad de los combustibles vivos finos (LFFMC%) en función del Índice de Sequía del Sistema Canadiense de Peligro de Incendios en Collserola (Barcelona). Nótese la diferencia entre especies más o menos pioneras. De Viegas et al. (2001).*

12.C.2.3. El tamaño de los incendios

La variabilidad meteorológica de los climas de España (ver Capítulo 1) afecta a la distribución anual del tamaño de los incendios, de manera que estos son tanto más desiguales cuanto

mayor es la variabilidad meteorológica anual. Así, en el Levante es frecuente que unos pocos incendios afecten a un elevado porcentaje de la superficie quemada durante el año. Este porcentaje es menor en el Noroeste.

La variabilidad anual de la distribución de tamaños es también mayor en el Levante que en el Noroeste. Además, el grado de predicción de de los parámetros que describen estructura de la distribución de frecuencias del tamaño de los incendios en función de la variabilidad climatológica anual es mayor (Vázquez y Moreno 1995) (Fig. 12.C.8). En otras palabras, en estas tres zonas de España analizadas aquellas con clima más variable generaron distribuciones de tamaños de los incendios más desiguales, esto es, con más peso de unos pocos incendios grandes sobre el total recorrido por el fuego en un año. Además, estas distribuciones de tamaño fueron menos predecibles en función de las variables climáticas.

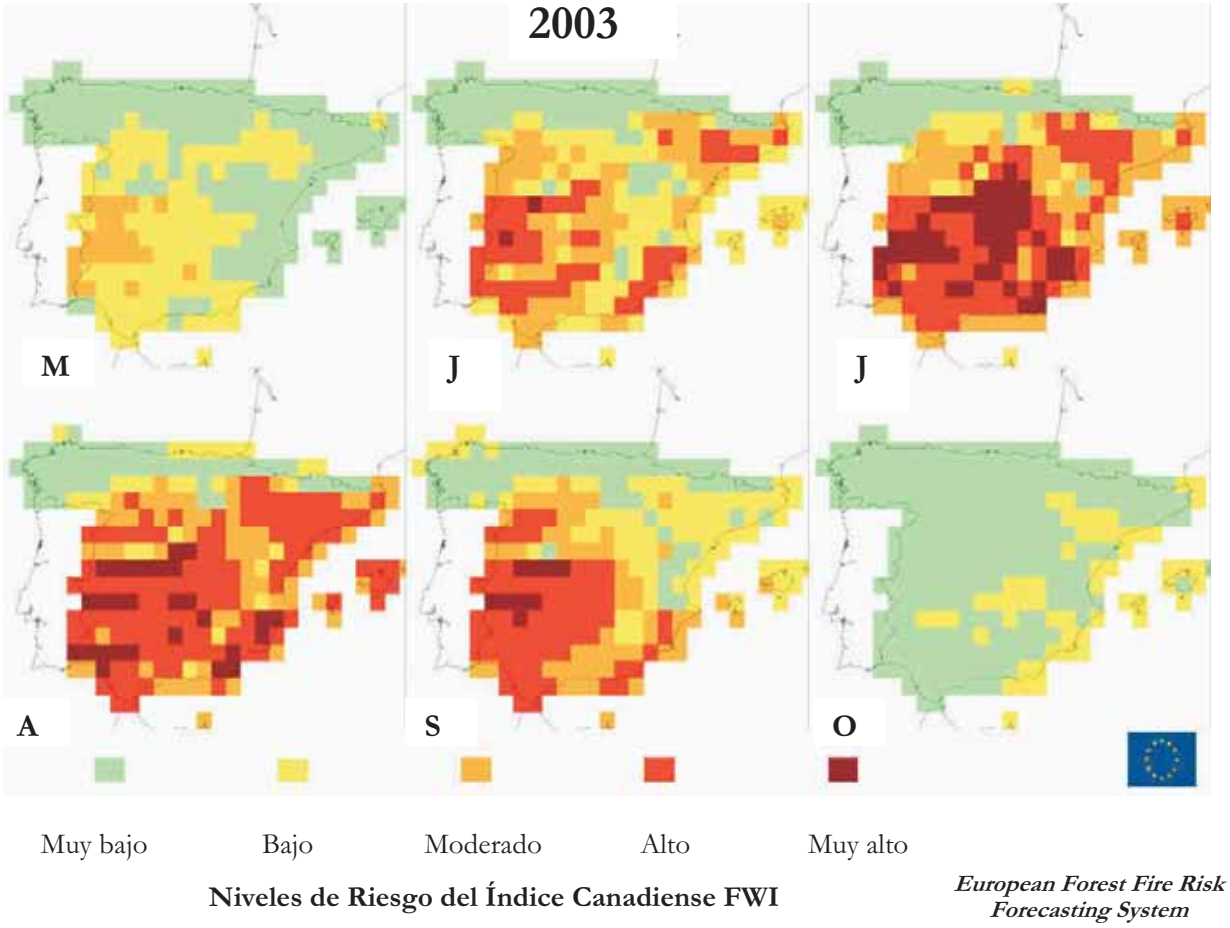


Fig. 12.C.6. *Riesgo de incendio en España según el Índice Canadiense FWI durante los meses de Mayo a Octubre de 2003. Mapa tomado del European Forest Fire Risk Forecasting System*, Instituto Europeo de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, CEC, JRC, Ispra, IT. (http://natural-hazards.jrc.it/effis/effrfs/).

El tamaño de un incendio varía según la fuente de ignición. Las igniciones intencionadas tendieron a producir incendios menos variables en lo que se refiere a las áreas quemadas que aquellos causados por rayos. Sin embargo, el grado de diferencia entre los incendios causados por diferentes fuentes de ignición depende de la zona climática. Paradójicamente, las fuentes de ignición han sido tanto más determinantes de estas distribuciones cuanto menor era el peligro climático de la zona. En otras palabras, un área con alto peligro climático (Levante) produjo distribuciones de frecuencias del tamaño de los incendios similares entre aquellos incendios causados por distinta fuente de ignición, mientras que otras áreas con menor peligro

(el Noroeste) han producido distribuciones más variables. Esto es, la fuente de ignición produjo una mayor variabilidad en el tamaño de los incendios en zonas menos proclives a los incendios que en aquellas que los son más. Además, la relación de los parámetros descriptores de estas distribuciones de frecuencias de tamaño con las variables climáticas ha sido baja, si bien, en el Noroeste (menor peligro), la relación fue más alta que en el Levante (mayor peligro)(Vázquez y Moreno 1995).

12.C.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

12.C.3.1. Impactos asociados a la climatología

Temperaturas

Las tendencias del clima futuro para España indican que la temperatura media aumentará aproximadamente 0,4 ºC/década en invierno y de 0,6-0,7 ºC/década en verano. Por tanto, los aumentos de temperatura son mayores en verano que en La frecuencie de anomalías térmicas aumentará generalizadamente. El número de días con temperaturas extremas máximas aumentará en verano (ver Capítulo 1). Existen evidencias de estas tendencias en algunas zonas de España (ver Cap. 1). La propagación del fuego se ve favorecida durante el día por el incremento térmico y la disminución de la humedad relativa del aire, lo que puede reducir el contenido en humedad de los combustibles muertos, así como el umbral para que entren en ignición, haciendo que un episodio de ignición produzca más fácilmente un incendio. Asimismo, el aumento en las temperaturas de la noche será proporcionalmente mayor que en las del día (Easterling *et al*. 1997). En otras palabras, las temperaturas durante la noche tenderán a hacerse comparativamente más altas, con el consiguiente efecto negativo sobre la humectación de los combustibles. Por tanto, asumiendo que el número de fuentes de ignición y la vegetación no varíe, cabe esperar que la inflamabilidad sea mayor, y los incendios más frecuentes y, una vez que eclosionen, se propaguen mejor y alcancen mayor tamaño.

Precipitaciones

Las tendencias para la precipitación durante el presente siglo no son consistentes entre los distintos modelos, si bien todos coinciden en que la precipitación total anual disminuirá, en particular en la primavera y verano (Cap. 1). Los patrones de precipitación determinan el nivel de reservas hídricas del suelo, siendo críticos los periodos de recarga para conferir al suelo mayor estabilidad en su contenido hídrico (Martínez-Fernández y Ceballos 2003). Asumiendo que la precipitación total no varíe, su concentración en invierno y la consiguiente falta de días de lluvia en primavera y verano afectará a los combustibles muertos y vivos. Esto, unido al incremento térmico del verano hará que la evapotranspiración potencial aumente (Pausas 2004). Las lluvias durante la estación de crecimiento determinan ampliamente la abundancia de herbáceas (Figueroa y Davy 1991). Las primaveras lluviosas mantienen más humedad superficial en el suelo, y producen un mayor desarrollo de combustibles finos herbáceos, que más tarde se desecarán. El aumento de las temperaturas puede hacer que los meses de desarrollo herbáceo se anticipen a la primavera temprana o al invierno, de ahí que, incluso ante un escenario de disminución de precipitaciones primaverales, el desarrollo de esta vegetación puede ser importante y aportar un elemento de peligrosidad en épocas relativamente tempranas. Esto puede ser más relevante en zonas húmedas que, con el tiempo, pueden ser objeto de mayor sequía estival que, además, puede aparecer más tempranamente. Por otro lado, una menor disponibilidad hídrica en las capas superficiales del suelo hará que los combustibles muertos en el suelo se desequen más tempranamente. La disminución de días de lluvia hará que se mantengan secos durante más tiempo. En pinares y ecosistemas con hojarasca bien desarrollada la inflamabilidad y el periodo de susceptibilidad al fuego aumentará.

La vegetación en pie sufrirá variaciones fisiológicas y fenológicas en respuesta a los cambios en los patrones de precipitación. En primer lugar, la concentración de precipitaciones en invierno, así como la disminución en el número de días de lluvia a lo largo del año conllevará un aumento en el número de días en que las plantas se vean sometidas a estrés hídrico (Martínez-Fernández y Ceballos 2003), con el consiguiente aumento en la duración de la temporada de incendios (Rambal y Hoff 1998). El patrón de enraizamiento, esto es, la profundidad del suelo que cada planta es capaz de explotar, unido a sus características fisiológicas, es determinante de su nivel de estrés hídrico (Filella y Peñuelas 2003, Martínez-Vilalta *et al*. 2003). Las especies con enraizamiento más superficial y particularmente susceptibles a la disponibilidad de agua superficial, tales algunos elementos del matorral, tales como jaras (*Cistus*), romeros (*Rosmarinus*), algunos brezos (*Erica*) y otros nanofanerófitos, pueden presentar mayores índices de estrés (Gratani y Varone 2004) y durante periodos más largos, haciéndolas más sensibles a cambios en los patrones de precipitación que al total de lluvia. Esto hará que los niveles de peligrosidad sean más altos y duraderos en las comunidades dominadas por estas especies (Mouillot *et al*. 2002) que en las que tienen un enraizamiento más profundo, como muchas de las especies arbóreas (Mediavilla y Escudero 2003a). Un menor contenido en humedad en el material fino hará que su potencial inflamable aumente en el tiempo, tanto más cuanto menores sean las precipitaciones y más se concentren en épocas tempranas del año.

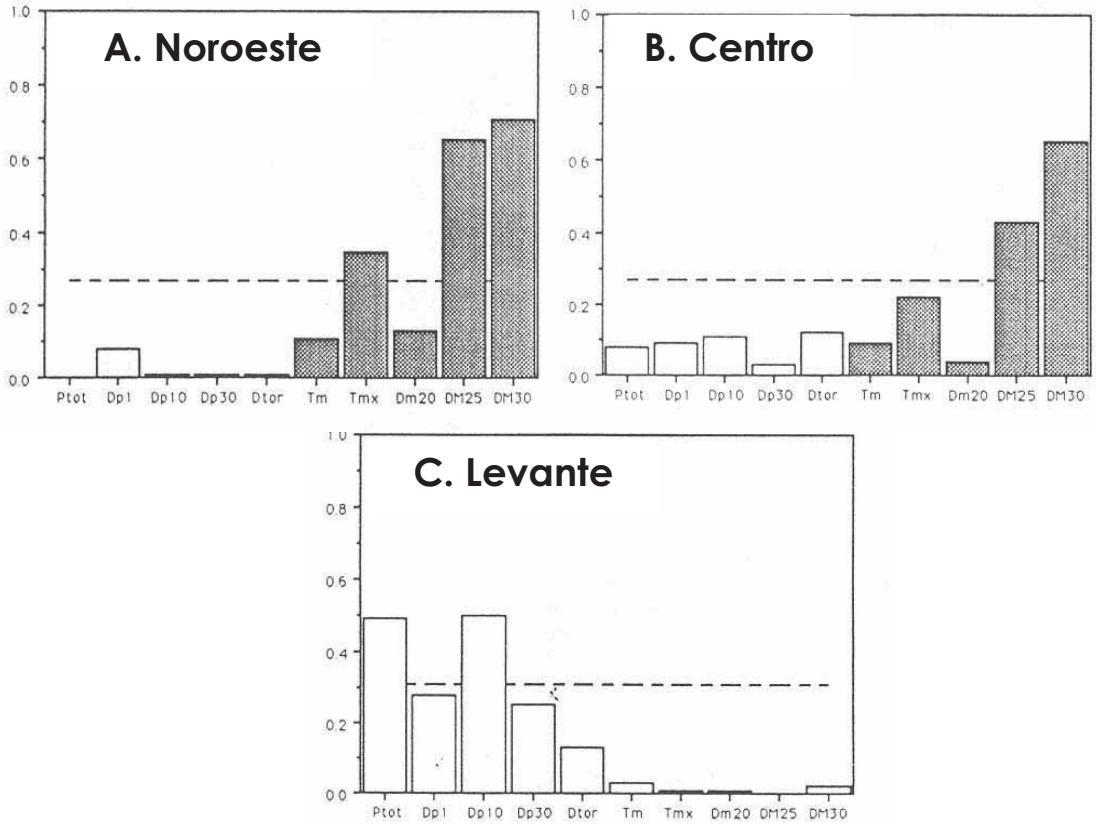


Fig. 12.C.7. *Coeficiente de determinación (r^2) entre distintas variables de precipitación (precipitación total [Ptot] o días con precipitación igual o mayor que los valores indicados [Dp1, Dp10, DP30], o días de tormenta [Dtor], respectivamente) y temperatura (media [Tm, de las máximas [Tmx], o días con temperaturas mínimas [Dm] o máximas [DM] superiores a los valores que se indican, respectivamente) anuales y superficie quemada entre 1974 y 1988 en tres zonas de España. La trama densa significa correlaciones positivas, y en blanco correlaciones negativas. La raya discontinua indica el nivel a partir del cual las correlaciones son estadísticamente significativas. De: Vázquez* y *Moreno 1993.*

Por el contrario, las especies con enraizamiento profundo pueden verse más afectadas por disminuciones en el total de precipitaciones. En los periodos secos, la falta de agua puede obligar a estas especies a ajustar su área foliar (Mouillot *et al*. 2002, Sabaté *et al*. 2002), disminuyendo el tamaño y número de las cohortes de hojas que portan, tendiendo hacia una mayor proporción de las hojas del año que de años anteriores. En situaciones extremas algunas especies pueden no desarrollar las hojas del año (Peñuelas *et al*. 2001). Esto puede afectar a su inflamabilidad, dado que las hojas viejas tienen menos agua y más contenido energético (Mediavilla y Escudero 2003b). Por otro lado, sequías prolongadas pueden producir la muerte total o parcial de los individuos, con el consiguiente aporte de materia muerta. Situaciones de este tipo han sido observadas en el pasado reciente, como la sequía de mediados de los años 90. Durante este periodo de sequía pudo observarse una mortalidad acusada y ampliamente repartida entre plantas de diferentes especies, primero entre las que presentan enraizamiento superficial (*Cistus* o similares), luego también a otras con enraizamiento profundo, aunque con diferencias entre especies en función de su capacidad de tolerar la falta de agua (Peñuelas *et al*. 2001). Por otro lado, el efecto fue más acusado en laderas S que en laderas N, y con variaciones también entre sustratos. Nótese que en situaciones tan extremas los potenciales hídricos que pueden llegar a medirse en algunas especies, incluso en otoño, pueden ser extremadamente bajos (Moreno y Cruz 2000). Una recurrencia de sequías puede aumentar el material muerto en pie, lo que incrementaría la peligrosidad de la vegetación.

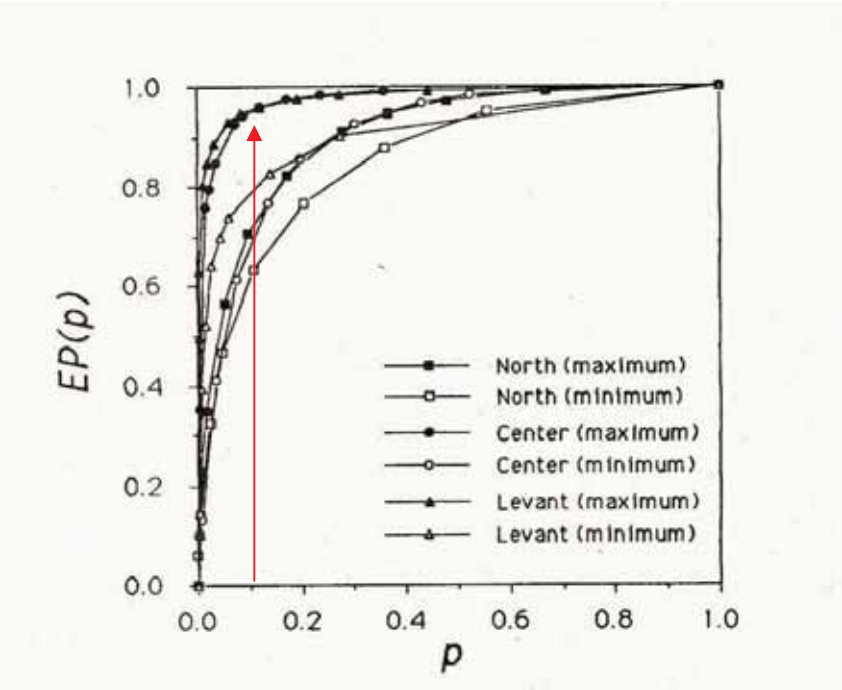


Fig. 12.C.8. *Relación entre la proporción de área quemada (Ep(p)) por una proporción (p) de incendios en tres zonas de España entre los años 1974 y 1988. La proporción de incendios (p) se calcula acumuladamente, comenzando por los incendios más grandes y terminando por los más pequeños. Así, la fleha flecha señala la proporción de superficie quemada por el 10% de los incendios más grandes. Nótese la mayor variabilidad entre años del Levante y Centro que del Noroeste de España, y que en años extremos apenas 10% de los incendios afectan a más del 95% de la superficie quemada en el año. De Vázquez* y *Moreno 1995.*

Viento

La velocidad media del viento tenderá a aumentar. Esta variación será menos acusada en verano que en otras estaciones (Cap. 1). Dadas las importantes interacciones locales de este

meteoro, no es fácil predecir el impacto de esta variable excepto que, dado su importante papel en la propagación del fuego, es probable que los incendios grandes y las dificultades de extinción aumenten.

Vegetación y clima

Conforme el cambio climático se materialice, los cambios en la vegetación derivados del mismo irán haciéndose patentes (Ver Capítulos 2 y 9). En este sentido, en la medida en que la vegetación más mesofítica, y por tanto, menos inflamable, sea sustituida por otra que lo es más (Peñuelas y Boada. 2003), aumentará el riesgo de incendio en las zonas que así ocurra. Otro tanto puede decirse de aumentos en la continuidad horizontal de la vegetación en aquellas zonas que de otra manera difícilmente podrían soportar un incendio, como son las zonas de alta montaña (Sanz-Elorza *et al*. 2003), o las zonas de paramera. Por otro lado, la aridificación de otras zonas podrá reducir la cantidad y continuidad del combustible y, por tanto, disminuir los incendios.

Rayos

Las predicciones basadas en los GCM indican que la fracción de lluvia convectiva tenderá a aumentar, así como el número de descargas de rayos (Price y Rind 1994). Los rayos no sólo serán más abundantes sino que se extenderán más a lo largo del año, ampliando la estación de incendios (Price y Rind 1994). Parra (1995)(tomado de Rambal y Hoff 1998) demostró que existe una estrecha relación entre la temperatura del Mar Mediterráneo (SST) y la fracción convectiva de lluvia (CF) en Barcelona, (CF=4,9SST-38,7, r^2=0,93, P<0.01). Las situaciones sinópticas con mayor aporte de rayos son las ciclogénicas o del Este (Tomas *et al*. 2004). Consecuentemente, cabe esperar que el número de incendios producido por rayos aumente con el tiempo. La mayor frecuencia de situaciones con déficit hídrico en el suelo hace suponer que la eficiencia de las descargas en producir un incendio sea mayor (Nash y Johnson 1996). Hay que notar que en el pasado la mayoría de los incendios causados por rayos se produjeron durante unos pocos eventos, esto es, días consecutivos con actividad tormentosa (Vázquez y Moreno 1998). Por tanto, la persistencia de dichas situaciones debido a la mayor estabilidad de las condiciones atmosféricas puede ser particularmente peligrosa. El mayor grado de abandono que suele ocurrir en las zonas altas, donde son más frecuentes los rayos, permite suponer que la acumulación de combustible aumente, y con ello los incendios por rayo.

12.C.3.2. Impactos sobre los índices de peligro

Conforme nos adentremos en el siglo XXI, y los cambios climáticos previstos se vayan materializando, las proyecciones basadas en los GCM apuntan a un aumento considerable en el índice mensual medio de peligro (Fig. 12.C.9). Estos cambios son generalizados en todos los meses del año y harán que la temporada de incendios se anticipe en el tiempo, tanto más cuanto más entrado el siglo y mayor sea el cambio que se materialice. Hay que notar que todos los escenarios predicen un aumento del peligro considerable. Dado que los índices de peligro no son iguales en la actualidad en todo el territorio, las variaciones irán afectando más a aquellas zonas que en algunos meses del año ya se encuentran en situaciones límite de ser consideradas peligrosas. Por ello, es previsible que el número de zonas que entren dentro de los estados de alerta de lucha contra incendios se incremente, así como la extensión del periodo de alerta. Escenarios similares han sido descritos para otras zonas del mundo, más o menos acusados según el cambio climático previsto (Torn y Fried 1992, Flannigan *et al*. 1998, Williams *et al*. 2001, Brown *et al*. 2004, Fried *et al*. 2004).

Por otro lado, un aumento en los índices medios de peligro implica que, aún asumiendo que la distribución de frecuencias de situaciones se mantiene fija, la frecuencia de situaciones extremas aumentará, y lo hará de forma no proporcional al aumento de la media (véase Schär *et al*. 2004, para el evento del verano de 2003 o Luterbacher *et al*. 2004, para el aumento en las frecuencias de eventos extremos). Por otro lado, la duración de las mismas puede verse también aumentada, como consecuencia de una mayor tendencia hacia la estabilidad atmosférica. Con qué frecuencia e intensidad se darán estas situaciones es difícil de predecir, habida cuenta las imprecisiones de los modelos. Nótese, no obstante, que Hulme y Carter (2000) indican que en la década de los 80 del siglo XXI la probabilidad de que un verano sea tan cálido como el que más entre diez del siglo pasado es del 65 al 100%, según los escenarios usados. En otras palabras, que se tendrá un verano tan cálido como uno entre diez del siglo XX prácticamente casi todos los años.

Aunque distintos GCM proyectan cambios climáticos diferentes, aún en el mejor de los escenarios cabe suponer que con frecuencia creciente puedan darse situaciones en las que sea imposible hacer frente a los incendios en el caso de una eclosión múltiple de los mismos bajo situaciones extremas. Los sistemas de lucha tienen un margen de acción limitado, pues como mucho pueden hacer frente a unas cuantas veces la situación normal. Eventos extremos, severos, prolongados y repartidos geográficamente obligan a que los servicios de lucha contra incendios tengan que hacer frente a muchas veces su capacidad real, con lo que inevitablemente sobrepasan el nivel de máxima eficacia para el que han sido concebidos. Los ejemplos de los grandes incendios de 1994 en el Levante, o los más recientes de Portugal de 2003 son ilustrativos acerca de lo que puede ocurrir. En estas situaciones, la meteorología es determinante. Un escenario de meteorología adversa permite aventurar un aumento de la frecuencia con la que puedan darse situaciones en las que la lucha contra incendios sea de una dificultad máxima.

12.C.3.3. Otros impactos

Cambios en los usos del suelo y en la vegetación

El factor más importante de cambio de la vegetación en España ha sido el uso del suelo. Las últimas décadas del siglo pasado se caracterizaron por un abandono del campo, paralelo a un incremento de la vegetación, bien por forestación, bien por desarrollo de la vegetación natural (Fernández Alés *et al*. 1992, García-Ruiz *et al*. 1996, Vega García 2003, Duguy 2003, Viedma y Moreno, enviado). La tendencia hacia una concentración de la agricultura en las zonas más fértiles, la disminución del pastoreo extensivo, y un aumento de las superficies abandonadas pueden seguir incrementando las superficies de monte. No obstante, el análisis del cambio paisajístico durante las décadas pasadas en ciertas zonas muestra que el cambio más importante probablemente ya se ha producido. Sin embargo, los cambios en las precipitaciones y temperaturas harán que el potencial productivo de muchas zonas disminuya, lo que puede afectar a los procesos de abandono de tierras (Ver capítulos 2 y 9). La disminución del valor económico de algunos bosques ante su falta de competitividad con otras zonas puede avivar el proceso de abandono.

Otros cambios importantes ocurrirán como consecuencia de la vegetación que pueda desarrollarse tras el incendio, toda vez que, en muchos casos, la quema de pinares antiguos genera matorrales o pinares, que se queman antes de alcanzar la madurez reproductiva, por lo que, finalmente, son los matorrales los que emergen (Faraco *et al*. 1993, Vallejo y Alloza 1998, Valbuena *et al*. 2001, Lloret *et al*. 2003, Pérez *et al*. 2003, Rodrigo *et al*. 2004). Dado que el sitio donde ocurren los incendios no es al azar, sino que lo hace en particulares situaciones, es probable que el cambio de valoración asociado al tipo de vegetación suponga una menor atención, tanto en la prevención, como en la vigilancia, lo que puede conllevar a una aceleración del ciclo de incendios (Trabaud y Galtie 1996). Se ha constatado que en algunas

zonas (Sierra de Gredos), los pinares una vez que se queman vuelven a quemarse con mayor celeridad (Vázquez y Moreno 2001). Esto podría conducir a cambios en la distribución de la vegetación en el paisaje, con zonas dominadas por el matorral, más susceptibles de ser expuestas a agentes igníferos, y otras boscosas, más alejadas, de menor acceso. Antecedentes de este proceso ya han sido descritos (Mouillot *et al*. 2003). Por otro lado, simulaciones de incrementos en la frecuencia de incendios como consecuencia del cambio climático arrojan un dominio paulatino de los matorrales (Pausas 1999, Mouillot *et al*. 2002).

Situaciones en las que los incendios aumenten su frecuencia serán posibles en la medida en que el ecosistema sea suficientemente fértil como para aportar los nutrientes que requiere el crecimiento de la vegetación. El establecimiento de condiciones climáticas más favorables en algunas zonas de montaña y de las mesetas puede hacer que el crecimiento de la vegetación aumente, acelerándose el proceso anteriormente descrito. No obstante, cabe presumir que se produzcan desequilibrios entre aportes de nutrientes en el lapso interincendio, y pérdidas de los mismos por los incendios, lo que causará una disminución de la fertilidad del sistema (Moreno 1999), y consiguiente tasa de regeneración de la vegetación (Díaz Delgado *et al*. 2002).

En principio, asumiendo que la ocurrencia de incendios está limitada por el combustible (Minnich 1998), incluso en las peores condiciones que se avecinan, cabría suponer que este proceso acarrearía una disminución de la incidencia de incendios, debido a la falta de combustible ocasionada por incendios frecuentes. La mayor eficacia de lucha contra incendios favorecería este proceso (Piñol *et al*. 2004). No obstante, la alternativa de que los incendios estén mayoritariamente controlados por las condiciones meteorológicas parece más consistente (Moritz *et al*. 2004). En este supuesto, y bajo condiciones de mayor peligro, cabe esperar un impacto crecientemente negativo de los incendios en muchas zonas, que se verían sometidas a incendios incluso en estados jóvenes de regeneración (Vázquez y Moreno 2001), con el consiguiente riesgo de pérdida de la fertilidad del suelo.

Cambios en las fuentes de ignición humanas

No es posible establecer cómo las situaciones originadas por el cambio climático pueden incidir en la población causante de incendios dolosos. La persistencia de situaciones de alto peligro hará que las oportunidades para ejecutar una acción dolosa aumente. La posibilidad de que durante estas situaciones se produzca algún incendio que estimule a dichos agentes no puede ser excluida. En lo que concierne a los incendios accidentales, esto es, a aquellos en los que la fuente de ignición se origina como consecuencia fortuita de la actividad humana, la mayor peligrosidad del clima puede conllevar una mayor probabilidad de que las situaciones que aportan fuentes de ignición terminen originando un incendio. Contrarrestando esta posibilidad estaría la mejora paulatina en información y formación de la población y su sensibilización hacia el problema de los incendios, de manera que las fuentes de ignición puedan reducirse.

12.C.3.4. Régimen de incendios futuro y factores que pueden afectarlo

Los escenarios que se dibujan cara a la ocurrencia de incendios forestales están caracterizados por un incremento generalizado de los índices de peligro, una mayor duración de la temporada de incendios y una mayor frecuencia de situaciones extremas y de más larga duración. A esto se une la tendencia hacia un cambio en la vegetación, con mayor abundancia de especies arbustivas, más sensibles al estrés hídrico. Consecuentemente, cabe esperar que los incendios sean más frecuentes, extensos e intensos. Estas tendencias generales variarán de un punto a otro de la geografía, pero acentuarán las tendencias actuales.

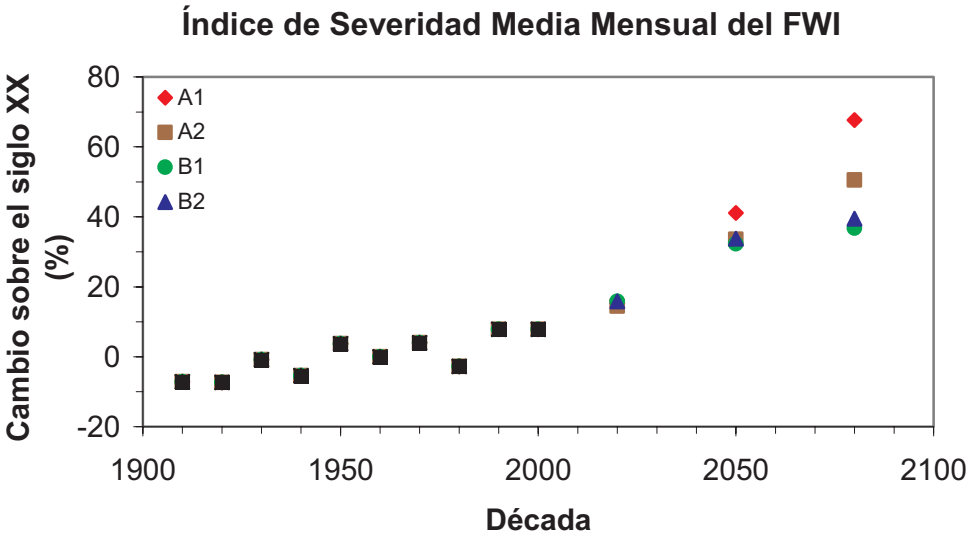


Fig. 12.C.9. *Variación (%) del índice medio mensual del FWI (Índice de Peligro Canadiense) para España peninsular y por década (el dato se refiere al último año de ésta) sobre la media del siglo XX durante dos siglos. Los datos del siglo XX han sido reconstruidos a partir de la base ERA y de New et al. (2002) ajustados con datos de estaciones reales. Los datos del siglo XXI proceden de las predicciones del modelo HadCM3, del Hadley Centre del Reino Unido, para cuatro escenarios de emisiones y reescalado según New et al. 2002. Los valores de cada año están calculados sobre los meses de Mayo a Octubre, inclusive. De Moreno, Zavala* y *Díaz (no publicado).*

Las previsiones negativas cara a la ocurrencia de incendios conforme discurre el cambio climático pueden verse contrarrestadas por mejoras en la predicción meteorológica, el conocimiento del estado de los combustibles y las estrategias de prevención y vigilancia. La predicción meteorológica actual permite conocer con anticipación de pocos días la posible existencia de situaciones de peligro. Es probable que con el paso del tiempo la mejora en la capacidad predictiva meteorológica pueda alcanzar plazos más largos. Una mejora en la capacidad de predicción del peligro puede permitir planificar mejor los recursos y, particularmente, la puesta en marcha de acciones preventivas en aquellos sitios de mayor peligrosidad. En este sentido, la elaboración de planes de prevención de fincas y la obligación de realizar inscripciones registrales de las zonas quemadas y los planes para su restauración, como se lleva a cabo en algunas Comunidades Autónomas, pueden contribuir a sensibilizar a todos los implicados. A ello puede ayudar un mejor conocimiento de los combustibles, bien de su cantidad y distribución espacial, bien de su estado de hidratación y fenología (González-Alonso *et al*. 1997, Chuvieco *et al*. 2003, Riaño *et al*. 2003, Gonzalez-Alonso *et al*. 2004). Igualmente, son importantes las mejoras que cabe esperar como consecuencia de la implantación de sistemas de riesgo basado en las condiciones reales de cada sitio, con resoluciones cada vez más mayores (Carlson *et al*. 2002). Esto, unido a mejoras en los sistemas de vigilancia permitirá no sólo disminuir los tiempos de respuesta sino ajustar las mismas al grado real de riesgo que conlleve la eclosión de un incendio.

Para que el sistema sea más efectivo será necesario un cambio en las políticas de lucha contra los incendios. Una política basada estrictamente en la exclusión del fuego puede ser contraproducente, sobre todo cuando es presumible que se produzcan cambios en el potencial forestal de muchas zonas, y la tendencia hacia un dominio de sistemas de matorral se haga más extensiva. Ello hará que la presión sobre las zonas arboladas sea mayor, por lo que se precisará articular estrategias defensivas centradas en ellas. En este sentido, esquemas de gestión que disminuyan la cantidad de combustible en aquellas zonas con mayor potencial para

desencadenar un incendio de grandes dimensiones son críticos. Estos esquemas de gestión deben considerar el uso del fuego como una herramienta más entre las disponibles. Una estrategia de este tipo puede que no excluya la ocurrencia de ciertos incendios, pero sí que sólo puedan propagarse fuera de control en condiciones extremas.

El resultado esperable es que mejoras en la prevención, valoración del riesgo y vigilancia permitan controlar buena parte de los incendios forestales antes de que adquieran cierta dimensión. Eventualmente, sólo aquellos que se den en circunstancias de gran peligrosidad serán los que terminen prosperando. Consecuentemente, cabe esperar que la distribución de tamaños tienda a hacerse más desigual. La recurrencia de situaciones extremas es una posibilidad cierta, circunstancias bajo las cuales la eficiencia de los sistemas de lucha es menor. Por tanto, la tendencia hacia una distribución de gran desigualdad en los tamaños de los incendios se consolidará, así como su variabilidad anual. En cuanto a las causas de incendio, la mayor sensibilización y educación de la población permitirá disminuir los incendios causados por negligencia, aunque persistirán y adquirirán más importancia los incendios causados por rayos. Su mayor localización y posibilidad de anticipación hace que, igualmente, sólo se produzcan aquellos que se den en situaciones extremas. La incidencia de los incendios dolosos es imposible de predecir.

En síntesis, puede ocurrir que la mayor peligrosidad se vea parcialmente contrarrestada por un aumento en la sensibilidad y educación. La mayor eficiencia en la vigilancia y prevención puede hacer que buena parte de los focos de incendio sean controlados. No obstante, es esperable que prosperen aquellos incendios que se den en condiciones más adversas, que serán más frecuentes, tanto para los incendios de origen humano como los causados por rayo. Dado que la superficie afectada por unos pocos incendios es determinante del total quemado anualmente, es presumible que la superficie total quemada aumente, incluso a pesar de que menos incendios escapen a las acciones de lucha, y se haga más variable de año en año. El tamaño máximo de un incendio tenderá a aumentar y lo hará a lo largo de toda la geografía, pudiéndose dar incendios más grandes donde, hasta ahora, no se han dado. El escenario de grandes incendios aparece como altamente probable.

12.C.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Vázquez *et al*. (2002) mostraron que, durante los años 1974-94, la proporción numérica de grandes incendios (>500ha) estuvo relacionada con las temperaturas más altas y un alto número de días transcurrido desde la última precipitación. Por otro lado, una alta frecuencia espacial y temporal de incendios estuvo correlacionada con humedades relativas más elevadas. La superficie afectada por incendios medios o grandes, o su variabilidad estacional, estuvo positivamente relacionada con las altas temperaturas y el número de días transcurridos desde la última lluvia. Por el contrario, como en el caso del número de incendios, un número alto de zonas (cuadrículas de 10.000 ha) con superficie quemada elevada (>500 ha) se relacionó con altas humedades relativas del aire. Estas diferencias reflejan bien lo que ocurre en el gradiente que va de la España Mediterránea a la España Atlántica, en particular del Sur y Este al Norte y Noroeste Peninsular. En el Noroeste, los incendios son relativamente pequeños, generalizados por todo el territorio y ocurren bajo condiciones más benignas, pues son causados por las personas. En las zonas mediterráneas, estos son menos frequentes, pero alcanzan mayor tamaño y ocurren bajo condiciones más extremas.

Bajo los cambios que se anticipan, las situaciones de altas temperaturas y alto número de días sin lluvia se harán más frecuentes, extendiéndose conforme discurra el siglo a toda la Península, al tiempo que se harán más duraderas. Por otro lado, se ha observado una relación entre la precipitación del año anterior y la superficie quemada en el verano siguiente (Pausas 2004), por lo que el efecto global de años particularmente húmedos puede no ser positivo.

Consecuentemente, cabe suponer que el impacto de un régimen de incendios más extremo, acorde con la nueva climatología, sea será proporcionalmente menos relevante en aquellas zonas de nuestra geografía donde este patrón ya está presente, como la mayor parte de las zonas de tipo mediterráneo. Dado que las zonas áridas está sometidas ya a periodos prolongados de sequía no es probable que incrementos en ésta tengan, comparativamente un gran impacto en la frecuencia o tamaño de los incendios. Por el contrario, en aquellas zonas cuyo patrón de ocurrencia de incendios actual sea muy distinto al que se prevé, como es en el Noroeste y Norte peninsular, cabe esperar que la capacidad de soportar un nuevo régimen de incendios sea menor. Esto es, en las áreas donde las sequías prolograndas sean más raras es más probeble que sean más sensibles a cambios en el régimen de incendios. Además, la amplia distribución espacial de los incendios en esta parte de nuestra geografía, unida a la alta intencionalidad de los mismos indica que es en estas zonas donde se pueden dar las mayores vulnerabilidades. En el estudio arriba referido se prueba la existencia de una relación entre la proporción de superficie quemada por incendios grandes y la proporción de superficie quemada por incendios causados por negligencias o rayos. En este sentido, un cambio en el patrón de fuentes de ignición en el sentido de estar dominado por la intencionalidad o causas desconocidas a otro dominado por incendios causados por negligencias podría conducir a un régimen típico de la España mediterránea, a tenor de lo observado en las dos décadas analizadas. La mayor abundancia de terreno forestal en la zona Norte y Noroeste de España permite aventurar que la frecuencia de incendios permancerá alta. La alta productividad primaria de estas áreas (Rodríguez Murillo 1997), y las situaciones de estrés por las que pueden pasar en el futuro (ver capítulo 9), permiten anticipar un incremento de las zonas en estado de regeneración tras el fuego, con el consiguiente incremento de la peligrosidad. Son estas zonas más productivas las que tienen mayor probabilidad de sufrir un cambio de régimen de incendios frente al actual.

Por otro lado, aparecen como vulnerables también aquellas zonas en las que los incendios han sido relativamente poco frecuentes y que, en términos biogeográficos, son las zonas cuya vegetación potencial se corresponde con hayedos, parameras de *Juniperus* o pinares y abetales de alta montaña (*Pinus uncinata*, *Abies*). El incremento del peligro, unido en algunos casos (alta montaña) a la mayor presión sobre las zonas forestales, particularmente en verano, puede hacer que los incendios se den con frecuencia y magnitud no conocidas. La menor resiliencia al fuego de estos ecosistemas puede hacer que su regeneración se vea dificultada tras el fuego con el consiguiente cambio de vegetación y riesgo para la actual. Por su extensión y particular significación, las zonas de paramera pueden ser algunas de las más vulnerables.

Por último, el resto de España, dominado ya por un régimen de incendios de tamaño medio o grande, con incendios más relacionados con negligencias o rayos, y definido por altas temperaturas y tiempo transcurrido desde la última lluvia, verá acrecentada esta tendencia. De nuevo, la mayor o menor disposición de estas zonas a desarrollar una vegetación continua en poco tiempo, que variará entre zonas según que su productividad actual esté más o menos limitada por la temperatura, puede hacer que estas situaciones se extiendan, haciéndose el patrón actual más acusado. Por tanto, la tendencia hacia incendios más intensos y extensos se acrecentará, así como la frecuencia debido a la mayor probabilidad de que una fuente negligente de calor desencadene un incendio.

12.C.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

12.C.5.1. Estrategias de prevención y lucha contra incendios

La opción de luchar contra todo incendio en un ambiente de peligro y riesgo creciente puede simplemente no ser técnicamente posible, ni económicamente viable. Por otro lado, desde el punto de vista de la gestión de los ecosistemas algunos de ellos pueden gestionarse teniendo en cuenta al fuego, esto es, incorporar periódicamente el fuego en los esquemas de gestión.

En este sentido, parece necesario determinar dónde y cuándo el incendio no es deseable a ningún coste y dónde y cuándo puede ser tolerable o, incluso, deseable, aunque sólo sea para minimizar el riesgo de un incendio incontrolado. Esto se puede conseguir mediante la implantación de sistemas de gestión forestal que contemplen el uso de quemas prescritas, esto es, controladas (Rodríguez Silva 1998 2004). Esto es así en las actuales circunstancias pero más aún en las que se avecinan. La idea es que el fuego puede ser utilizado para controlar los tipos y cantidades de combustibles. En general es cierto (aunque existen notables excepciones) que un área quemada es altamente improbable que vuelva a quemarse en unos años. Esto ofrece la posibilidad de usar quemas controladas para crear zonas a través de las cuales el fuego no prospere. Esto es factible para, por ejemplo, proteger zonas con alto valor económico o que sean altamente sensibles al fuego como plantaciones jóvenes, edificaciones adyacentes al monte, etc. No obstante, el uso del fuego no está exento de riesgo en ningún caso. Una vez que se desencadena un incendio siempre existe alguna probabilidad de que éste se propague fuera de las áreas seleccionadas por el gesto. Por ello, su uso debe hacerse cuidadosamente.

Tabla 12.C.1. *Resumen de los principales impactos sobre el régimen y ocurrencia de incendios en España como consecuencia del cambio climático. (Escala de certeza 1 a 5).*

Variables relacionadas con la ocurrencia de incendios	Cambio	Certeza
Peligro de incendio	Aumento	*****
Frecuencia de incendios	Aumento	****
Tamaño máximo de los incendios	Aumento	*****
Intensidad media del fuego	Aumento	*****
Zonas en riesgo	Aumento	*****
Estación de incendios	Aumento	*****
Variabilidad anual	Aumento	*****
Igniciones por negligencia	Aumento	****
Igniciones intencionadas	Aumento	**
Igniciones por rayo	Aumento	****

Dados los importantes recursos que se dedican a la prevención y lucha contra incendios, y el límite en la eficiencia que es esperable siguiendo análisis de coste/beneficio (esto es, más recursos no necesariamente implican mayor eficacia)(Martell 2001), parece obligado revisar las políticas de lucha contra incendios, fundamentalmente a través de cambios en las estrategias preventivas, ya que los avances técnicos en la capacidad de luchar contra el fuego una vez que éste se ha producido y detectado parecen más limitadas. En este sentido, las técnicas de gestión del combustible (tanto sean desbroces, quemas prescritas, utilización de herbívoros u otras) deberían progresar a partir del conocimiento de las características de las especies vegetales y de los ecosistemas (Baeza *et al*. 2003), de manera que permitan una gestión integrada de los mismos, tomando en cuenta, además de la prevención de incendios, la conservación de la biodiversidad, la fijación del carbono y la lucha contra la desertificación.

12.C.5.2. Selvicultura y usos del suelo

Los estudios llevados a cabo en el pasado muestran que, si bien en el conjunto del país no parece que el tipo de cubierta vegetal haya sido determinante de la ocurrencia de incendios (Vázquez *et al*. 2002), en determinadas zonas, los incendios han sido selectivos, esto es, no han afectado por igual a toda la vegetación (Viedma y Moreno, enviado). Por otro lado, no es

fácil hacer predicciones acerca del valor comercial de las plantaciones arbóreas en el futuro lejano. No obstante, teniendo en cuenta que en el pasado un número considerable de plantaciones arbóreas ardió a edades tempranas (Moreno *et al*. 1998), hay que suponer que en el futuro puede ocurrir lo mismo. La ocurrencia de incendios en zonas forestadas, con suelos poco desarrollados, que son los que predominan en los montes mediterráneos, puede suponer un impacto altamente negativo sobre los recursos edáficos, debido a las pérdidas de nutrientes y suelo que ello conlleva (Bautista *et al*. 1996, Andreu *et al*. 1996, Soto y Díaz-Fierros 1998). El escenario de lluvias concentradas en el tiempo hace prever que los efectos negativos tiendan a ser mayores (De Luis *et al*. 2003). La mayor frecuencia de sequías puede ser doblemente negativa al limitar el desarrollo de la vegetación en los estadios tempranos. No obstante, la gran variabilidad espacial y temporal con que éstas pueden presentarse (Vicente-Serrano *et al*. 2004) hace difícil proyectar sus efectos a escalas de detalle. Consecuentemente, las estrategias de uso forestal de los distintos territorios de España, incluyendo las especies de reforestación, sobre todo de aquellos con un alto potencial forestal, deben tener en cuenta la eventualidad de incendios frecuentes (Pausas *et al*. 2004). El riesgo asociado a las pérdidas del suelo debe calcularse a fin de verificar la idoneidad de los diferentes usos del suelo.

12.C.5.3. Usos recreativos del monte

La tendencia al incremento poblacional, las mejoras socioeconómicas, y la presumible tendencia hacia un interés cada vez mayor por mantener una vida en contacto con la naturaleza, permite presumir que la demanda de uso de los montes aumentará. La mejora en la educación probablemente conllevará una mayor sensibilidad al riesgo y prácticas de uso menos peligrosas. No obstante, un uso recreativo del monte más intenso, junto a una mayor duración de los periodos de actividad debido a temperaturas más benignas, pueden añadir factores de riesgo importantes, si bien, la cuantificación del mismo no es posible. Por otro lado, habría que considerar el riesgo de incendio en los planes urbanísticos, de manera que cualquier recalificación de los terrenos para hacerlos urbanizables tomara en cuenta el riesgo de incendios. De otra parte, se debería reforzar la legislación sobre protección contra incendios en la interfase urbano-forestal y las medidas encaminadas a aplicarla.

12.C.5.4. Sistemas de predicción y vigilancia

Las mejoras en los sistemas de vigilancia, favorecidos por el desarrollo tecnológico, facilitarán su extensión a amplias zonas, acortando los tiempos de avistamiento y respuesta, lo que supondrá una ayuda importante en la lucha contra incendios. Por otro lado, la posibilidad de disponer de mapas de combustible con resoluciones espaciales altas, y de sus condiciones (contenido en humedad) ajustadas a la meteorología, unido a la integración en SIG de toda la información existente y a la aplicación de modelos de propagación en el supuesto de un fuego incipiente, facilitará una rápida y oportuna respuesta. Igualmente, la capacidad de disponer de información *in situ* gracias a las comunicaciones remotas e informática puede poner en manos del gestor unas herramientas potentes para calibrar mejor el riesgo inminente y planificar mejor la lucha contra el fuego. El poder anticiparse a medio plazo, con simulaciones aproximadas a las peores condiciones posibles puede permitir una mejor planificación de las campañas. Todo ello hace pensar que la capacidad de lucha aumente sensiblemente, sobre todo en las fases tempranas de un incendio.

12.C.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

12.C.6.1. Sector forestal

La producción de madera y fibra puede verse alterada como consecuencia del cambio climático y el incremento en el peligro de incendio. Las variaciones climáticas harán que zonas que hoy son productivas dejen de serlo, y viceversa. Sin embargo, estos cambios serán demasiado rápidos e inestables como para poder sacar ventajas de los mismos y planificar cultivos forestales, dada la duración de sus ciclos de varios lustros a décadas. La posibilidad de incendios forestales es un tema que habrá de incluirse como elemento negativo a la hora de abordar dichas acciones. Por otro lado, es probable que un número creciente de las plantaciones forestales se vean afectadas por el fuego antes de alcanzar un valor comercial. Ello puede redundar en una disminución de la capacidad productiva del sector.

El incremento de peligro de incendio que se prevé es un factor que ha de incluirse en cualquier plan de gestión forestal. Por otro lado, los supuestos sobre los que se han podido basar algunos de los actuales, en cuanto a frecuencia de situaciones peligro, pueden verse sobrepasados. Esto hace que las eventuales barreras que se hayan diseñado para detener el fuego puedan no ser tan eficientes como se pensó en su día, así como la logística asociada a la lucha contra el fuego. Consiguientemente, los planes forestales deben contemplar una gama de escenarios futuros, incluyendo a los peores, dentro del marco temporal para el cual se hace una determinada planificación. Dentro de estas planificaciones han de contemplarse las dinámicas de la vegetación como consecuencia del fuego y los riesgos derivados de ello bajo escenarios de peligro creciente. Igualmente, han de contemplarse en las actuaciones preventivas la dimensión de los elementos defensivos ante mayores intensidades lineales de los frentes de llama. Por otro lado, dada la importancia actual y creciente de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, y el papel que los incendios pueden jugar sobre la capacidad de los sistemas forestales para actuar como sumideros de C (Rodríguez Murillo 1997), parece obligado hacer una proyección de la viabilidad y riesgos de los planes forestales desde esta perspectiva, sobre todo, de aquellos susceptibles de ser considerados en el marco de emisiones y sumideros del Protocolo de Kyoto, y acuerdos que se establezcan en el futuro.

12.C.6.2. Conservación del suelo

Los escenarios de sequías frecuentes, lluvias concentradas en el tiempo y aumento del peligro de incendios hacen que la conservación de los suelos adquiera una importancia capital, dado que, en tanto en cuanto la fertilidad del suelo lo permita, es predecible un desarrollo de la vegetación que en pocos años puede adquirir una gran peligrosidad, pudiendo así incrementar la incidencia de incendios. Consecuentemente, en aquellas zonas con mayor riesgo de erosión es prioritario establecer planes de forestación que, en el caso de un incendio, permitan una recuperación de la cubierta vegetal suficiente como para disminuir dicho riesgo. Habida cuenta que ciertas especies forestales afectan negativamente a algunas especies rebrotadoras (Bellot *et al*. 2004), es preciso desarrollar técnicas que permitan la presencia de estas especies para que, tras un incendio, puedan producir una cubierta vegetal mínima (Vallejo y Alloza 1998, Maestre *et al*. 2001, Pausas *et al*. 2004) y aumentar la resiliencia al fuego.

12.C.6.3. Uso recreativo

La capacidad de acogida de los montes y, por tanto, el uso recreativo de los mismos, puede verse afectada. El aumento de peligro de incendio, y su extensión durante el año, pueden inducir a restricciones en el uso de los montes para evitar riesgos mayores, como ya se viene haciendo en algunas regiones españolas. Esto unido a la probable mayor demanda de espacios libres puede originar conflictos como consecuencia de un mayor demanda en los

sitios asequibles, conflictos que habrán de resolverse con información y educación adecuada. Por otro lado, las zonas de mayor afluencia tendrán que ser objeto de vigilancia más activa y permanente.

12.C.6.4. Biodiversidad vegetal y animal

Un posible aumento en la incidencia de incendios puede conllevar un dominio de vegetación pionera y una menor diversidad vegetal. La mayor frecuencia de sequías, antes y después del incendio, puede llevar a incendios más intensos y extensos, y dificultar la colonización de especies, bien por su mayor dificultad para que las semillas lleguen desde fuera del incendio (Rodrigo *et al*. 2004), bien por la imposibilidad de establecerse en la estrecha ventana temporal que pueden tener algunas de ellas, (Quintana *et al*. 2004), lo que puede ocasionar extinciones locales. La homogeneización de las zonas quemadas de forma recurrente disminuirá la diversidad animal y puede alterar la interacción entre especies (Moreira *et al*. 2001, Torre y Díaz 2004). Por tanto, los incendios pueden causar pérdida de hábitats y especies. En este sentido, las áreas terrestres protegidas deberían contemplar su vulnerabilidad ante el riesgo creciente de incendio.

12.C.7 PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

12.C.7.1. Relación entre peligro y ocurrencia de incendios

Al ser la gran mayoría de los incendios de origen intencionado, la principal incertidumbre se centra en cómo pueden afectar las condiciones futuras a las pautas del comportamiento humano a efectos de causar más o menos incendios. Cabría esperar que ante situaciones recurrentes de incendios devastadores, producidos como consecuencia de negligencias que puedan darse bajo condiciones de alto peligro de incendio, se produjese una mayor percepción del riesgo y, consecuentemente, las pautas inductoras de incendios por negligencias disminuyesen.

12.C.7.2. Cambios en el paisaje e incidencia de incendios

Uno de los pilares de la lucha contra incendios se basa en la importancia de la configuración estructural del paisaje a la hora de determinar la propagación del fuego (Minnich 1983, Green *et al*. 1990). Consecuentemente, en algunos países se han venido llevando a cabo acciones encaminadas a favorecer la diversidad del mosaico paisajístico. No obstante, en los ambientes dominados por incendios de copas, bien sean matorrales, bien en bosques de estructura compleja, parece que la estructura del paisaje juega un papel menor en detener el paso del fuego bajo condiciones extremas (Johnson *et al*. 2001, Keeley y Fotheringham 2001). Aunque la heterogeneidad espacial, cuando menos ayuda en las tareas de gestión y extinción, sin duda éste es uno de los elementos que mayor incertidumbre arroja a la hora de realizar una la planificación forestal. Mientras no tengamos una mejor valoración de cómo la estructura del paisaje condiciona la propagación del fuego bajo tal o cual situación de peligro, la valoración real de la peligrosidad derivada de una ordenación territorial dada es incierta.

12.C.7.3. Interacciones con otros impactos

La posibilidad de sequías prolongas que afecten a amplias zonas y, por tanto, produzcan la muerte generalizada o selectiva de ciertas especies, afectando súbitamente a la peligrosidad de un territorio, es cierta (Peñuelas *et al*. 2001). Por otro lado, son probables las interacciones con ciertos agentes patógenos que, igualmente, al inducir la muerte de sus huéspedes (Hodar

et al. 2003) incrementen la biomasa muerta, afectando así a la inflamabilidad de una zona durante largo tiempo.

12.3.7.4. Cambios en las pautas de uso del monte

Probablemente, el cambio en las pautas de uso del monte sea uno de los cambios más relevantes que nos aguarde. Por una parte, por la mayor demanda de uso recreativo. Por otra, por el aumento de uso residencial del mismo. Los peligros derivados de estos usos, en cuanto a fuentes de ignición o de los daños que puedan ocasionarse caso de un incendio, no harán sino aumentar. Una tendencia a la utilización residencial del monte o hábitats forestales, como ya ocurre en amplias zonas (la costa, proximidades de grandes urbes) supondrá una presión con un riesgo creciente difícil de cuantificar.

12.C.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

La detección de un cambio en la ocurrencia de incendios forestales en España es difícil habida cuenta la falta de datos históricos a lo largo del siglo XX, excepto en su última parte. Afortunadamente, la base de datos EGIF de la Dirección General para la Biodiversidad (MIMAM) es ya suficientemente larga como para poder valorar posibles tendencias. Un análisis de este tipo se ve dificultado por el hecho de que, en paralelo a la toma de datos, se han producido cambios socioeconómicos, demográficos y paisajísticos, al tiempo que se han modificado las políticas forestales y se ha desarrollado una alta capacidad de lucha contra el fuego. Consiguientemente, el factor clima es uno más de los que han afectado a los incendios, pero no el único.

Dada la estrecha relación entre los índices de peligro y las variables climáticas que les determinan (temperatura, humedad, precipitación y viento) es presumible que los cambios detectados en el clima hayan influido sobre los correspondientes índices de peligro, como parece apoyan los datos disponibles (Fig. 12.C.9). La identificación de posibles tendencias en la ocurrencia de incendios parece más complicada, habida cuenta las enormes fluctuaciones que ocurren de año en año (Fig. 12.C.1). La inestabilidad de los paisajes y de las políticas de lucha o prevención complica la posibilidad de disponer de índices fiables que permitan detectar el cambio. Entre los índices posibles cabe considerar parámetros que se basen en la distribución de tamaños (Vázquez y Moreno 1995, Duguy 2003), bien para toda España, bien, preferiblemente, por zonas ecológicamente afines. Otros posibles indicadores pueden estar relacionados con la duración efectiva de la estación de incendios, o la variabilidad temporal en la ocurrencia de los mismos usando los incendios originados por causa fortuita. Cabe esperar que un incremento en el peligro haya supuesto una más temprana aparición de incendios y su ocurrencia de forma más regular.

El mayor problema para poder determinar el posible cambio en la ocurrencia de incendios es nuestra incapacidad para predecir el número de igniciones, su distribución espacial y temporal y, por tanto, su potencial de propagación para desarrollar un incendio. A diferencia de los incendios de origen humano, las características de los ocasionados por el rayo pueden conocerse con cierta exactitud. Consecuentemente, sería posible valorar tendencias sobre la ocurrencia de incendios teniendo en cuenta el número de descargas, su magnitud, tipo y localización.

12.C.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

12.C.9.1. Prevención y lucha contra el fuego

El cambio climático y su posible efecto sobre el peligro de incendio inevitablemente afectarán a las políticas de prevención y lucha contra incendios. Estas políticas deben centrarse en gestionar sistemas complejos, como los forestales, esto es, ecosistemas, en los que el fuego, a la postre, puede ser inevitable. Por tanto, hay que decidir cómo se manejan estos ecosistemas y qué papel damos al fuego, si es que alguno. Por ello, cabe plantearse que una decisión sea la de excluir el fuego voluntariamente a todo coste o, por el contrario, que se admita bajo ciertas condiciones. Y, de ser así, dónde y cuando debe aceptarse que un incendio pueda ser el resultado de objetivos de gestión claramente establecidos. En algunos casos la decisión será la de parar el incendio, en otros, cuando los valores en juego no sean importantes, o menos importantes que los recursos necesarios para detener el fuego, o faciliten minimizar un riesgo mayor, la decisión puede que sea la de tolerar el fuego. Puede, incluso, que haya que considerar introducirlo bajo condiciones controladas. No existe receta única para todos los ecosistemas forestales españoles ni para todas las situaciones que se producirán. Por ello, debe implantarse un sistema de gestión flexible, con objetivos bien marcados, que salvaguarde todos los valores en juego, en primer lugar las vidas y bienes de las personas, y tienda a asegurar la sostenibilidad ecológica del sistema. Ante escenarios de mayor peligro la política de exclusión total de fuego puede simplemente no ser posible, ni deseable por la cantidad de recursos que ésta demandará para conseguir unas eficiencias que, en última instancia, nunca llegarán a cumplir los objetivos deseados (Piñol *et al.* 2004). Por tanto, el cambio climático debe abrir una reflexión acerca de las políticas de prevención y lucha contra incendios.

12.C.9.2. Conservación de la biodiversidad

Actualmente, las políticas de conservación raramente incluyen al fuego como elemento de gestión de los territorios protegidos. Además, no existen modelos aplicados a los ecosistemas que se protegen que permitan anticiparse al impacto de un incendio. Tampoco existen predicciones acerca de los impactos que puede ocasionar la propia gestión para la conservación, y menos de cómo el cambio climático interaccionará con el fuego. Consecuentemente, es necesario elaborar modelos ajustados a los ecosistemas que se protegen, que tengan en cuenta la eventualidad, no ya de un incendio, sino de situaciones de peligro que incrementen la frecuencia, intensidad o magnitud de los incendios. La valoración de la vulnerabilidad de los ecosistemas y especies protegidas frente al fuego es imperiosa.

12.C.9.3. Lucha contra la desertificación

Una parte del territorio español, sobre todo del Este peninsular, se ve afectado por procesos de desertificación (Puigdefábregas y Mendizábal 1998). Por demás, los incendios forestales son una causa reconocida de la desertificación. La lucha contra la desertificación, sobre todo en las zonas con menor cubierta vegetal, se encuentra con una encrucijada de difícil solución. Por una parte, la falta de cubierta vegetal causa pérdida de suelo. Por otra, una cubierta vegetal abundante aumenta el riesgo de incendio. En este dilema el peor escenario posible es uno de incendios frecuentes, dado que la eliminación transitoria de la cubierta vegetal puede acarrear pérdidas crecientes de suelo y nutrientes. Por ello, ante escenarios de un incremento del peligro es necesario desarrollar modelos que simulen los procesos implicados y sirvan de guía para la gestión de estos territorios.

12.C.9.4. Ordenación del territorio en zonas sometidas a riesgo de incendio

El aumento del bienestar en las últimas décadas, y las nuevas tendencias de conquistar parte del monte como zona residencial, suponen una situación nueva en nuestro entorno. Esta tendencia es previsible que siga en aumento, sobre todo en aquellas zonas donde la falta de suelo urbanizable es más acuciante, como la costa y zonas residenciales de montaña. De nuevo, un futuro de peligro de incendio creciente puede poner en grave riesgo zonas residenciales que antaño eran menos peligrosas. Por tanto, la planificación de estas zonas ha de hacerse teniendo en cuenta el peligro de incendio ante los escenarios de cambio climático.

12.C.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Es necesario afinar nuestro conocimiento de las condiciones sinópticas que se correlacionan con situaciones de alto peligro de incendio. Este requiere el estudio de los registros meteorológicos del pasado. Con conocimientos más ajustados será posible organizar la alerta de los equipos de lucha contra el fuego con anticipación de incidentes de incendio.

Se precisan datos de monitorización de la cantidad, naturaleza y condición de los combustibles en todas las áreas susceptibles al fuego. Estos datos necesitan ser trasladados a formatos que permitan a los equipos de lucha contra incendios y a los gestores una valoración de los momentos y lugares en los que los incendios suponen riesgos mayores. El registro de áreas quemadas debe actualizarse todos los años. Es precisa conocer qué se quema, dónde y con qué frecuencia, a fin de evaluar los riesgos de incendios recurrentes sobre el mantenimiento de la integridad de los ecosistemas. Los riesgos de situaciones del tipo "peor escenario posible" deben evaluarse con objeto de tener una mejor idea de los riesgos emergentes.

Las proyecciones de los GCM suficientemente precisas en el espacio y tiempo para poder ser útiles en la gestión y supresión. Por ello, es preciso progresar en la proyección de los GCM al detalle espacial y temporal requerido. Igualmente, se necesita disponer de escenarios socioeconómicos adaptados a la realidad de España.

Necesitamos conocer al fuego en un contexto paisajístico. Debemos mejorar nuestro conocimiento de cómo las actuaciones del gestor afectar a la susceptibilidad al fuego de los paisajes. La protección de ciertos elementos paisajísticos necesita ser considerada de forma particular. Necesitamos avanzar en el conocimiento de la interacción entre incendios y paisaje, pues es la base de la ordenación forestal. Deben abordarse estudios que permitan verificar en qué medida las condiciones de peligro hacen al paisaje más o menos relevante frente al fuego. La investigación y desarrollo de técnicas de gestión de los ecosistemas amenazados por los incendios debe progresar en la perspectiva de un manejo multifuncional de nuestros montes que debe dar respuesta a múltiples amenazas y objetivos.

El impacto de los incendios forestales sobre la capacidad de los ecosistemas para fijar o liberar C es aún una asignatura pendiente. Se precisan medidas directas de los flujos de C en diferentes ecosistemas así como de los factores que los controlan y su interacción con el fuego.

La climatología adversa, en concreto la sequía, no sólo aumenta el peligro de incendio, sino que puede tener otros efectos adversos. Por ejemplo, el contenido en humedad del suelo afecta a la germinación y establecimiento de las plantas, así como a su hidratación, lo que determina la su capacidad de respuesta al fuego u otras perturbaciones (Cruz *et al*. 2002, Quintana *et al*. 2004). Precisamos conocer con más detalle cómo varía la respuesta de las plantas a situaciones extremas, particularmente de sequía. Dado que la ventana temporal para el establecimiento de algunas especies es limitada, cuándo no llueve puede ser más relevante que cuánto llueve, si no lo hace en el tiempo oportuno. Simulaciones experimentales en varios

ecosistemas pueden darnos la pauta de lo que cabe esperar ante la eventualidad de sequías extremas.

La valoración del estado de los combustibles, de su biomasa y humedad, en relación con el clima, y a escalas de detalle temporal y espacial es elemental para poder anticipar situaciones de máxima peligrosidad en el tiempo y en el espacio.

Poco sabemos sobre los aspectos sociológicos de los incendios forestales. Dado que las acciones de las personas son tan importantes en todo lo que concierne al fuego, es necesario entender hasta qué punto los cambios en las actitudes públicas o en las acciones privadas pueden mejorar o exacerbar cambios en el régimen de incendios debido al cambio climático.

Finalmente, es necesario aplicar escenarios de cambio climático, peligro e impacto de los incendios en las áreas protegidas con objeto de valorar su vulnerabilidad ante el peligro creciente de incendios forestales.

12.C.11. BIBLIOGRAFÍA

Andreu V., Rubio J.L., Forteza J., y Cerni R. 1996. Postfire effects on soil properties and nutrient losses International Journal of Wildland Fire 6: 53-58.

Andrews P.L., Loftsgaarden D.O., y Bradshaw L.S. 2003. Evaluation of fire danger rating indexes using logistic regression and percentile analysis. International Journal of Wildland Fire 12: 213-226.

Anónimo (varios años). Memorias estadísticas anuales sobre incendios incendios forestales en España. Area de Lucha Contra Incendios, Dirección General para la Biodiversidad, MIMAM, España.

Baeza M.J., de Luis M., Raventós J. y Escarré A. 2002. Factors influencing fire behaviour in shrublands of different stand ages and the implications for using prescribed burning to reduce wildfire risk Journal of Environmental Management 65: 199-208.

Baeza, M.J., Raventós J., Escarré A. y Vallejo V.R. 2003. The effect of shrub clearing on the control of the fire-prone species *Ulex parviflorus.* Forest Ecology and Management 186: 47–59.

Bardají M., Molina D.M. y Castellnou M. 1998. Probability of larger fires: structural and meterological components. En: D. X. Viegas (Ed.), Proceedings of the III International Conference on forest Fire Research, Coimbra, Portugal, pgs. 959-974.

Bautista S., Bellot J. y Vallejo V.R. 1996. Mulching treatment for postfire soil conservation in a semiarid ecosystem. Arid Soil Research and Rehabilitation 10: 235-242.

Bellot J., Maestre F.T., Chirino E., Hernández N. y de Urbina J.O. 2004. Afforestation with *Pinus halepensis* reduces native shrub performance in a Mediterranean semiarid area Acta Oecologica- International Journal of Ecology 25: 7-15.

Brown T.J., Hall B.L. y Westerling A.L. 2004. The impact of twenty-first century climate change on wildland fire danger in the western United States: An applications perspective. Climatic Change 62: 365-388.

Carcaillet C., Almquist H., Asnong H., Bradshaw R.H.W., Carrion J.S., Gaillard M.J., Gajewski K., Haas J.N., Haberle S.G., Hadorn P., Muller S.D., Richard P.J.H., Richoz I., Rosch M., Goñi M.F.S., von Stedingk H., Stevenson A.C., Talon B., Tardy C., Tinner W., Tryterud E., Wick L. y Willis K.J. 2002. Holocene biomass burning and global dynamics of the carbon cycle. Chemosphere 49: 845-863.

Carlson J.D., Burgan R.E., Engle D.M. y Greenfield J.R. 2002. The Oklahoma Fire Danger Model: An operational tool for mesoscale fire danger rating in Oklahoma. International Journal of Wildland Fire 11: 183-191.

Carrión J.S. y van Geel B. 1999. Fine-resolution Upper Weichselian and Holocene palynological record from Navarrés (Valencia, Spain) and a discussion about factors of Mediterranean forest succession. Review of Palaeobotany and Palynology 106: 209-236.

Carrión J.S., Sanchez-Gómez P., Mota J.F., Yll R. y Chain C. 2003 Holocene vegetation dynamics, fire and grazing in the Sierra de Gádor, southern Spain. Holocene 13: 839-849.

Castro F.X., Tudela A. y Sebastià M.T. 2003. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). Agricultural and Forest Meteorology 116: 49-59.

Chuvieco E., Aguado I., Cocero D. y Riaño D. 2003. Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR images in forest fire danger studies International Journal of Remote Sensing 24: 1621-1637.

Clark J.S. 1988. Effect of climate change on fire regimes in Northwestern Minnesota. Nature 334: 233-235.

Cruz A., Pérez B., Quintana J.R. y Moreno J.M. 2002. Resprouting in the Mediterranean-type shrub *Erica australis* affected by soil resource availability. Journal of Vegetation Science 13: 641-650.

da Camara C.C., Lajas D., Gouveia C. y Pereira J.M.C. 1998. A statistical model for prediction of burned areas by wildfires based on circulation types affecting Portugal. En: D. X: Viegas (Ed.), Proceedings of the III International Conference on forest Fire Research, Coimbra, Portugal, pgs.1199-1206.

de Luis M., González-Hidalgo J.C. y Raventós J. 2003. Effects of fire and torrential rainfall on erosion in a Mediterranean gorse community. Land Degradation and Development 14: 203-213.

de Pablo F. y Soriano L.R. 2002. Relationship between cloud-to-ground lightning flashes over the Iberian Peninsula and sea surface temperature. Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 128: 173-183 Part A.

Díaz-Delgado R., Lloret F., Pons X., y Terradas J. 2002. Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires. Ecology 83: 2293-2303.

Díez E.L.G., Soriano L.R., Dávila F.D. y Díez A.G. 1994. An objective forecasting-model for the daily outbreak of forest--fires based on meteorological considerations. Journal of Applied Meteorology 33: 519-526.

Díez E.L.G., Soriano L.R., de Pablo F. y Díez A.G. 2000. Prediction of the daily number of forest fires. International Journal of Wildland Fire 9: 207-211.

Duguy B. 2003. Interacción de la historia de usos del suelo y el fuego en condiciones mediterráneas: Respuesta de los ecosistemas y estructura del paisaje. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona.

Easterling D.R., Horton B., Jones P.D., Peterson T.C., Karl T.R., Parker D.E., Salinger M.J., Razuvayev V., Plummer N., Jamason P. y Folland C.K. 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe Science 277: 364-367.

Elvira L.M. y Hernando C. 1989. Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque. Monografía INIA, Madrid. 99 pgs.

Faraco A.M., Fernández F. y Moreno J.M. 1993. Postfire vegetation dynamics of pine woodlands and shrublands in Sierra de Gredos, Spain. En: Trabaud L. y Prodon R. (Eds.). The Role of Fire in Mediterranean Ecosystems. Commission of the European Communities, Ecosystems Research Report 5:101-112.

Fernández Alés R., Martín A., Ortega F. y Alés E.E. 1992. Recent changes in landscape structure and function in a Mediterranean region of Spain 1950-1984. Landscape Ecology 7: 3-18.

Fernández-Palacios J.M. 1992. Climatic responses of plant species on Tenerife, The Canary-Islands. Journal of Vegetation Science 3: 595-602.

Figueroa M.E. y Davy A.J. 1991. Response of Mediterranean grassland species to changing rainfall. Journal of Ecology 79: 925-941.

Filella I. y Peñuelas J. 2003. Partitioning of water and nitrogen in co-occurring Mediterranean woody shrub species of different evolutionary history. Oecologia 137: 51-61.

Flannigan M.D., Bergeron Y., Engelmark O. y Wotton B.M. 1998. Future wildfire in circumboreal forests in relation to global warming. Journal of Vegetation Science 9: 469-476.

Fried J.S., Torn M.S. y Mills E. 2004. The impact of climate change on wildfire severity: A regional forecast for northern California. Climatic Change 64: 169-191.

García-Herrera R., Gallego D., Hernández E., Gimeno L., Ribera P. y Calvo N. 2003. Precipitation trends in the Canary Islands. International Journal of Climatology 23: 235-241.

García-Ruiz J.M., Lasanta T., Ruiz Flano P., Ortigosa L., White S., González C. y Martí C. 1996. Land-use changes and sustainable development in mountain areas. A case study in the Spanish Pyrenees. Landscape Ecology 11: 267-277.

Gavilán R. y Fernández-González F. 1997. Climatic discrimination of Mediterranean broad-leaved sclerophyllous and deciduous forests in central Spain. Journal of Vegetation Science 8: 377-386.

Gómez-Tejedor J.A., Estrela M.J. y Millán M.M. 2000. A mesoscale model application to fire weather winds. International Journal of Wildland Fire 9: 255-263.

Goñi M.F.S. y Hannon G.E. 1999. High-altitude vegetational pattern on the Iberian Mountain Chain (north-central Spain) during the Holocene. Holocene 9: 39-57.

González-Alonso F., Cuevas J.M., Calle A., Casanova J.L. y Romo A. 2004 Spanish vegetation monitoring during the period 1987-2001 using NOAA-AVHRR images. International Journal of Remote Sensing 25: 3-6.

González-Alonso F., Cuevas J.M., Casanova J.L., Calle A. y Illera P. 1997. A forest fire risk assessment using NOAA AVHRR images in the Valencia area, eastern Spain. International Journal of Remote Sensing 18: 2201-2207.

González-Hidalgo J.C., de Luis M., Raventós J. y Sánchez J.R. 2001. Spatial distribution of seasonal rainfall trends in a western Mediterranean area. International Journal of Climatology 21: 843-860.

Goodess C.M. y Jones P.D. 2002. Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall. International Journal of Climatology 22: 1593-1615.

Gratani L. y Varone L. 2004. Leaf key traits of *Erica arborea* L., *Erica multiflora* L. and *Rosmarinus officinalis* L. co-occurring in the Mediterranean maquis. Flora 199: 58-69.

Green D.G., Tridgell A. y Gill A.M. 1990. Interactive simulation of the bushfires in heterogeneous fuels. Mathematical and Computer Modelling 13: 57-66.

Haines D. (1988). Lower atmospheric severity index (LASI) for wildland fires. USDA Forest Service. R.M. Research Station.

Hodar J.A., Castro J. y Zamora R. 2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. Biological Conservation 110: 123-129.

Hulme M. y Carter T.R. 2000. The changing climate of Europe. En: M. Parry (Ed.), Assessmentof Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK. pgs. 47–84.

Johnson E.A. y Wowchuk D.R. 1993. Wildfires in the Southern Canadian Rocky-Mountains and their relationship to midtropospheric anomalies. Canadian Journal of Forestry Research 23: 1213-1222.

Johnson E.A., Miyanishi K. y Bridge S.R.J. 2001. Wildfire regime in the boreal forest and the idea of suppression and fuel buildup. Conservation Biology 15: 1554-1557.

Keeley J.E. y Fotheringham C.J. 2001. History and management of crown-fire ecosystems: a summary and response. Conservation Biology 15: 1561-1567.

Levine J.S. (ed.) 1991. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications. The MIT Press, Cambridge, MA.

Lloret F. y Mari G.A. 2001 Comparison of the medieval and the current fire regimes in managed pine forests of Catalonia (NE Spain). Forest Ecology and Management 141: 155-163.

Lloret F., Calvo E., Pons X. y Díaz-Delgado R. 2002. Wildfires and landscape patterns in the Eastern Iberian Peninsula. Landscape Ecology 17: 745-759.

Lloret F., Pausas J.G. y Vilà M. 2003 Responses of Mediterranean plant species to different fire frequencies in Garraf Natural Park (Catalonia, Spain): field observations and modelling predictions. Plant Ecology 167: 223-235.

Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M., y Wanner H. 2004. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. Science 303: 1499-1503.

Maestre F.T., Bautista S., Cortina J. y Bellot J. 2001. Potential for using facilitation by grasses to establish shrubs on a semiarid degraded steppe. Ecological Applications 11: 1641-1655.

Martell D.L. 2001. Forest Fire Management. En: Johnson E.A. (Ed.), Forest Fires Behaviour and Ecological Effects. Academic Press, Orlando, FL.. pgs. 527-575.

Martínez-Fernández J. y Ceballos A. 2003. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. Soil Science Society of America Journal L 67: 1647-1656

Martínez-Vilalta J., Mangirón M., Ogaya R., Sauret M., Serrano L., Peñuelas J. y Piñol J. 2003. Sap flow of three co-occurring Mediterranean woody species under varying atmospheric and soil water conditions. Tree Physiology 23: 747-758.

Mediavilla S. y Escudero A. 2003a. Stomatal responses to drought at a Mediterranean site: a comparative study of co-occurring woody species differing in leaf longevity Tree Physiology 23: 987-996.

Mediavilla S. y Escudero A. 2003b. A Leaf life span differs from retention time of biomass and nutrients in the crowns of evergreen species. Functional Ecology 17: 541-548.

Mérida J.C. 2000. Factores meteorológicos. En: Vélez R. (coord.), La Denfensa contra Incendios Forestales: Fundamentos y Experiencias. McGraw Hill, Madrid, págs. 8.1-8.8.

Millán M., Estrela M.J. y Badenas C. 1998. Synoptic analysis of meteorological processes relevant to forest fire dynamics on the Spanish Mediterranean coast. En: Moreno J.M. (Ed.), Large Forest Fires. Backhuys, Leiden, The Netherlands. pgs. 1-30.

Minnich R. A. 1998. Landscapes, land-use and fire policy: where do large fires come from? En: Moreno J.M. (Ed.), Large Forest Fires, Backhuys, Leiden, NL. pgs. 133-158.

Minnich R.A. 1983. Fire Mosaics in Southern-California and Northern Baja California. Science 219: 1287-1294.

Moreira F., Ferreira P.G., Rego F.C. y Bunting S. 2001. Landscape changes and breeding bird assemblages in northwestern Portugal: the role of fire. Landscape Ecology 16: 175-187.

Moreno J.M. y Cruz A. 2000. La respuesta de las plantas al fuego. En: Vélez R. (coord.), La Defensa contra Incendios Forestales. Fundamentos y Experiencias. Mc Graw Hill, Madrid. pgs. 413-436.

Moreno J.M., Pineda F.D. y Rivas-Martínez S. 1990. Climate and vegetation at the Eurosiberian-Mediterranean boundary in the Iberian Peninsula. Journal of Vegetation Science 1: 233-244.

Moreno J.M., Vázquez A. y Vélez R. 1998. Recent History of Forest Fires in Spain. En: Moreno J. M. (Ed.), Large Forest Fires. Backhuys Publishers, Leiden, NL. pgs. 159-185.

Moreno J.M. 1999. Forest fires in the Mediterranean Region: Trends and implications in a desertification-prone area. En: Balabanis P. y Peter D. (eds.), Desertification in the Mediterranean, EU Report Series.

Moritz M.A., Keeley J. E., Johnson E.A. y Schaffner A.A. 2004. Testing a basic assumption of shrubland fire management: how important is fuel age? Frontiers in Ecology and Environment 2: 67-72.

Mouillot F., Rambal S. y Joffre R. 2002. Simulating climate change impacts on fire- frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. Global Change Biology 8: 423-437.

Mouillot F., Ratte J.P., Joffre R., Moreno J.M. y Rambal S. 2003. Some determinants of the spatio-temporal fire cycle in a Mediterranean landscape (Corsica- France) and its consequences on long-term vegetation dynamics. Landscape Ecology 18: 665-674.

Muñoz-Díaz D. y Rodrigo F.S. 2003. Effects of the North Atlantic oscillation on the probability for climatic categories of local monthly rainfall in southern Spain. International Journal of Climatology 23: 381-397.

Nash C.H. y Johnson E.A. 1996 Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests. Canadian Journal of Forest Research 26: 1859-1874.

New M., Lister D., Hulme M. y Makin I. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. Climate Research 21: 1-25.

Núñez -Regueira L., Proupín-Castineiras J. y Rodríguez-Añon J.A. 2000. Design of risk index maps as a tool to prevent forest fires in the hill-side zone of Galicia (NW Spain). Bioresource Technology 73: 123-131.

Núñez-Regueira L., Rodríguez J., Proupín J. y Mouriño B. 1999 Design of forest biomass energetic maps as a tool to fight forest wildfires. Thermochimica Acta 328: 111-120.

Ojeda F., Arroyo J. y Marañón T. 1998. The phytogeography of European and Mediterranean heath species (Ericoideae, Ericaceae): a quantitative analysis. Journal of Biogeography 25: 165-178.

Pausas J.G. 1999. The response of plant functional types to changes in the fire regime in Mediterranean ecosystems. A simulation approach. Journal of Vegetation Science 10: 717-722.

Pausas J.G. 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin) Climatic Change 63: 337-350.

Pausas J.G., Bladé C., Valdecantos A., Seva J.P., Fuentes D., Alloza J.A., Vilagrosa A., Bautista S., Cortina J. y Vallejo R. 2004. Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes in Spain: New perspectives for an old practice - a review. Plant Ecology 171: 209-220.

Peñalba M.C. 1994. The history of the Holoce vegetation in Northern Spain from pollen analysis. Journal of Ecology 82: 815-832.

Peñuelas J. y Boada M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). Global Change Biology 9: 131-140.

Peñuelas J., Lloret F. y Montoya R. 2001. Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain. Forest Science 47 (2): 214-218.

Pérez B ., Cruz A., Fernández-González F. y Moreno J.M. 2003. Effects of the recent land-use history on the postfire vegetation of a uplands in Central Spain. Forest Ecology and Management 182: 273-283.

Piñol J., Terradas J. y Lloret F. 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. Climatic Change 38 (3): 345-357.

Piñol J., Beven K. y Viegas D.X. 2004. Modelling the effect of fire-exclusion and prescribed fire on wildfire size in Mediterranean ecosystems. Ecological Modelling (en prensa).

Prentice I.C., Heimann M. y Sitch S. 2000. The carbon balance of the terrestrial biosphere: Ecosystem models and atmospheric observations. Ecological Applications 10: 1553-1573.

Price C. y Rind D. 1994. The impact of a 2-X-CO_2 climate on lightning-caused fires. Journal of Climate 7: 1484-1494.

Puigdefábregas J. y Mendizábal T. 1998. Perspectives on desertification: western Mediterranean. Journal of Arid Environments 39: 209-224.

Quintana J.R., Cruz A., Fernández-González F. y Moreno J.M. 2004. Time of germination and establishment success after fire of three obligate seeders in a Mediterranean shrubland of central Spain. Journal of Biogeography 31: 241-249.

Rambal S. y Hoff C. 1998. Mediterranean ecosystems and fire: the threats of global change. En: Moreno J.M. (Ed.), Large Forest Fires. Backhuys Publishers, Leiden, NL. pgs. 187-214.

Riaño D., Meier E., Allgower B., Chuvieco E. y Ustin S.L. 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. Remote Sensing of Environment 86: 177-186.

Rivas-Martínez S. 1987. Vegetación de España. ICONA Serie Técnica. Ministerio de Agricultura, Madrid.

Rodrigo A., Retana J. y Picó F.X. 2004. Direct regeneration is not the only response of Mediterranean forests to large fires. Ecology 85: 716-729.

Rodríguez Murillo J.C.R. 1997. Temporal variations in the carbon budget of forest ecosystems in Spain. Ecological Applications 7: 461-469.

Rodríguez y Silva F. 1998. Bases técnicas para la elaboración de un plan regional de quemas prescritas, aplicación a la comunidad autónoma de Andalucía. Actas de la reunión sobre quemas prescritas. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 9: 253-264.

Rodríguez y Silva F. 2004. Análisis económico aplicado al control de la carga de combustibles en ecosistemas forestales mediterráneos. Quemas prescritas, una alternativa frente a los métodos mecánicos. En: Actas del II Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación y Economía en la Defensa contra los Incendios Forestales, Córdoba, ES.

Sabaté S., Gracia C.A. y Sánchez A. 2002. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, Pinus pinaster, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. Forest Ecology and Management 162: 23-37.

Santos L., Romaní J.R.V. y Jalut G. 2000. History of vegetation during the Holocene in the Courel and Queixa Sierras, Galicia, northwest Iberian Peninsula. Journal of Quaternatry Science 15: 621-632.

Sanz-Elorza M., Dana E.D., González A. y Sobrino E. 2003. Changes in the high-mountain vegetation of the central Iberian peninsula as a probable sign of global warming. Annals of Botany 92: 273-280.

Schär C., Vidale P.L., Luthi D., Frei C., Haberli C., Liniger M.A. y Appenzeller C. 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427: 332-336.

Soriano L.R. y de Pablo F. 2002. Maritime cloud-to-ground lightning: The western Mediterranean Sea. Journal of Geophysical Reseach-Atmosphere 107 (D21): Art. No. 4597.

Soriano L.R., de Pablo F. y Díez E.G. 2001a Cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula: 1992-1994. Journal of Geophysical Reseach-Atmosphere 106 (D11): 11891-11901.

Soriano L.R., de Pablo F. y Díez E.G. 2001b. Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula. Monthly Weather Review 129: 2998-3003.

Soto B. y Díaz-Fierros F. 1998. Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. Catena 31: 257-270.

Tomás C., de Pablo F. y Soriano L.R. 2004. Circulation weather types and cloud-to-ground flash density over the Iberian Peninsula. International Journal of Climatology 24: 109-123.

Torre I. y Díaz M. 2004. Small mammal abundance in Mediterranean post-fire habitats: a role for predators? Acta Oecologica 25: 137-142.

Torn M.S. y Fried J.S. 1992. Predicting the impacts of global warming on wildland fire. Climatic Change 21: 257-274.

Trabaud L. y Galtiè J.F. 1996. Effects of fire frequency on plant communities and landscape pattern in the Massif des Aspres (southern France) 1996. Landscape Ecology 11: 215-224.

Trabaud L. 1976. Inflamabilité et combustilité des principales espéces des garrigues de la region méditerranéenne. Oecologia Plantarum 11: 117-136.

Valbuena, L., Núñez R. y Calvo L. 2001. The seed bank in *Pinus* stand regeneration in NW Spain after wildfire. Web Ecology 2: 22–31.

Valette J.C. 1988. Inflamabilité, teneur en eau et turgewcence relative de quatre espéces méditerranéennes. Documentos del Seminario sobre métodos y equipos para la prevención de incendios forestales, ICONA, Madrid. pgs. 98-107.

Vallejo R.V. y Alloza J.A. 1998. The restoration of burned lands: the case of eastern Spain. En: Moreno J.M. (Ed.). Large Forest Fires. Backhuys Publishers, Leiden, NL. pgs. 91-108.

Vázquez A. y Moreno J.M. 1993. Sensitivity of fire occurrence to meteorological variables in Mediterranean and Atlantic areas of Spain. Landscape and Urban Planning 24: 129-142.

Vázquez A. y Moreno J.M. 1995. Patterns of fire occurrence across a climatic gradient and its relationship to meteorological variables in Spain. En: Moreno J.M. y Oechel W.C. (Eds.), Global Change and Mediterranean-Type Ecosystems. Springer-Verlag, Ecological Studies 117. pgs. 408-434.

Vázquez A. y Moreno J.M. 2001. Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (Central Spain). Forest Ecology and Management 147: 55-65.

Vázquez A. y Moreno J.M. 1998a. Fire frequency and fire rotation period in areas with different potential vegetation type in peninsular Spain. En: Trabaud L. (Ed.), Fire Management and Landscape Ecology. International Association of Wildland Fire, Fairfield, WA. pgs. 305-313.

Vázquez A. y Moreno J.M. 1998b. Patterns of lightning-, and people-caused fires in peninsular Spain. International Journal of Wildland Fire 8: 103-115.

Vázquez A., Pérez B., Fernández-González F. y Moreno J.M. 2002. Forest fires characteristics and potential natural vegetation in peninsular Spain during the period 1974-1994. Journal of Vegetation Science 13: 663-676.

Vega García C. 2003. Evolución del riesgo estructural de incendios forestales en la comarca del Alto Mijares (Castellón de la Plana) mediante índices de ecología del paisaje y teledetección. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá de Henares, Alcalá de Henares, Madrid.

Vega J.A. 2000. Resistencia vegetativa ante el fuego a través de la historia de los incendios. En Vélez R. (coord.) La Defensa contra Incendios Forestales: Fundamentos y experiencias. McGraw Hill, Madrid, ES. pgs. 4.66-4.84.

Velez R. 2000a. Perspectiva histórica de los incendios forestales en España. En: Vélez R. (coord.) La Defensa contra Incendios Forestales: Fundamentos y experiencias. McGraw Hill, Madrid, España., pags. 3.15-3.31.

Vélez R. 2000b. Motivaciones de los incendios intencionados. En: Vélez R. (coord.) La Defensa contra Incendios Forestales:Fundamentos y experiencias. McGraw Hill, Madrid, España., pags. 3.31-3.52.

Vélez R. 2000c. Los índices meteorológicos de peligro. En: Vélez R. (coord.) La Defensa contra Incendios Forestales:Fundamentos y experiencias. McGraw Hill, Madrid, España., pags. 8.10-8.28.

Vicente-Serrano S.M., González-Hidalgo J.C., de Luis M.J. y Raventós J. 2004. Drought patterns in the Mediterranean area: The Valencia region (East-Spain). Climate Research 26: 1-15.

Viedma O. y Moreno J.M. Landscape structure and fire interactions in a Mediterranean, fire-prone area of Central Spain. Enviado.

Viegas D.X., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A. y Sol B. 2000. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. International Journal of Wildland Fire 9: 235-246.

Viegas D.X., Piñol J., Viegas M.T. y Ogaya R . 2001 Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. International Journal of Wildland Fire 10: 223-240.

Viegas D.X. 1998. Weather, fuel status and fire occurrence: predicting large fires. En: Moreno J.M. (Ed.), Large Forest Fires. Backhuys, Leiden, NL. pgs. 31-48.

Williams A.A.J., Karoly D.J. y Tapper N. 2001. The sensitivity of Australian fire danger to climate change. Climatic Change 49: 191-191.

13. IMPACTOS SOBRE EL SECTOR ENERGÉTICO

Juan Manuel López Zafra, Luis Jesús Sánchez de Tembleque y Vicente Meneu Ferrer

Contribuyentes

E. Ardines Tomás, R. Gimeno Nogués, R. Mateos de Cabo, A. Pardo Tornero, S. de Paz Cobo, E. Valor Micó

Revisores

F. Ayala Carcedo, M. Fernández, X. Labandeira, G. Maganto, J. A. Moreno Delgado, I. Pérez Arriaga, F. Sánchez Sudón, A. L. Vivar

E. Alonso Pelegrín, T. Trouve

RESUMEN

Del sector energético dependen prácticamente todos los sectores económicos del país, por lo que debe ser considerado como un sector estratégico.

España tiene una enorme dependencia energética internacional de petróleo y sus derivados y de gas natural, no tanto en hidroelectricidad y otras energías renovables; por otro lado, nuestro país ha tenido históricamente uno de los niveles más reducidos de intensidad energética primaria con relación a Europa, y tiene también un menor consumo energético per cápita.

En los últimos años, los mayores incrementos de demanda de energía eléctrica se han producido en las zonas Sur, Levante y Centro, y se prevé que esta tendencia continúe en los próximos años.

El sector energético es uno de los responsables del cambio climático, pero a su vez también éste incide en él. Se detecta fundamentalmente una relación de dependencia de los consumos de gas natural (en invierno) y de electricidad (todo el año) respecto de la temperatura del aire; así, inviernos más cálidos provocarían menores consumos de ambos mientras que veranos más calurosos provocarían incrementos en la demanda de electricidad; se observa una pauta creciente en la demanda media de energía eléctrica ante variaciones positivas (negativas) de un grado centígrado en la temperatura en verano (invierno).

La previsible disminución de precipitaciones afectará a la estructura de la oferta de hidroelectricidad, así como a determinadas centrales térmicas y nucleares refrigeradas en circuito abierto.

La cogeneración, la energía eólica y los ciclos combinados que utilizan gas natural (que es una fuente energética menos contaminante) representan una cierta alternativa. El resto de las renovables se encuentran aún en fases iniciales de aprovechamiento.

En los últimos años se están presentados múltiples propuestas administrativas para el fomento tanto de las energías renovables como para el incremento de la eficiencia energética, como el Plan de Fomento de las Energía Renovables, y la Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética, asimismo, se detectan actuaciones de los mercados financieros para paliar los efectos que las oscilaciones climáticas pueden provocar en los distintos sectores económicos.

Se presentan distintos indicadores para la detección del cambio climático en su relación con el sector energético; cabe destacar, entre ellos, el consumo de energía final y la intensidad energética final, así como los referidos específicamente a electricidad, sobre todo los consumos doméstico e industrial tanto en refrigeración como en calefacción; son necesarias, sin embargo, ciertas modificaciones en la información suministrada por las compañías, así como un análisis en profundidad de los factores que intervienen en la evolución de los indicadores y las repercusiones particulares del cambio climático en cada sector de actividad económica.

13.1. INTRODUCCIÓN

El sector energético, entendido como el sector de transformación y comercialización de la energía, es posiblemente una de las piezas clave dentro del engranaje económico, al depender de él prácticamente todos los demás. Asimismo, es el causante de un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero. De hecho, según el *Annual European Community Greenhouse Gas Inventory 1990-2001,* de la Agencia Europea del Medio Ambiente, en 2001 el sector de transformación de la energía fue responsable del 33% de las emisiones de CO_2, mientras que el transporte lo fue del 25% y la utilización de los combustibles fósiles como energía primaria en la industria originó el 17% de las emisiones. Por otra parte presenta cierta flexibilidad técnica para abatir de forma importante estas emisiones cambiando el *mix* de generación. En el presente capítulo no se abordan las causas de las emisiones de este sector, sino el posible efecto que el cambio climático pueda tener en él, tanto en las fuentes de energía primarias que utiliza como en el proceso de transformación de éstas en energía final (la que la sociedad demanda, en forma de electricidad, de productos petrolíferos, de gas natural o de carbón).

El consumo energético crece a nivel mundial y seguirá creciendo en un futuro cercano. En España también, incluso con tasas muy superiores a las de los países de nuestro entorno. Además, nuestras tasas de crecimiento energético están por encima de las tasas de crecimiento de nuestro Producto Interior Bruto, lo que denota, en una primera aproximación, que la eficiencia, en la utilización energética para generar una unidad de riqueza, está disminuyendo. Y esto, aunque cierto, debe ser matizado.

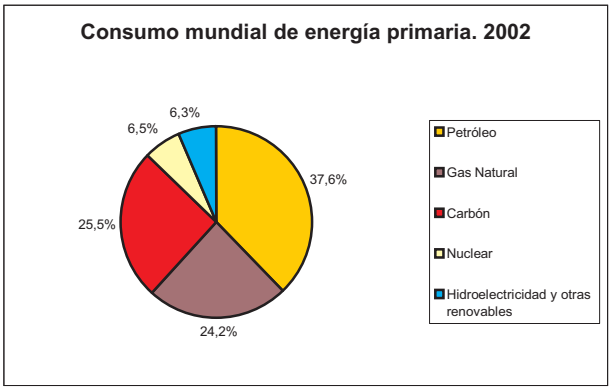
Por una parte, nuestro país ha tenido históricamente uno de los niveles más reducidos de intensidad energética primaria (relación entre el consumo de energía primaria y el Producto Interior Bruto) con relación a Europa, aunque en los últimos años se ha situado en la media europea, si se referencia a igualdad de poder de compra. También tiene un menor consumo energético per cápita.

Por otra parte, si bien en los últimos años se ha producido una disminución de la intensidad energética en la industria, como consecuencia de las mejoras técnicas adoptadas y los desplazamientos hacia actividades menos intensivas, en los sectores residencial, comercial y de transporte, se ha experimentado un crecimiento con tasas muy importantes. La buena marcha de la economía ha propiciado un incremento del empleo y de la renta, lo que ha posibilitado un mayor equipamiento y una aproximación a las pautas de consumo europeas, tanto a nivel de los hogares como en el sector terciario. No obstante, el sector del transporte ha tenido un crecimiento espectacular como el de los demás países, pero en el caso español ha sido más acentuado, lo que ha llevado a alcanzar una de las mayores intensidades energéticas del transporte, fruto de la mayor utilización relativa del transporte por carretera frente al ferrocarril, y de hacerlo con mayores recorridos. Este comportamiento también se observa en la energía eléctrica, debido a sus buenas características de versatilidad, disponibilidad y de precio. En los últimos años, los mayores incrementos de demanda de energía eléctrica se han producido en las zonas Sur, Levante y Centro, y se prevé que esta tendencia continúe en los próximos años.

El petróleo es la principal fuente de energía primaria en España, pues cubre aproximadamente el 53% de las necesidades energéticas de nuestro país. El carbón y el gas natural son las otras dos fuentes más empleadas, representando el 17% y 14% respectivamente de la demanda energética total, con tendencias de evolución contrarias. No obstante, debe matizarse que 2002 fue un año especialmente seco lo que afectó negativamente a la hidraulicidad. A los inconvenientes que se derivan de depender mayoritariamente de una única fuente energética (petróleo), se une la problemática de que España es un país importador de la misma, dado que la producción nacional tan sólo cubre el 0,4% de las necesidades de crudo del país. Este

elevado grado de dependencia externa hace necesaria la implementación de una política energética que tenga como uno de sus pilares básicos el velar por la seguridad de suministro.

En la figura 13.1 podemos observar la importancia relativa tanto a nivel mundial como a nivel nacional del consumo de energía, según su fuente.



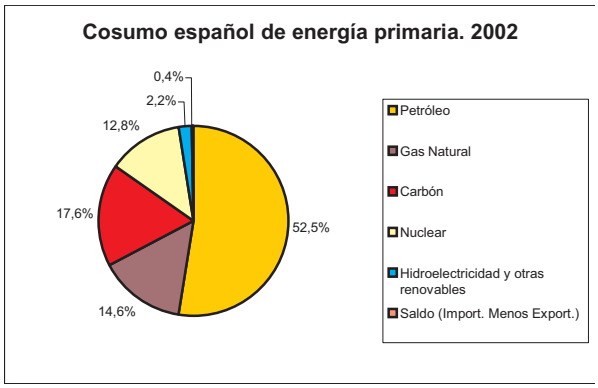


Fig. 13.1. *Fuentes: British Petroleum (2004); DGPEM (2003)*.

Además de la importancia relativa de cada fuente de energía respecto del consumo global en una fecha determinada, es conveniente tener una perspectiva de cuál ha sido la evolución del consumo de cada una de ellas respecto de la cantidad consumida en una fecha concreta. Esto permite conocer, en función de las perspectivas de abastecimiento, la posición en la que se encuentra nuestro país respecto de futuros problemas en el suministro de alguna de ellas, al ligar tal evolución tanto con las reservas mundiales de cada fuente y a su localización geoestratégica como con el coeficiente de autoabastecimiento. En la figura 13.2 se observa, sin lugar a error, cómo España ha incrementado su dependencia del petróleo desde el año 1973 (fecha escogida como base para todas las fuentes, por haber supuesto el origen de la primera crisis energética mundial); sin embargo, es destacable también el incremento que otras fuentes han tenido en el mismo período, particularmente el carbón, el gas natural y la energía nuclear.

Cinco son las fuentes principales de energía de las que nos ocuparemos en el presente informe: la electricidad (energía final), el petróleo, el gas natural, el carbón y las renovables de uso no eléctrico (fuentes de energía primarias).

Señalar, por último, que el sector energético es un sector estratégico en el que la garantía en el suministro es la pieza clave del sistema. Por ello, es un sector en el que ciertas actividades están reguladas por la Administración del Estado y en el que existe la figura del supervisor (Comisión Nacional de la Energía).

13.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

El cambio climático se manifiesta en general por un incremento de la temperatura media, que va acompañado de una evolución a la baja de las precipitaciones y de la humedad relativa del aire; de hecho, es bastante más complejo, pues Meteo France, por ejemplo, has mostrado que las variaciones climáticas son distintas en el norte que en el sur de Francia. Por otra parte, se pueden producir con mayor asiduidad e intensidad episodios atmosféricos extremos. Tal y como señala Ayala-Carcedo (2004) (ver también Capítulo 1), en España se detecta una tendencia a la baja estadísticamente significativa en la precipitación invernal en la serie 1947-

2000 a nivel peninsular, así como una tendencia al aumento de la frecuencia y severidad de episodios térmicos extremos.

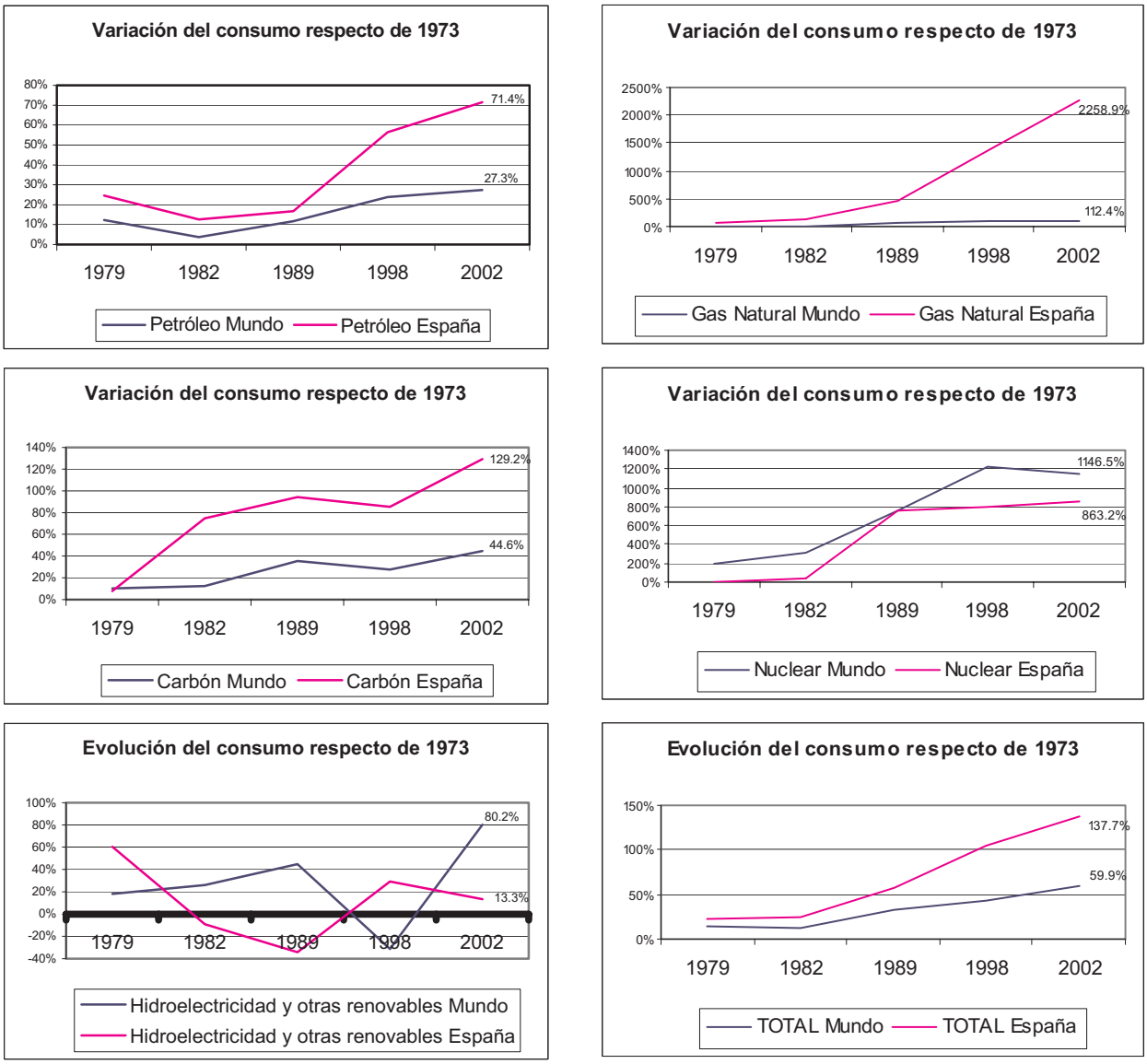


Fig. 13.2. *Fuente: elaboración propia a partir de British Petroleum (2004) y DGPEM (2003)*.

Una primera pregunta que debe ser contestada a la hora de analizar la sensibilidad del sector energético al clima actual es la de establecer cuáles son las variables climáticas que tienen una mayor influencia en el sector energético, entendido como el sector de la transformación y comercialización de la energía. De acuerdo con Lloyd's (1999), un incremento de tres grados en la temperatura provoca una variación de la demanda de energía del 10%. No debe olvidarse que al hablar de variables climáticas pueden tomarse en consideración una amplia variedad de magnitudes: temperatura (del aire o del suelo), horas de insolación, precipitaciones, velocidad del viento, humedad relativa, presión atmosférica, etc. Una vez detectadas las variables más influyentes, se tratará de analizar posibles cambios en su evolución capaces de afectar en el futuro al sector energético.

13.2.1. La electricidad

13.2.1.1. Demanda de electricidad

Como primera aproximación a la relación entre variables energéticas y climáticas se toma la electricidad como variable energética representativa. La electricidad es, según se ha comentado, una fuente secundaria de energía. A los efectos de realizar estudios, esta variable energética presenta la gran ventaja de la disponibilidad de amplias bases de datos sobre consumo de frecuencia temporal muy elevada (datos diarios, por lo general, y a partir de la creación del mercado OMEL, datos horarios de energía eléctrica negociada). La figura 13.3 recoge los gráficos de dispersión (*scatter*) que relacionan el consumo de electricidad (solo días laborables) con 6 variables climáticas relevantes expresadas en forma de índice: temperatura del aire ITE, velocidad del viento IVV, humedad relativa IHR, presión atmosférica IP, precipitación IPR e insolación IHS. Los índices se obtienen mediante metodología explicada en Valor et al (2001a y 2001b). Se distingue con los colores rojo y azul los días correspondientes al verano y al invierno pues marcan comportamientos del consumo diferenciados.

La pauta más clara de influencia de la climatología en el consumo aparece en el caso de la temperatura. Obsérvese en la primera figura de la fig. 13.3 una relación convexa de modo que los datos de invierno y de verano quedan claramente separados en dos subconjuntos: el asociado a temperaturas más altas corresponde al verano (puntos rojos) y el asociado a temperaturas inferiores al invierno (puntos azules). Aparece un valor mínimo que separa ambos conjuntos en, aproximadamente, 18ºC que corresponde a la temperatura que suele ser conocida como temperatura de confort (o intervalo de confort, si se consideran un entorno de temperaturas respecto al valor mínimo). La interpretación de este resultado es que en 18ºC el consumo de energía eléctrica es mínimo, incrementándose para temperaturas mayores y menores por la activación de aparatos de acondicionamiento de aire (en verano) y de calefacción (en invierno).

Las otras variables climáticas tienen una influencia menor o prácticamente nula en el consumo de electricidad, según se constata en los otros gráficos de dispersión, por lo que no van a ser tenidas en cuenta a lo largo de este apartado del estudio. En todo caso, la combinación entre algunas de ellas sí que puede tener alguna relevancia, por ejemplo, la temperatura y la velocidad del viento –*windchill*-, o la temperatura y la humedad relativa –*discomfort index*-. Obsérvese que, en todo caso, la temperatura forma parte de las dos combinaciones, reforzándose en este sentido su carácter de variable climática de máxima influencia en el consumo de electricidad.

Para reafirmar aún más la relación entre la demanda de electricidad y la temperatura, señalar que en el verano de 2003, la ola de calor provocó incrementos muy importantes en la demanda de electricidad en España. Así, de acuerdo con la página web de Red Eléctrica de España, el consumo de energía eléctrica en los primeros doce días de junio superó en un 10,5 por ciento el registrado en el mismo periodo del año anterior. El Avance del Informe Anual 2003 de Red Eléctrica de España, relativo al mes de agosto, recoge asimismo un incremento de la demanda eléctrica del 12,6% respecto del mismo mes del año anterior; en el Informe Mensual de Agosto de la misma entidad se señala que la temperatura media de ese mes fue 4 grados Celsius superior a la de agosto de 2002, y que tanto las máximas como las mínimas fueron notablemente superiores a las del mismo mes del año anterior. Igualmente, disminuciones de la temperatura provocan un incremento de la demanda energética; el día 2 de marzo de 2004 se produjo la punta de demanda de potencia en España, con un valor de 38.040 MW a las 19:47, y un máximo de potencia media horaria de 37.724 MW entre las 20 y las 21 horas. Este mismo día, la demanda de energía agregada fue de 759 GWh.

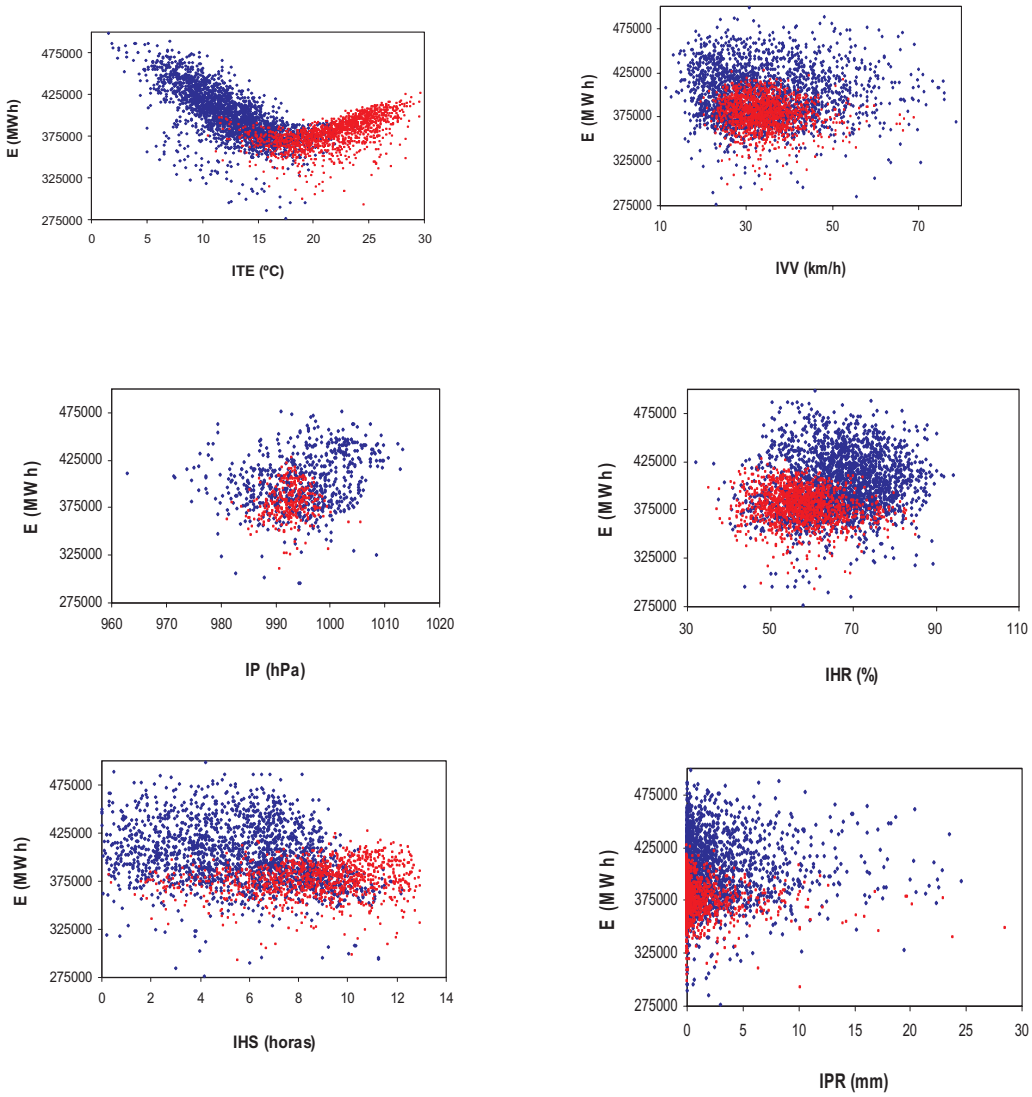


Fig. 13.3. *Gráficos de dispersión de la demanda eléctrica y las variables climáticas (temperatura ITE, velocidad del viento IVV, presión atmosférica IP, humedad relativa IHR, horas de insolación IHS, precipitaciones IPR). Datos diarios de días laborables del año 1983 al 1999; se ha eliminado la tendencia económica general en los datos de demanda eléctrica. Fuente: elaboración propia a partir de datos de REE, INM e INE.*

El anterior máximo se obtuvo el 18 de febrero de 2003 entre las 19 y 20 horas, con un valor de 37.212 MW, siendo la demanda agregada de energía del día siguiente también la mayor de la historia hasta entonces, con 753 GWh (Red Eléctrica de España 2004); tales registros coinciden con unas temperaturas especialmente bajas del mes de febrero, inferiores en 1.5 grados Celsius al promedio del mismo mes del año 2002; en concreto, el día 18 de febrero de 2003 la temperatura mínima media fue inferior a los cero grados, de acuerdo con los datos de Red Eléctrica de España (2004). Por otra parte, el día 2 de marzo de 2004, coincidiendo también con temperaturas bajas, se alcanzó la máxima demanda histórica de gas natural con 1.246 GWh.

Conviene incidir más en esta relación teniendo en cuenta el doble efecto que las temperaturas tienen en el consumo eléctrico. A tal fin, se procede a calcular las variables derivadas del ITE denominadas grados días de calefacción (HDD, *heating degree days*) y grados día de

refrigeración (CDD, *cooling degree days*). Siguiendo la metodología descrita en la literatura, los grados día se obtienen a partir de:

$$HDD_t = (ITE_{REF} - ITE_t)^+$$

$$CDD_t = (ITE_t - ITE_{REF})^+$$

siendo ITE_{REF} el valor del índice que se toma como referencia e ITE_t el valor del índice en t (t= 1,2,3,…). En el caso español, el valor de referencia del índice que se va a utilizar es 18ºC, que es la temperatura de confort anteriormente analizada. La interpretación de los grados día de calefacción sería el número de grados para los que sería necesario utilizar recursos energéticos en los días de invierno para aproximar la temperatura ambiente a la de confort. Los grados día de refrigeración medirían los grados que haría falta enfriar con recursos energéticos para hacer descender en verano la temperatura hasta el nivel de confort. Es decir, son una medida de la duración e intensidad del frío en invierno y del calor en verano.

La figura 13.5 presenta la evolución de los grados día de refrigeración y los grados día de calefacción desde 1970 hasta 2003. Cada variable representa la suma anual de los grados día obtenidos aplicando, día a día, las relaciones anteriores. La simple observación del gráfico informa de la clara tendencia decreciente de los grados día de calefacción anuales y la asimismo clara tendencia creciente de los grados día de refrigeración, ambas consecuencia de una elevación de la temperatura media de los últimos treinta y tres años.

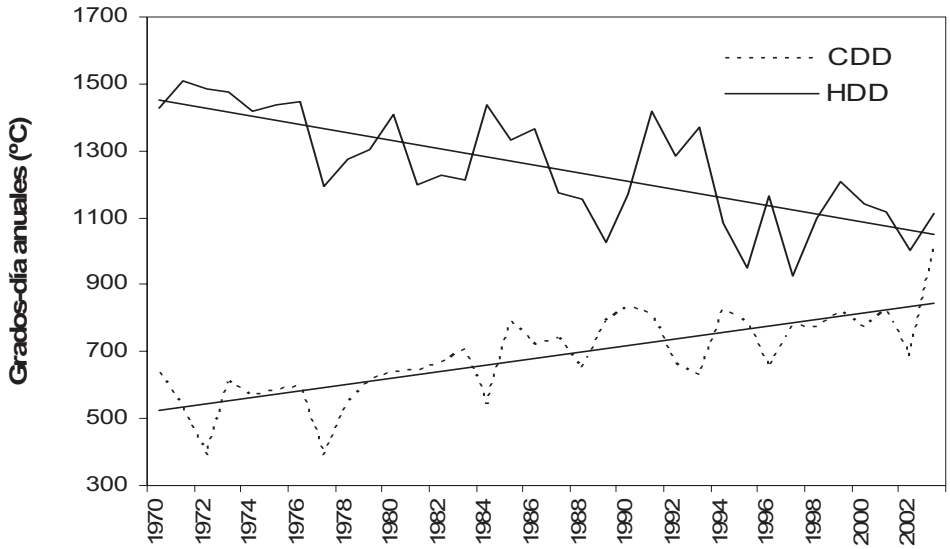


Fig. 13.5. *Evolución de la suma anual de los grados día de refrigeración y de calefacción desde 1970 a 2003. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INM.*

Una vez obtenidos los grados día de refrigeración y los grados día de calefacción es posible determinar de forma aproximada la respuesta de la demanda eléctrica media diaria en verano y en invierno ante una variación de un grado en la temperatura. El resultado de esta aproximación se presenta en la tabla 13.1 en el que se detalla esa respuesta en los años 1983, 1993 y 2003. Destaca la pauta creciente del verano.

Tabla 13.1. *Variación porcentual de la demanda eléctrica media diaria producido por una variación de la temperatura en ±1º C. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de REE e INM.*

Año	Invierno	Verano
1983	1,85 %	0,47 %
1993	2,06 %	1,07 %
2003	1,80 %	1,61 %

13.2.1.2. Oferta de electricidad

Pero no sólo es la demanda eléctrica quien se ve afectada por las variaciones térmicas. La generación de electricidad es asimismo sensible, en mayor o menor medida, a las oscilaciones climatológicas. Así, la hidraulicidad, directamente relacionada con la pluviometría y con la capacidad de los embalses, influye en el precio de la electricidad. De este modo, por ejemplo, el mes de agosto de 2003 fue especialmente seco, con un producible hidráulico inferior en 7 GWh a un agosto tipo. Este hecho, combinado con la ola de calor, provocó que el precio medio de la electricidad durante el mes fuese de casi 4,0 céntimos de euro por KWh, un 25,3% superior al de un año antes, y el máximo en los trece meses anteriores, de acuerdo con la Operadora del Mercado Eléctrico, OMEL (información de Reuters del 29 de agosto de 2003).El máximo precio anterior se había alcanzado en julio de 2002, situándose entonces en 4,72 céntimos de euro por KWh, en un año especialmente seco.

La energía producible hidráulica recoge la cantidad máxima de energía eléctrica que teóricamente se podría producir considerando las aportaciones hidráulicas registradas durante un período de tiempo dado y una vez deducidas las detracciones de agua realizadas para riego o para otros usos distintos de la producción de energía eléctrica; el índice de producible, por su parte, recoge el cociente entre la energía producible y la energía producible media, referidas ambas al mismo período temporal y a un mismo equipo hidroeléctrico. Este índice recoge por tanto correctamente el ciclo hidrológico temporal, indicando un valor unitario del mismo un período normal en cuanto a aportes hidráulicos se refiere; valores menores de la unidad reflejan, sin embargo, períodos secos, mientras que valores superiores a la unidad reflejan períodos húmedos (ver en la figura 13.6 su evolución entre junio 2002 y junio 2003). Precisamente el año 2002 presenta un índice de producible de 0,73, de acuerdo con los datos de Red Eléctrica de España (2004), frente a uno de 1,16 de 2003, lo que puede explicar el precio medio de la electricidad en julio de aquel año. Y del mismo modo ocurre con el precio de la misma en agosto de 2003, con un índice de producible de 0,56. La combinación de calor y escasa hidraulicidad tiene, como vemos, efectos importantes en el precio.

Por otro lado, es conocido también el efecto que la temperatura tiene en la diferencia de rendimiento en las centrales térmicas y nucleares, así como en las de cogeneración, solar térmica de alta temperatura y en la biomasa. El ciclo Rankine reduce su rendimiento termodinámico cuando el foco frío lo es en menor medida. Además, se incrementa el impacto térmico, como por ejemplo ocurrió en Francia, país con una enorme presencia de producción eléctrica de origen nuclear, cuando las centrales nucleares de Bugey (Ain, este), Golfech (Tarn-et-Garonne, sur) y Tricastin (Drome, sureste) recibieron autorización en agosto de 2003 para verter a los ríos las aguas utilizadas para enfriar los reactores con temperaturas más elevadas de lo permitido por las normas en vigor.

La energía eólica se ve perjudicada con situaciones de estabilidad térmica (anticiclones en invierno o en verano) y con episodios de extrema inestabilidad (vientos muy fuertes). En el caso de la fotovoltaica y de la solar térmica, los vientos fuertes producen arrastre de polvo (ensuciamiento de paneles y helióstatos), llegando a tener que dejar de operar. El problema más importante que afrontan actualmente estas instalaciones es la disipación de calor. El rendimiento de la célula disminuye con la temperatura. En el caso de las de silicio monocristalino esta disminución es de 4,41% cada 10º C, por encima de los 25º C. Por otra parte estas células tienen unas temperaturas máximas de funcionamiento en el rango de los 70º C, que no pueden sobrepasarse. Sin embargo, es muy positivo en estas tecnologías el efecto de las horas de insolación.

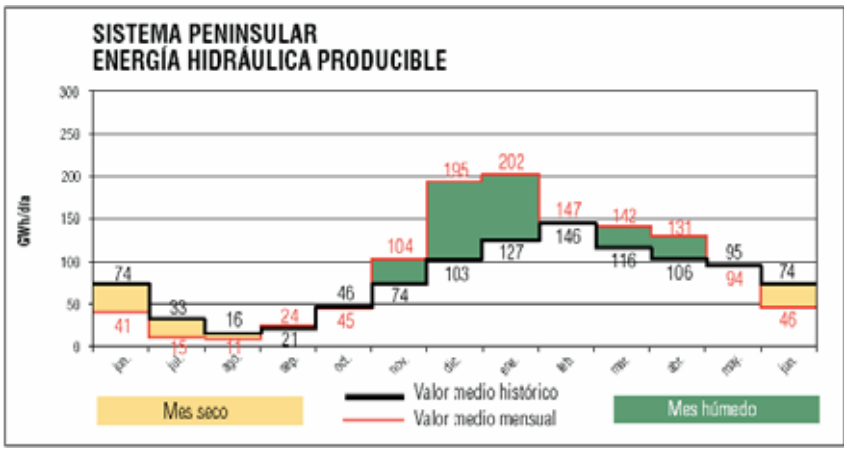


Fig. 13.6. *Índice producible durante el último año móvil (junio 2002 – junio 2003). Fuente: REE.*

Por otra parte, el incremento de la temperatura conduce a inviernos mucho más suaves y a veranos mucho más calurosos (Fig. 13.5). El incremento de demanda unido a este efecto temperatura, provoca un aumento de la demanda estival de potencia. Este efecto se viene manifestando año a año en el acercamiento de la demanda de potencia punta en verano a los valores que se demandan en invierno.

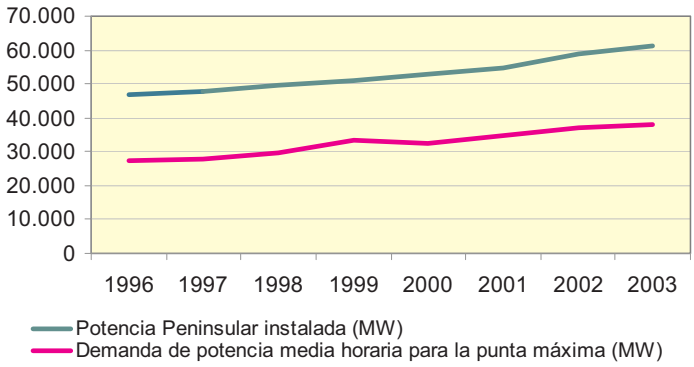


Fig. 13.7. *Relación entre la potencia instalada y la potencia demandada. Fuente: REE y elaboración propia.*

El transporte y la distribución de energía eléctrica son también sensibles a la climatología. La temperatura del aire influye en la capacidad de transporte de las líneas de alta tensión (ver en

tabla 13.2 la diferente capacidad de las conexiones internacionales de España en verano y en invierno); el viento, la lluvia torrencial y la nieve tienen también un claro efecto sobre la potencial destrucción de las estructuras de transporte. Por último, el efecto de temperatura del aire (aislada, o en combinación con la humedad relativa, el *discomfort index,* o la velocidad del viento, *windchill index*) es asimismo importante en la comercialización de la electricidad.

Tabla 13.2. *Capacidad nominal por línea eléctrica de interconexión a 31 de diciembre de 2002. Fuente: REE.*

Capacidad nominal máxima de las interconexiones internacionales (MW)			
	tension (kV)	En verano	En invierno
Con Francia			
Irún – Errondenia	132	111	133
Arkale – Argia	220	410	460
Hernani – Argia	400	1430	1620
Biescas - Pragnéres	220	270	330
Benos - Lac Dóo	150	100	140
Vic – Baixas	400	1510	1750
Con Andorra			
Adrall – Escalades 1 y 2*	110	60	85
Con Portugal			
Cartelle - Lindoso	400	1040	1330
Conchas – Lindoso 132	132	105	140
Aldeadávila - Bemposta	220	270	340
Aldeadávila - Pocinho	220	270	340
Saucelle - Pocinho	220	270	340
Cedillo - Falagueira	400	790	1410
Santa Marina - Elvas 1 y 2*	66	40	70
Con Marruecos			
Pinar - Melloussa	400	730	730

* Valores por circuito

13.2.2. El gas natural, el petróleo y el carbón

13.2.2.1. La demanda

¿Puede afirmarse que la influencia de las variables climáticas en el consumo de otras fuentes de energía, fundamentalmente las primarias, es similar? La figura 13.8 presenta los gráficos de dispersión entre consumo de gas, de carbón y de hidrocarburos y el índice de temperatura, ITE (datos mensuales de consumo y valor medio mensual del ITE). Se llega a la conclusión de que el consumo de gas está relacionado con las variaciones del ITE, y que el consumo de carbón y de hidrocarburos presenta también una relación positiva pero mucho más difusa. En todo caso, obsérvese la diferente pauta de la relación obtenida comparada con la de la electricidad. En el caso del gas y los hidrocarburos no se presenta la rama ascendente correspondiente a las temperaturas altas (verano) por no activarse acondicionadores de aire con estas fuentes de energía. No se detecta relación alguna ni de verano ni de invierno en el carbón. Puede asimismo pensarse que la influencia indirecta de estas altas temperaturas en el consumo de gas, carbón e hidrocarburos a través de la generación de electricidad no parece relevante por el momento.

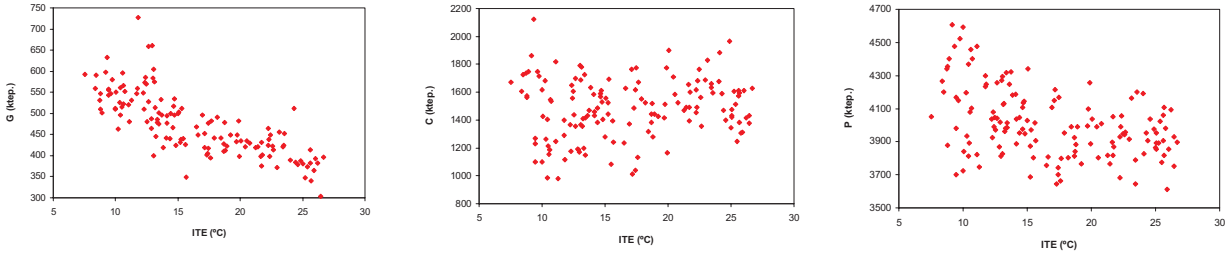


Fig. 13.8. *Gráficos de dispersión de la demanda primaria mensual de gas (G), del carbón (C) y de los hidrocarburos (P) y la temperatura entre los años 1987 y 1998; se ha eliminado la tendencia económica general en las series de energía. Fuente: elaboración propia a partir de datos de MINER, INM e INE.*

13.2.2.2. La oferta

Las incidencias en el aprovisionamiento de gas natural por vía marítima, mediante metaneros, dependen claramente del estado de la mar. La regasificación (proceso por el cual se gasifica nuevamente el gas, transportado habitualmente en estado líquido) se puede favorecer con el aumento de la temperatura ambiente, como asimismo se favorece el transporte y la distribución mediante gasoductos descubiertos. Sin embargo, y de forma simétrica, la licuefacción en origen se vería perjudicada por el incremento de temperatura, y aunque este tipo de instalaciones no existen en España, este efecto por encima de un determinado umbral podría influir negativamente en la oferta internacional de gas.

Sensible a las variaciones climatológicas lo es asimismo la industria del petróleo. La calidad de los productos del refino, por ejemplo, ha de variar necesariamente con la temperatura del aire. La distribución y comercialización dependen también de las condiciones climatológicas, fundamentalmente cuando se efectúa en petroleros y en camiones.

El carbón, por su parte, tiene dependencia de la climatología en los estadios de extracción y preparación, de almacenamiento y de comercialización según el uso. La primera de las fases se ve influenciada claramente por las precipitaciones, que caso de ser excesivamente abundantes pueden provocar dificultades, tanto en las minas a cielo abierto como en las subterráneas. En la fase de almacenamiento, la temperatura del aire puede provocar el efecto de la combustión espontánea del carbón, con los riesgos que conlleva. La velocidad del viento da lugar a emisiones fugitivas, reduciendo la cantidad final de mineral disponible. Asimismo, es posible que las escorrentías provoquen una merma importante del mineral almacenado. Por último, la comercialización del carbón se verá afectada por la hidraulicidad (años secos provocarán un mayor uso de las centrales térmicas) y por la temperatura del aire, que obviamente provocará una demanda mayor para uso térmico o menor en el uso doméstico del carbón para calefacción.

13.2.3. Las energías renovables de uso no eléctrico

En cuanto a las energías renovables de uso no eléctrico, también muestran una sensibilidad clara a la climatología. La energía solar térmica de baja temperatura depende, lógicamente, de la insolación recibida, y la biomasa muestra características zonales y ciclos estacionales en función tanto del tipo de suelo como de la disponibilidad de agua. En efecto, el clima es una variable que determina el tipo de cultivo posible en un área determinada. Refiriéndonos a los biocarburantes, los cultivos tropicales de caña de azúcar permiten una producción media por Ha de 6.000 litros de bioetanol en Brasil, mientras que en Europa al emplearse cereales se limita este rendimiento a menos de la mitad. Asimismo, en Europa se produce gran cantidad de biodiesel procedente de aceite de colza, principalmente en Alemania y Francia.

Se señala a continuación cómo influye la alteración de las variables meteorológicas sobre los cultivos, fundamentalmente y respecto del caso español en lo relativo al bietanol procedente del cereal, actualmente el biocarburante más importante en nuestro país.

Incremento de Precipitaciones: En general muy positivas, aunque deben tener lugar en sus periodos naturales
Incremento de Horas de insolación: Positiva
Incremento de Humedad relativa: Positiva
Incremento de Temperatura: Las muy bajas o muy altas perjudiciales. Ligeramente altas favorables.

13.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En el presente epígrafe se recogen los impactos que el cambio climático puede tener en el sector energético. Evidentemente, no se trata aquí de cuantificar tales efectos, sino de tratar de plantear una valoración cualitativa de los mismos. Hemos pretendido distinguir tres niveles: positivos, negativos y neutros. Cuando ha sido necesario, se han distinguido los efectos según el tipo de energía. La tabla 13.3 resume los principales resultados.

Tabla 13.3. *Principales impactos del cambio climático. Fuente: elaboración propia.*

		Precipitaciones		Temperatura		Viento		Otros
		Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	
Electricidad	Generación	Positivo (hidrauliciad)	Negativo	Negativo*	Positivo*	Positivo en eólica	Negativo en eólica	Solar: insolación positiva
	Transporte y Distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo si es muy elevado	Neutro	
	Comercialización/ demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Gas natural	Aprovisionamiento	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	Negativo (barco)	Neutro	
	Regasificación	Neutro	Neutro	Positivo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Positivo (gasoductos descubier-tos)	Negativo (gasoductos descubiertos)	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Neutro	Neutro	Negativo (almacenes descubier-tos)	Neutro	Neutro	Neutro	
	Comercialización/ Demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Petróleo	Refino	Neutro	Neutro	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	
Carbón	Extracción	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Neutro	
	Demanda	Negativo	Positivo	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	
Renovables uso no eléctrico	Producción	Positivo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Neutro	Neutro	Solar de baja intensidad: insolación positiva

* Afecta a rendimiento de las centrales termoeléctricas, nucleares, cogeneración, biomasa, solar térmica, etc. Asimismo, la solar fotovoltaica disipa el calor con mayor dificultad. ** Se considera negativo al suponer una mayor demanda del recurso
Nota: incrementos o disminuciones en el parámetro climático considerado deben ser considerados como significativos.

13.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

Se presentan a continuación una serie de mapas en los que se observa la distribución física de las instalaciones de transformación de la energía (centrales de generación de electricidad, instalaciones de regasificación de gas natural licuado y refinerías) así como sus redes fijas de transporte, tanto eléctricas como petroleras y gasistas.

13.4.1. Electricidad

13.4.1.1. Generación de electricidad

El parque generador está constituido por unos 64.000 MW, de los que aproximadamente 51.000 MW corresponden al régimen ordinario, perteneciendo el resto al régimen especial (ver distribución en figura 13.9). El régimen ordinario es aquél en el que el esquema regulador es el mercado de producción en el que se cruzan ofertas y demandas de electricidad y donde se establecen los precios como consecuencia de su funcionamiento como mercado organizado o bien funcionan en régimen de contratación libre. Pertenecen a este régimen las instalaciones de generación convencionales. Por el contrario, el régimen especial es un régimen de producción que da un trato diferenciado respecto del régimen ordinario a las instalaciones de producción de energía eléctrica abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración.

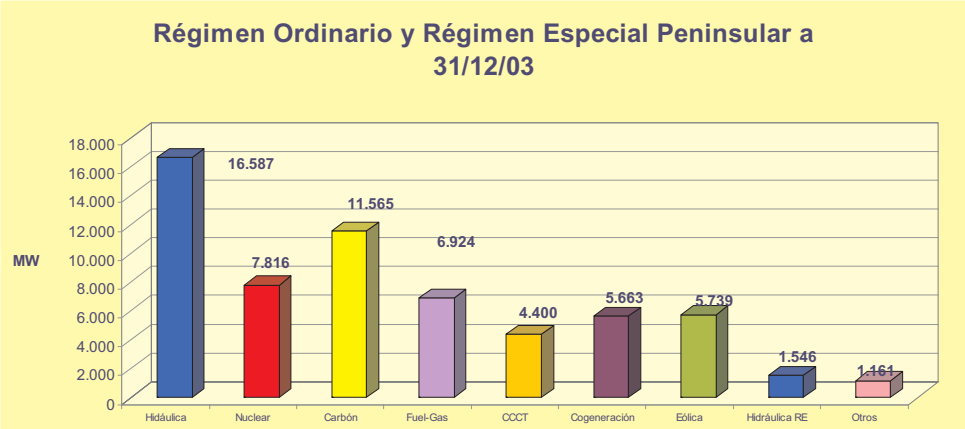


Fig. 13.9. *Potencia eléctrica instalada. Fuente: CNE.*

En los últimos meses se han producido incrementos de potencia instalada en la producción de régimen ordinario, derivados de la instalación de grupos de ciclo combinado con turbina de gas, dándose también bajas de potencia. En cuanto a la potencia instalada en régimen especial, se ha incrementado el último año en tasas anuales cercanas al 16%, destacando, aparte del crecimiento en energía eólica, los incrementos relativos en energía fotovoltaica y en la producción obtenida a partir de biomasa primaria y biogás. La demanda peninsular fue cubierta en 2003 en un 18% por la producción en régimen especial.
En la distribución de la producción peninsular bruta en régimen ordinario, la energía que representa un porcentaje más reducido es la procedente de instalaciones de fuel-gas, con una participación cercana al 10%, dependiendo ésta a su vez de la mayor o menor hidraulicidad. En función de la hidraulicidad anual, entre el 55% y el 65% de la cobertura se repartiría entre la energía nuclear y la procedente de instalaciones de carbón. Las tecnologías de producción que no emiten CO_2 (hidráulicas, renovables y nuclear) alcanzaron en 2003 el 50% de la generación.

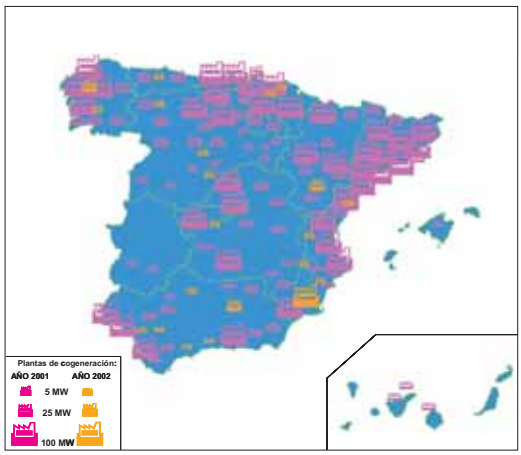
En esta distribución de tecnologías, es importante destacar que algunas de ellas estarían más afectadas que otras por un calentamiento atmosférico y una reducción de las lluvias. El cambio climático afectaría especialmente a las centrales hidroeléctricas, por las menores aportaciones hídricas, y a las centrales nucleares y térmicas, tanto de carbón, de fuel, de gas, como de ciclo combinado, ya que todas ellas reducen su eficiencia al elevarse las temperaturas. Es interesante en este sentido la proyección que Ayala-Carcedo (2003) presenta sobre la evolución de los caudales de las cuencas nacionales para el año 2060 (ver también capítulo 7), y las repercusiones que ello tendría sobre las centrales nucleares. Así, el autor estima para ese año una reducción del 57% en la cuenca del Guadiana I, del 34% en la del Guadalquivir y de más del 28% en las del Segura, Júcar y Duero, por ejemplo.

La potencia instalada en territorio nacional en el año 2003 distribuida por Comunidades Autónomas, refleja que sigue siendo Cataluña, con más de 10.000 MW, la Comunidad que cuenta con mayor potencia instalada, debido principalmente a las instalaciones nucleares e hidráulicas. Le siguen en importancia Castilla y León (con más de 8.500 MW instalados) y Galicia (con más 7.000 MW), gracias a la potencia hidráulica y térmica convencional.

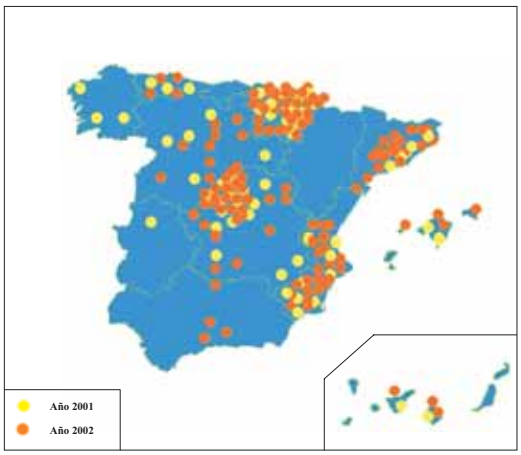
Las Comunidades de Madrid, La Rioja, Melilla y Ceuta son las que cuentan con menor potencia instalada, siendo ésta inferior a los 500 MW.

La nueva generación estaría ubicada, con carácter general, en las zonas más deficitarias y con un crecimiento de la demanda mayor, como son las zonas Centro, Levante y Sur. Sin embargo, frente a esta tendencia de corrección de los desequilibrios existentes entre generación y demanda, también se observan tendencias en el sentido opuesto. Así, cabe destacar que existen zonas tradicionalmente excedentarias en producción con importantes previsiones de nueva generación, como son las zonas de Galicia y Aragón. Las figuras 13.10 y 13.11 muestran la distribución en España de las diferentes centrales generadoras de electricidad.

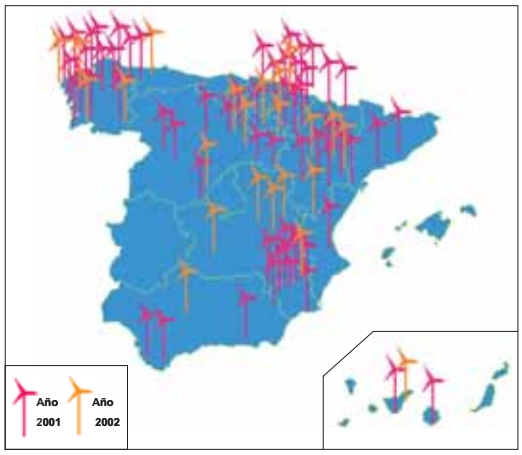
Fig. 13.10. *Centrales termoeléctricas y nucleares. Fuente. REE.*



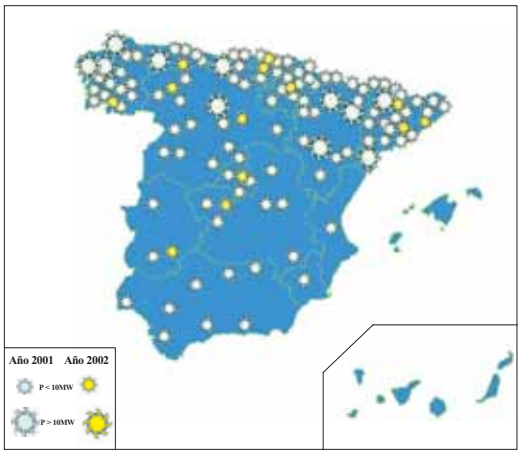
1. Cogeneración



2. Fotovoltaica

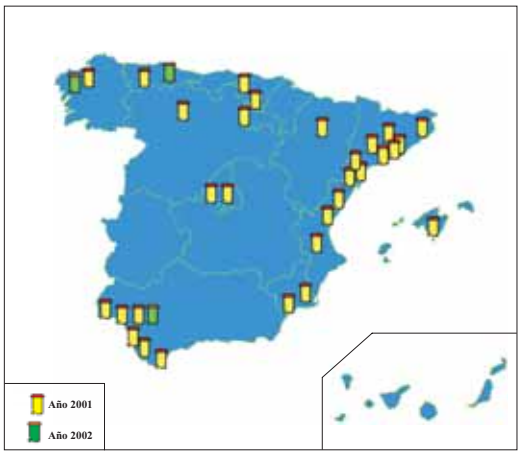


3. Eólica



4. Minihidráulica

5. Biomasa



6. Residuos

Fig. 13.11. *Instalaciones de producción en régimen especial. Fuente: CNE.*

13.4.1.2. El transporte de electricidad

La red de transporte de energía eléctrica debe ser diseñada y planificada de modo que, en la operación del sistema eléctrico, se garantice la continuidad del suministro con la calidad requerida (ver tabla 13.4 y figura 13.12).

En cuanto a la necesidad de desarrollo de la red de transporte, ya se ha mencionado que los mayores incrementos de demanda se han producido en las zonas Sur, Levante y Centro, estimándose que esta tendencia continuará a lo largo de los próximos años.

Tabla 13.4. *Evolución del sistema de transporte, en km. Fuente: REE, Avance del Informe 2003.*

Año	400 kV	220 kV
1999	14.538	15.900
2000	14.918	16.003
2001	15.180	16.178
2002	16.031	16.205
2003	16.560	16.242

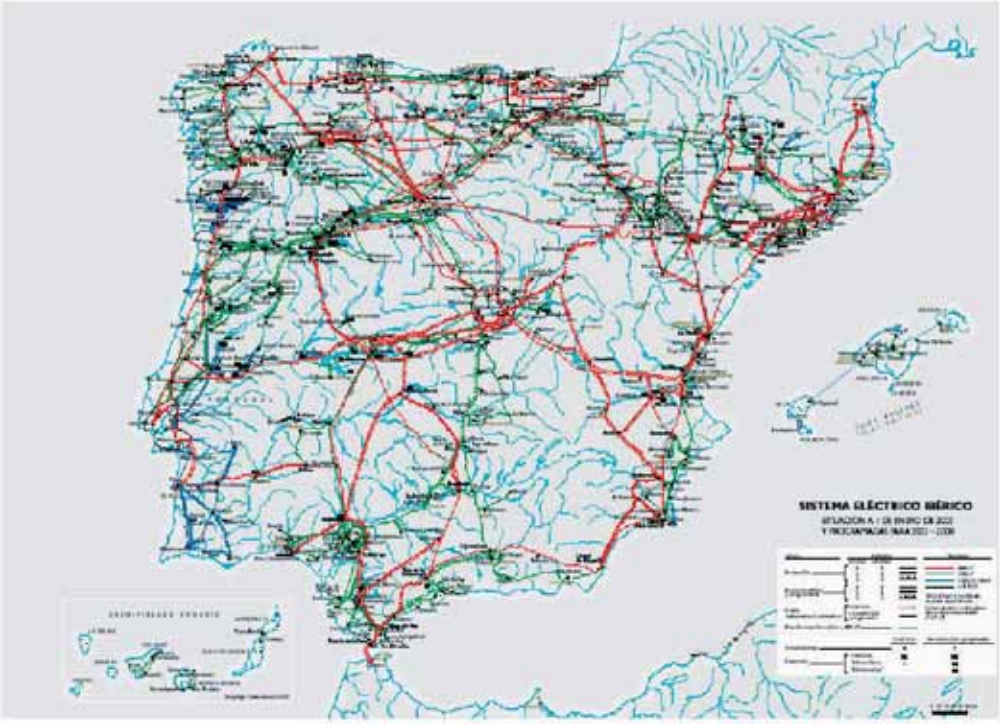


Fig. 13.12. *Red de transporte de energía eléctrica. Fuente: REE.*

13.4.2. El gas natural

13.4.2.1. El aprovisionamiento de gas natural

El aprovisionamiento de gas natural en España se realiza fundamentalmente a través de las plantas de regasificación y las conexiones por gasoducto con Marruecos, Francia, y Portugal. Asimismo, existe una pequeña producción propia (Tablas 13.5 y 13.6).

Tabla 13.5. *Capacidad de producción de los yacimientos españoles de gas. Fuente: ENAGAS.*

	Capacidad de producción	
Yacimiento	**m3 (n)/h**	**TWh/año**
Marismas (valle del Guadalquivir)	4.600	0,47
Aznalcazar (valle del Guadalquivir)	1.141	0,12
Poseidón (Golfo de Cádiz)	53.000	0,54
TOTAL	**58.741**	**3,65**

Tabla 13.6. *Capacidad actual de las plantas de regasificación españolas. Fuente: ENAGAS.*

Planta de regasificación	Capacidad de almacenamiento m^3 GNL	Capacidad de vaporización m^3(n)/h	Días de autonomía máximos (*)	Capacidad de atraque m^3 GNL	Capacidad carga cisternas camiones/día
Barcelona	2 x 40.000 2 x 80.000 TOTAL 240.000	600.000 (a 72 bar) 600.000 (a 45 bar) TOTAL 1.200.000	4,5	1 x 80.000 1x140.000	**50**
Huelva	100.000 60.000 TOTAL 160.000	400.000 (a 72 bar) 50.000 (a 16 bar) TOTAL 450.000	8	140.000	50
Cartagena	55.000 105.000 TOTAL 160.000	450.000	8	140.000	50
Bilbao	2 x 150.000 TOTAL 300.000	400.000	16,8	140.000	15
TOTAL	860.000	2.500.000	7,7		165

(*) Los días de autonomía se calculan como los días que, regasificando al máximo de capacidad, se tarda en consumir el gas de los tanques llenos descontando el mínimo de llenado (10%)

13.4.2.2. Red de gasoductos (figura 13.13)

La gasificación en España se encuentra en fase de expansión. La situación de la red de transporte en Noviembre de 2003 era la que refleja la tabla 13.7.

Tabla 13.7. *Red de gaseoductos españoles. Fuente: CNE.*

Empresa	Km de gasoducto
ENAGAS	5.904
AL-ÁNDALUS (ENAGAS +TRANSGAS)	277
GASODUCTO DE EXTREMADURA (ENAGAS +TRANSGAS)	250
GAS NATURAL SDG	209
GAS EUSKADI TRANSPORTE SAU	152
TRANSPORTISTA REGIONAL DEL GAS	41
INFRAESTRUCTURAS GASISTAS DE NAVARRA	13
TOTAL	**6.846**

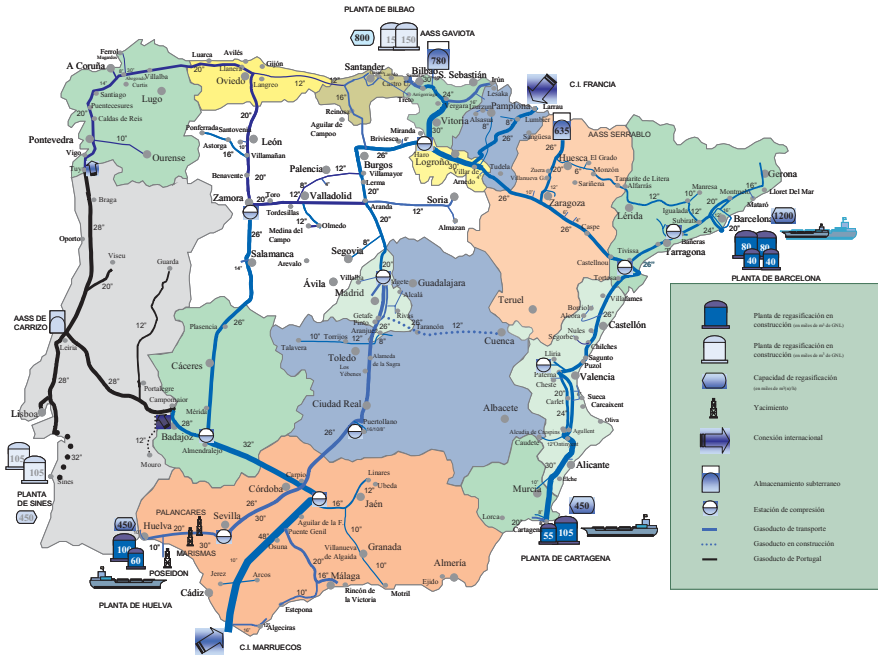


Fig. 13.13. *Mapa de infraestructuras gasistas. Fuente: CNE.*

13.4.3. El petróleo y derivados

13.4.3.1. Red de poliductos, refinerías y depósitos (figura 13.14)

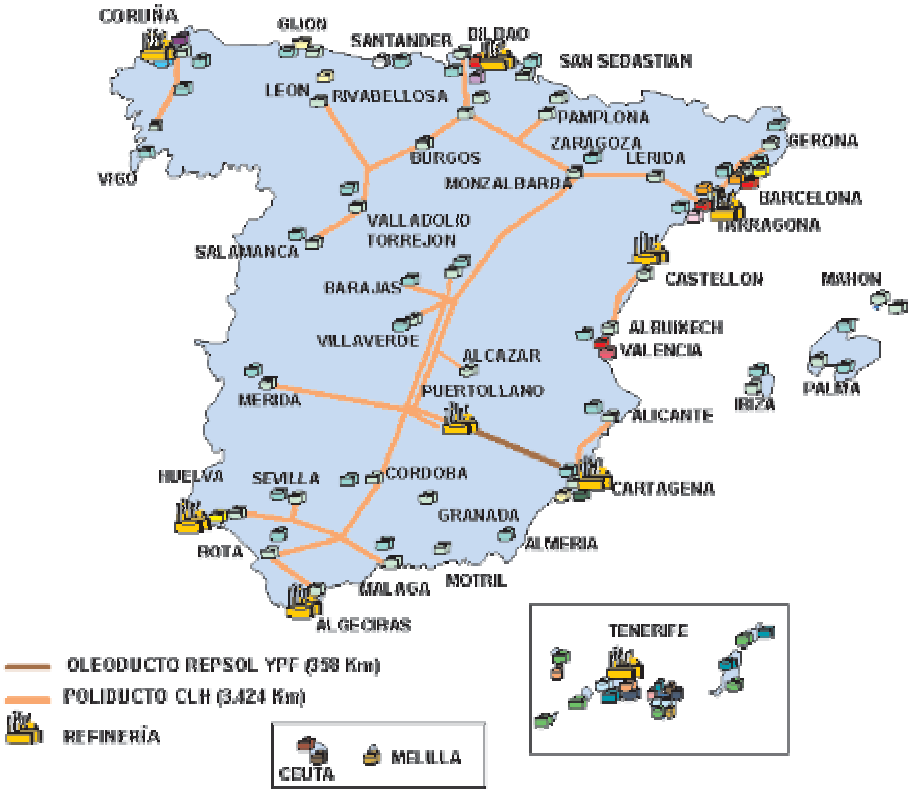


Fig. 13.14. *Red de poliductos, refinerías y depósitos de productos petrolíferos. Fuente: CLH.*

13.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

Según se planteen escenarios de un tipo u otro, caben ciertas posibilidades de adaptación. En la política energética española existen ya o están en proceso de adoptarse una serie de medidas para tratar de evitar o al menos de mitigar los efectos del cambio climático.

Dichas medidas aparecen reflejadas en los distintos documentos elaborados bien con el objeto de fomentar o mejorar determinados instrumentos favorecedores de la protección ambiental - como son, entre otros, las energías renovables o la eficiencia energética - o bien elaborados con objetivos energéticos pero que incorporan también mejoras ambientales. A continuación, se señalan las actuaciones más relevantes, con una breve descripción de las mismas.

Plan de Fomento de las Energías Renovables (PFER), aprobado por el Gobierno el 30 de diciembre de 1999. Estableció los objetivos de crecimiento necesarios en cada una de las tecnologías consideradas como renovables para conseguir que la producción con las mismas represente el 12% del consumo español de energía primaria en el año 2010.

Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética 2004-2012 (E4). Su elaboración se inició en octubre de 2002, siendo aprobada por el Consejo de Ministros el 28 de noviembre de 2003. Tiene por objeto promover el ahorro y la eficiencia energética e, indirectamente, garantizar el suministro de energía, por la reducción de las importaciones, incrementar la competitividad de los sectores productivos y contribuir al cumplimiento de los objetivos medioambientales, lo que

es compatible y acorde con los principales vectores de la política energética española. Este documento ha analizado las posibilidades de ahorro y eficiencia energética en diversos sectores, como son el de edificación, transporte, servicios públicos, industria, terciario y residencial, sector trasformador de la energía (refino, producción eléctrica y cogeneración) y el sector agrícola.

Estrategia Española de Lucha contra el Cambio Climático (EECC): es la más antigua, ya que se comenzó a elaborar en 2001, con la creación de la Oficina Española de Lucha contra el Cambio Climático y la redefinición del Consejo Nacional del Clima. Ha sido aprobada el 5 de febrero de 2004 por el Pleno del Consejo Nacional del Clima, estando pendiente su aprobación en Consejo de Ministros. Su objetivo general es contribuir al cumplimiento de los compromisos derivados del Protocolo de Kioto, concretamente el relativo a la limitación del crecimiento de las emisiones netas de gases de efecto invernadero al 15%. La Estrategia enumera más de 400 medidas a aplicar en distintos sectores, como son el de producción y transformación de la energía, industrial, el sector de transportes, los sectores residencial, comercial e institucional, la agricultura y ganadería y residuos. Además, propone una serie de medidas para el fomento de los sumideros. Por último, la estrategia contempla a la Directiva 2003/87/CE sobre comercio de derechos de emisión, que afecta casi a la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero en nuestro país.

Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (EEDS), cuya elaboración comienza en noviembre de 2001, puede considerarse como la más importante de todas, pues debe englobar a las demás, ya que tiene que analizar conjuntamente los vectores económico, social y ambiental de la sociedad. Existe un Documento de Consulta que parece que realiza un buen diagnostico de la situación (innovación tecnológica, envejecimiento de la población, desequilibrios territoriales, gestión sostenible del agua, pobreza y exclusión social). Asimismo, en el documento se contemplan medidas e instrumentos así como índices de seguimiento y de evaluación. Sin embargo, actualmente sigue en fase de borrador y no existe fecha prevista de aprobación definitiva, por lo que no puede considerarse más que un marco de intenciones.

Documento de Planificación de los Sectores de Electricidad y del Gas Natural. Desarrollo de las redes de transporte 2002 – 2011, aprobado por el Gobierno el 13 de septiembre de 2002. Incluye, entre otras, previsiones sobre el comportamiento futuro de la demanda, los recursos necesarios para satisfacerla, la evolución de las condiciones del mercado para garantizar el suministro y los criterios de protección ambiental. Estas previsiones forman parte de la planificación indicativa, concretada en la Ley del Sector Eléctrico, que tiene como excepción las instalaciones de transporte en las que la planificación es de carácter vinculante. En lo relativo a la protección ambiental, este documento, por una parte, integra los objetivos de producción eléctrica del PFER y los amplía y, por otra, asume la necesidad de la reducción del consumo final de energía, dejando las medidas a aplicar a la elaboración de un documento con tal objetivo concreto, que finalmente se desarrolló en la E4 anterior.

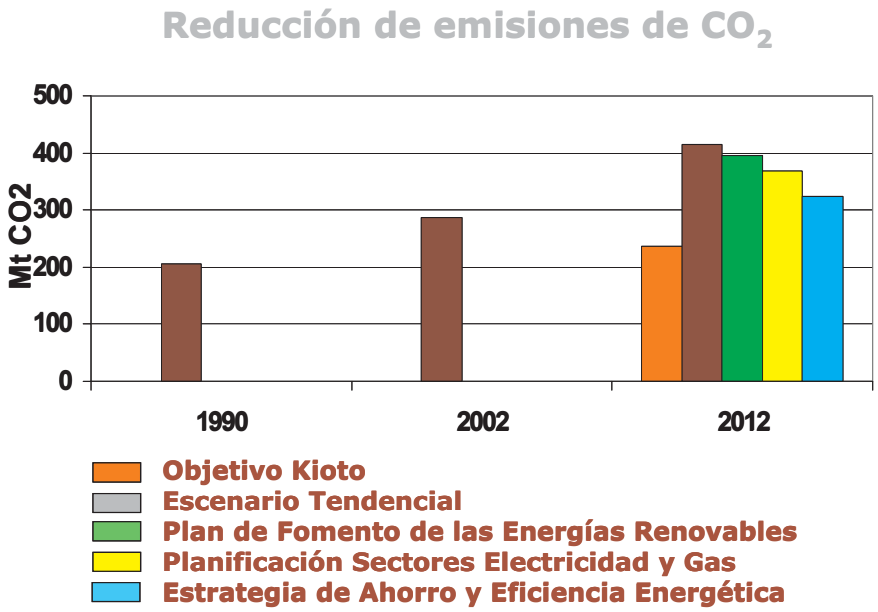


Fig. 13.15. *Previsión de reducción de emisiones de CO2. Fuente: Memoria económica de la E4. Ministerio de Economía.*

Más allá de las opciones regulatorias descritas, cabe plantear otra, no menos importante, desarrollada a nivel mundial desde hace unos años por los gestores de riesgo de las empresas expuestas al riesgo climático. Se trata de la introducción en los mercados financieros de los productos derivados con subyacente en algún parámetro climático, como pueda ser el viento, la temperatura, las precipitaciones, etc., o cualquier combinación de ellos. Así, de Paz Cobo (2003) señala que en el período 1996-2001 se habrían cerrado más de 4.700 contratos por un importe acumulado de más de 7.500 millones de dólares USA. Su principal característica es la cobertura de riesgos asociados al clima, como por ejemplo la disminución de consumo eléctrico ante un invierno excesivamente cálido. Obviamente, las compañías productoras de electricidad son las principales interesadas en la existencia de este tipo de operaciones, que si bien son muy novedosas en nuestro país no por ello deben desecharse como instrumento de cobertura.

Asimismo, deben incrementarse las actuaciones urbanísticas de tipo bioclimático, en el sentido de conseguir tanto edificaciones como ciudades completas en las que se mejore sustancialmente la eficiencia energética.

13.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

No es fácil encontrar información estadística actualizada que describa de forma sectorial el consumo final de energía en España, a pesar de que Red Eléctrica Española publicó en 1998 el “Atlas de la demanda eléctrica español (Proyecto INDEL)” en el que se presentan datos sectoriales agrupados de demanda (residencial, comercial y turística) hasta 1997. Esta situación dificulta notablemente el estudio de las repercusiones de los efectos del cambio climático en el consumo de energía de los diferentes sectores de la Economía. En el libro “La energía en España 2002” (Ministerio de Economía 2003a) se presenta información muy agregada y parcial sobre el destino de la energía consumida, con la notable ausencia de la electricidad (ver, no obstante, Valor *et al.* 2002). La tabla 13.7 resume la distribución sectorial

del consumo de energía final en España (total, carbón y productos petrolíferos), destacando la fuerte incidencia de la industria y del transporte.

Tabla 13.7. *Sectorización del consumo de energía final en España. Fuente: Ministerio de Economía (2003a).*

	2001		2002		2002/01
Consumo final	ktep.		ktep.		%
Industria	34.898	37,2	35.634	37,3	2,1
Transporte	33.785	36,0	34.377	35,9	1,8
Usos diversos	25.187	26,8	25.619	26,8	1,7
Total	93.870	100,0	95.630	100,0	1,9
Consumo final de carbón*					
Siderurgia	1.712	67,3	1.702	68,5	-0,6
Cemento	184	7,2	151	6,1	-18,0
Resto industria	584	23,0	579	23,2	-0,8
Usos domésticos	65	2,5	55	2,2	-16,0
Total	2.544	100,0	2.486	100,0	-2,3
Consumo final de productos petrolíferos*					
Gases licuados del petróleo	2.633	4,6	2.646	4,6	0,5
Gasolinas	9.084	15,9	8.791	15,3	-3,2
Kerosenos	4.734	8,3	4.460	7,7	-5,8
Gas-oil A+B	23.658	41,3	24.904	43,2	5,3
Gaso-oil C	4.224	7,4	3.849	6,7	-8,9
Otros	12.922	22,5	12.984	22,5	0,5
Total	57.255	100,0	57.635	100,0	0,7

(*) Excluidos los usos para generar electricidad.

Un buen procedimiento para determinar el impacto sectorial del consumo de energía es a través de las conocidas Tablas Input-Output de la economía española que recogen de manera pormenorizada las relaciones (bidireccionales) entre la demanda de todos los sectores implicados en la misma. En concreto, interesaría analizar a través de dichas tablas cuales son las relaciones que se presentan entre el sector energético y los otros sectores económicos (Labandeira y Labeaga 2002). Alcántara y Padilla (2003) han publicado un interesante estudio que, siguiendo esta metodología, clasifica a los sectores económicos por su relación con el sector energético. La información se refiere al año 1995. La tabla 13.8 presenta la clasificación de los sectores económicos según cual sea su relevancia en el consumo de energía.

El comportamiento de los sectores económicos ante el consumo de energía se resume en los cuatro cuadrantes de la tabla. En concreto, y de modo muy esquemático:

- Los sectores recogidos en el cuadrante B son los que utilizan intensivamente energía y provocan, a su vez, que los demás sectores también la consuman.
- El cuadrante C presenta el extremo contrario, es decir, engloba a los sectores poco o nada relevantes en el consumo energético, tanto por su propia actividad como por su influencia en el consumo de energía de los demás sectores económicos.
- El cuadrante A incluye a los sectores cuyo consumo energético es sensible a los aumentos de la demanda de la economía pero, a su vez, no influye en el consumo energético de los otros sectores.
- Por último, el cuadrante D presenta a sectores cuya actividad influye notablemente en el consumo final de energía del país pero no responden consumiendo más energía cuando se incrementa la actividad económica general.

Tabla 13.8. *Relevancia de los sectores económicos en cuanto al consumo de energía (datos de 1995) Fuente: Alcántara y Padilla (2003) y elaboración propia.*

A) Sectores con consumo energético sensible a los aumentos en la demanda final de la economía	**B) Sectores muy relevantes (ante aumentos de demanda final de la economía consumen mas energía; ante aumentos de demanda propios, hacen consumir más energía a los otros sectores)**
Productos no metálicos Energía Agricultura	Transporte interior Químico Construcción Siderurgia y metalurgia no férrea Otros transportes
C) Sectores no relevantes (influyen poco en el consumo final de energía y, a su vez, son poco sensibles a los cambios en la demanda final de la economía)	**D) Sectores cuya actividad influye de forma apreciable en el consumo final de energía de la economía**
Papel e impresión Textil y calzado Comercio Productos metálicos Otras manufacturas Otros servicios para la venta	Alimentación(*) Equipo de transporte Otros servicios no venta Restauración y hostelería

(*) El sector Alimentación se sitúa en la frontera entre los cuadrantes B y D.

13.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

En este epígrafe se pretende señalar cuáles son los elementos que actualmente permanecen desconocidos para los investigadores. Se ha elaborado un cuadro sinóptico (tabla 13.9) que pretende resumir el grado de conocimiento del impacto que un cambio en algún parámetro climático puede tener sobre las distintas fuentes energéticas. Cabe destacar aquí un aspecto interesante, cual es el de la relación existente entre el grado de conocimiento del impacto y la importancia de la fuente energética (y su uso) considerada. Así, por ejemplo, todo lo relacionado con la generación de electricidad, por vías hidráulica y eólica, tiene un alto grado de conocimiento, mientras que el efecto del viento en la comercialización del gas natural es absolutamente desconocido, más allá de las especulaciones que puedan efectuarse al respecto.

Tabla 13.9. *Principales incertidumbres y desconocimientos de la influencia del cambio climático en el sector de la energía.*

		Precipitaciones		Temperatura		Viento		Otros
		Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	
Electricidad	Generación	3	3	1	1	3 (eólica)	3 (eólica)	3 Insolación (solar)
	Transporte y Distribución	2	2	3	3	3	0	
	Comercializa-ción/ demanda	1	1	3	3	0	0	2 (Combinación Temperatura/ Humedad y Temperatura/Viento)
Gas natural	Aprovisionamiento	1	1	0	0	0	0	
	Regasificación	0	0	1	1	0	0	
	Transporte y distribución	1	1	1 (oleo-ductos descubier-tos)	1 (oleoductos descubier-tos)	0	0	
	Almacenamiento y Comercialización	1	1	2	2	0	0	2 (Combinación Temperatura/ Humedad y Temperatura / Viento)
Petróleo	Refino	1	1	1	1	0	0	
	Transporte y distribución	2	2	2	2	0	0	
	Comercialización	1	1	2	2	2	0	
Carbón	Extracción	1	1	1	1	0	0	
	Almacenamiento	2	2	2	2	2	2	
	Comercialización	2	2	2	2	0	0	
Renovables no eléctricas	Producción	2(biomasa)	2 (biomasa)	1	1	0	0	2 (Solar de baja intensidad)

Grado de conocimiento del impacto: 1 bajo, 2 medio, 3 alto, 0 desconocido
Notas: el grado de conocimiento se ha medido en función de la investigación llevada a cabo sobre los impactos en el sector o subsector analizado; muchos efectos calificados en Tabla 13.2 como neutros son obvios, por lo que no existe contrastación empírica sobre ellos (de ahí el 0)

13.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

13.8.1. Electricidad

El aumento de la temperatura lleva a inviernos mucho más suaves y a veranos mucho más calurosos. El incremento (disminución) de demanda unido a este efecto temperatura, provoca un incremento (disminución) de la potencia necesaria en verano (invierno). Este efecto se viene manifestando año tras año en el acercamiento de la demanda de potencia punta en verano a los valores de invierno (figura 13.16).

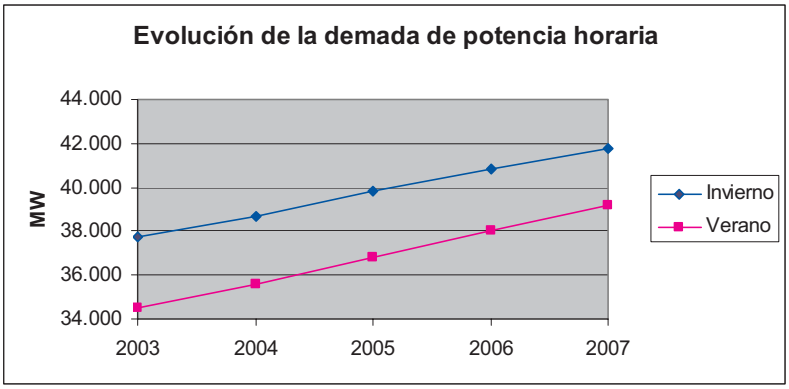


Fig. 13.16. *Evolución de la previsión de demanda de potencia horaria. Fuente: CNE.*

Asimismo, el decremento de las precipitaciones implica una disminución del producible hidroeléctrico y en consecuencia a un aumento de los precios en el mercado de electricidad.

Por otra parte, el incremento de los episodios de tormentas extremas puede dar lugar a indisponibilidades en el transporte y distribución de energía, lo que se detecta mediante los indicadores de calidad clásicos: Tiepi (tiempo de interrupción anual del suministro eléctrico) y Niepi (número de interrupciones anuales del suministro eléctrico). No obstante, las inversiones en la calidad del servicio impulsan la mejora de estos indicadores.

En cuanto al consumo de electricidad, cabe tener en cuenta posibles cambios en los hábitos de consumo doméstico, como así se detecta en los últimos 20 años. A continuación se reflejan los gráficos de dispersión, ajustando además una función polinómica en cada caso, de la relación entre la demanda eléctrica diaria en días laborables y el ITE en 1983, 1993 y 2003. El resultado se presenta en la figura 13.17. Resulta evidente que se ha producido una modificación clara en dicha estructura de consumo provocada por el desplazamiento hacia la derecha y arriba de los puntos correspondientes al verano efecto que debe ser atribuido a la utilización cada vez más generalizada de los aparatos de aire acondicionado, que responde también al aumento del nivel de vida. De hecho, según la Asociación de Fabricantes Españoles de Climatizadores (AFEC) el número anual de estos aparatos vendidos crece todos los años desde las 514.000 unidades de 1999 hasta las 942.207 de 2003.

Por lo tanto, los indicadores eléctricos que se proponen para la posible detección del cambio climático son los siguientes, sin perjuicio de que puedan existir otros componentes que les puedan afectar.

- Puntas de demanda en verano. Relación entre la punta de demanda en invierno/verano
- Grado de utilización de la hidráulica en generación
- Precio de la electricidad (contado y a plazo)
- Tiepi, tiempo de interrupción anual del suministro eléctrico
- Niepi, número de interrupciones anuales del suministro eléctrico
- Consumo doméstico de electricidad:
    - En refrigeración
    - En calefacción
- Consumo industrial de electricidad
    - Empleo en refrigeración
    - Empleo en calefacción
    - Empleo para aportes energéticos en los procesos

Es necesario señalar aquí, sin embargo, que tales detectores deben ser matizados. Así, por ejemplo respecto del Tiepi, su utilidad sólo será efectiva si se desglosan las causas en él englobadas. La simple saturación de las líneas por nuevos usos o mejores estándares de vida que induzcan a un mayor consumo pueden dar lugar a un mayor valor de tal indicador, sin estar esto directamente asociado al aumento de temperaturas. Por tanto, el Tiepi globalmente considerado no serviría sin un desglose en sus distintos componentes.

Asimismo, también es preciso señalar que una mejora de la renta puede dar lugar a una modificación de los hábitos de la sociedad en la medida que pueda permitirse más confort. Por tanto, sería necesario analizar los efectos combinados de *Temperatura*equipamiento*poder de uso (económico)* para obtener alguna conclusión realmente definitiva. A este respecto, hay que destacar que un mayor uso del aire acondicionado en los grandes núcleos urbanos provoca un mayor crecimiento de la demanda de aire acondicionado, en la medida que estos equipos generan calor y lo expulsan al exterior, contribuyendo al aumento de la temperatura exterior. Esta misma consideración es válida para los vehículos.

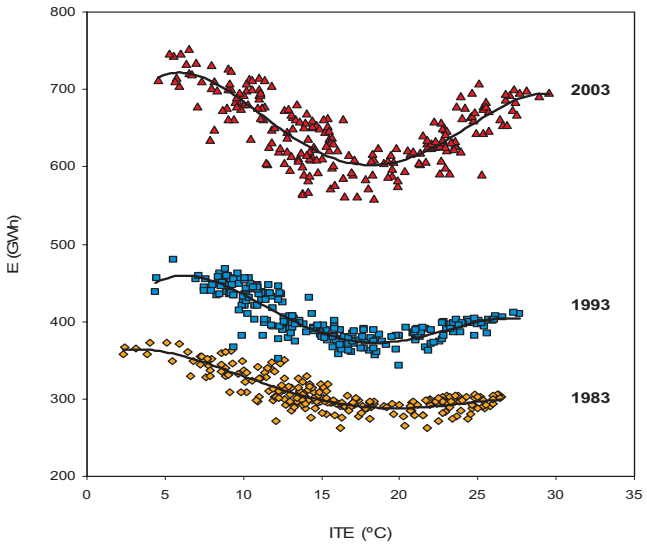


Fig. 13.17. *Gráficos de dispersión del consumo de electricidad y del ITE en 1983, 1993 y 2003 y ajuste polinomial. Cada gráfico de dispersión representado es similar al de la figura superior izquierda del gráfico 3. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INM, INE y REE.*

13.8.2. Demanda global de energía

La intensidad energética primaria de la Unión Europea se ha reducido, en términos acumulados, desde 1990 hasta el año 2000, con un ritmo más acusado durante la segunda mitad de la década. En España, sin embargo, este indicador sigue la tendencia opuesta. En el año 2000, la intensidad primaria española superó ligeramente a la media de los Estados miembros de la Unión Europea, a igualdad de poder adquisitivo. En el caso de la intensidad energética final (consumo de energía final por unidad de PIB), representada en la figura 13.18, las tendencias registradas son cualitativamente similares (creciente en el caso español y decreciente en la Unión Europea). Desde el año 1990, la tasa anual media de crecimiento en nuestro país de la intensidad final ha sido del 0,8%. Parte de este crecimiento se debe al mayor consumo de electricidad como consecuencia de un mayor equipamiento en acondicionamiento de aire.

Por lo tanto, unos posibles indicadores energéticos generales para la detección del cambio climático podrían ser:

- Consumo de energía final
- Intensidad energética final
- Número de equipos de climatización vendidos anualmente.
  A este respecto, es necesario comentar que el incremento de las ventas anuales de equipos de climatización responde no sólo al incremento de la temperatura, sino a una bajada progresiva de los precios de tales equipos y a un mayor nivel de vida de los españoles, que se traduce en un incremento del deseo de confort.

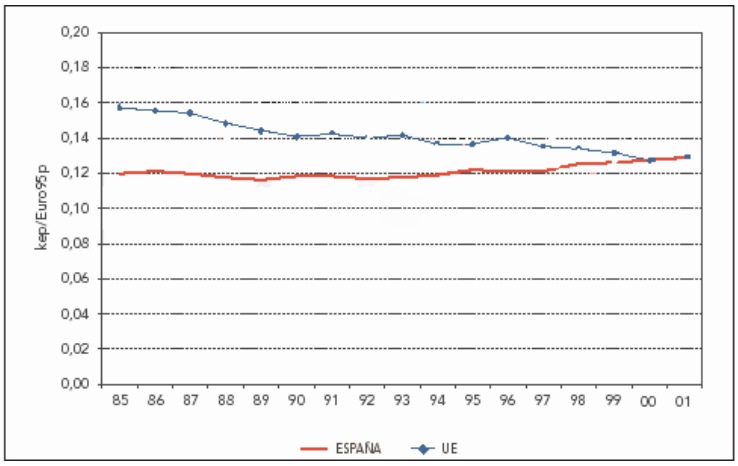


Fig. 13.18. *Evolución de la intensidad final en España y la UE 1985-2001. Paridad de poder de compra (El PIB se ha referenciado a precios constantes de 1995). Fuente: Ministerio de Economía (2003).*

13.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

La Comisión Europea se ha mostrado hasta el momento como la administración más efectiva en el terreno de la definición de objetivos medioambientales, y recientemente también, en el energético. A este respecto conviene recordar que el tratado constitutivo de la Comunidad Europea, en su artículo 2, dispone que "La Comunidad tendrá por misión promover, (…) un alto nivel de protección y de mejora de la calidad del medio ambiente, (...)"; y el artículo 174.2, por su parte, señala que "La política de la Comunidad en el ámbito del medio ambiente tendrá como objetivo alcanzar un nivel de protección elevado, teniendo presente la diversidad de situaciones existentes en las distintas regiones de la Comunidad. Se basará en los principios de cautela y de acción preventiva, (….)" . Asimismo el artículo II-37 de la futura Constitución europea dispone que "Las políticas dela Unión integrarán y garantizarán con arreglo al principio de desarrollo sostenible un alto nivel de protección del medio ambiente y al mejora de su calidad".

En este sentido, la Comisión Europea, preocupada por la eficiencia energética y las cuestiones medioambientales, impulsa la liberalización energética sin demorar la adopción de Directivas de carácter medioambiental para que el desarrollo energético en su ámbito sea sostenible. Se han aprobado recientemente Directivas muy importantes, como:

- *Directiva 2001/80/CE, de 23 de octubre, del Parlamento Europeo y del Consejo sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes*

procedentes de grandes instalaciones de combustión. Esta Directiva revisa la 88/609/CEE, imponiendo límites de emisión de SO_2, NOx y partículas más exigentes, que afectarán tanto a instalaciones nuevas como existentes, en este último caso a partir del año 2008. Su objetivo es la reducción en la UE de las emisiones de SO_2 en un 63% y de NOx en un 21%. En dicha Directiva se establecen límites también para las turbinas de gas y para la biomasa.

- *Directiva 2001/81/CE, de 23 de octubre, del Parlamento Europeo y del Consejo sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos,* cuyo fin es luchar contra la acidificación, ozono troposférico y eutrofización en cada país, teniendo en cuenta el concepto de carga crítica. Establece, para cada país, unas emisiones máximas de SO_2 y NOx a partir de 2010.

- *Directiva 2001/77/CE, de 27 de septiembre, del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad,* cuyo objetivo es alcanzar el 12% del consumo nacional bruto de energía en 2010, logrando, en particular, un 22,1% de electricidad generada a partir de fuentes renovables en el consumo total de electricidad de la Comunidad en ese mismo año.

- *Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios*, que afecta tanto a edificios nuevos como existentes y que tiene como objetivo el fomento del rendimiento energético en los edificios de la UE, tratando de alcanzar un alto nivel de eficacia en el coste. Para ello establece una metodología de cálculo de la eficiencia, unos requisitos mínimos, la certificación energética y la inspección de determinados elementos integrantes de los sistemas de climatización de los edificios.

- *Directiva 2003/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de mayo de 2003, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte,* que pretende sustituir por biocarburantes un porcentaje mínimo, que será del 2% para 2005 y del 5,75% para 2010, del diesel y la gasolina comercializados con fines de transporte.

- *Directiva 2003/96/CE del Consejo, de 27 de octubre de 2003, por la que se reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad,* que define un sistema fiscal general para los productos energéticos, al objeto de mejorar el funcionamiento del mercado interior, favorecer las actitudes propicias a la protección del medio ambiente y alentar una mayor utilización de la mano de obra.

- *Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 2003, por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad* y por la que se modifica la Directiva 96/61/CE del Consejo. Esta norma introduce un mecanismo de mercado para facilitar el cumplimiento de los compromisos del Protocolo de Kyoto a nivel de la Comunidad, que se iniciaría en 2005 y estaría totalmente operativo en 2008.

- *Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía*, en la que, se fomenta esta tecnología y se establece la necesidad de garantizar el origen de la electricidad procedente de la cogeneración.

Al mismo tiempo, la Comisión Europea está preocupada por las cuestiones de seguridad y sostenibilidad del abastecimiento energético, por lo que abrió a finales de 2000 un debate al

respecto con su Libro Verde. La Comisión Europea analiza separadamente las dos caras del abastecimiento energético: el suministro y el consumo, aspectos ambos que han de formar parte de la política energética común, encaminada al abastecimiento y consumo energético sostenible.

Sin embargo, es en la faceta del consumo -el control de la demanda de energía- donde el Libro Verde juzga que existe un mayor potencial para establecer una estrategia eficaz de actuación. Para ello recomienda varias actuaciones, entre las que destacan la profundización en los procesos de liberalización –para hacer llegar al consumidor la señal de precio-, el establecimiento de mecanismos que aseguren que estos precios reflejan los costes reales, y la promoción del ahorro energético. Por último, sugiere la intensificación de esfuerzos en dos sectores de creciente desarrollo e intensivos en energía, pero con un gran potencial de mejora: los sectores del transporte y de la edificación. El Libro Verde sugiere cambios en los modos de transporte y la adopción de medidas adicionales para incrementar el ahorro energético en los edificios. Por tanto, parece que la política energética de la UE es la correcta para tratar de conseguir un desarrollo energético sostenible.

Por lo que respecta a nuestro país, señalar que se han adoptado hasta el momento una serie de medidas positivas para tratar de conseguir que nuestro desarrollo energético sea más sostenible. La política energética española, de acuerdo con las Leyes sectoriales eléctrica y de hidrocarburos, coincide con la de la UE en los tres objetivos de:

1. Seguridad de abastecimiento
2. Liberalización y mercados competitivos
3. La protección del medio ambiente

Esta política energética ha conducido hasta el momento a la regulación siguiente:

- *Liberalización total del suministro eléctrico y gasista en 2003*. Se han creado mercados mayoristas (organizados y libres) y minoristas (basados en contratos con comercializadores). Se ha dotado de capacidad de elección de suministrador a todos los consumidores. Todo ello, pretende una mejora de la eficiencia económica, y en el caso del sector eléctrico, dada nuestra actual estructura de generación, también a la mejora de la eficiencia energética y medioambiental.

- *El Plan de Fomento de las Energías Renovables* cuyo objetivo es aportar con esta fuente, el 12% de la energía primaria que se consuma en 2010.

- *El Documento de Planificación de los Sectores de Electricidad y del Gas Natural 2002-2011,* que analiza la cobertura del suministro a diez años, con el cumplimiento de los objetivos ambientales (respecto a las energías renovables y a la cogeneración).

- *La regulación eléctrica de apoyo a las energías renovables y a la cogeneración*, que se ha mostrado eficaz en general, teniendo en cuenta el enorme desarrollo conseguido por la energía eólica, la energía minihidráulica y la cogeneración. El sistema de promoción se basa en otorgar a estas tecnologías una prima relevante por encima de los precios del mercado de electricidad. El importe de la prima equivalente puede evaluarse en 2003 en casi 1.000 M€ (<>160.000 MPTA), lo que supone un sobrecoste medio para el consumidor de electricidad del 7%, lo que constituye una fuerte apuesta por las tecnologías de generación limpias y eficientes. Sin embargo, esta regulación ha sido insuficiente hasta el momento para desarrollar la biomasa y la solar térmica. El reciente RD 436/2004, de 12 de marzo, pretende mejorar esta situación.

- *Liberalización de la actividad de generación.* Como consecuencia de ello, del desarrollo tecnológico y de las nuevas Directivas de contenido medioambiental, se están incorporando nuevas centrales de ciclo combinado que emplean gas natural, con lo que está mejorando el rendimiento energético global de la generación de electricidad, reduciéndose las emisiones específicas.

- *Tarifas integrales y complementos tarifarios con incidencia cuantitativa en modificación de las pautas de consumo* (la tarifa horaria de potencia y los complementos por discriminación horaria e interrumpibilidad). La experiencia del operador del sistema en la aplicación de estos elementos regulatorios en los episodios de demanda extrema y de cortes parciales de suministro del día 17 de Diciembre de 2001 fue muy positiva. Sin embargo, la estructura tarifaria actual contiene ciertas ineficiencias que pueden ser objeto de mejora.

- *En los Reales Decretos de tarifas en los años 1995, 1997 y 1998 se fijaron unas dotaciones aproximadas de unos 32 millones de euros (5.300 millones de pta) cada año destinadas a los programas de gestión de la demanda*. La experiencia fue positiva en general, ya que con la mayoría de las actuaciones, consistentes en incentivar económicamente la penetración de nuevas tecnologías de consumo eficiente (como las lámparas de bajo consumo, los electrodomésticos de clase A, los sistemas de regulación de motores o las bombas de calor) se consiguieron unos ahorros energéticos que amortizaron estos incentivos en pocos años. Sin embargo, estos programas se interrumpieron, y no es hasta el año 2004 cuando el Real Decreto de tarifas contempla de nuevo una dotación por este concepto de 10 millones de euros, una tercera parte de las establecidas anteriormente.

No obstante lo anterior, aún es necesario completar la regulación actual para poder desarrollar las políticas vigentes. Entre otros aspectos, se debería:

- Desarrollar las normas específicas de conexión y operación de las instalaciones de producción en régimen especial.
- Incorporar la Directiva de cogeneración.
- Establecer mecanismos concretos para implementar las actuaciones previstas en la E4.

En definitiva, parece que estamos en el buen camino respecto a las políticas energéticas, tanto en la UE como en nuestro país, pero sin embargo, nuestro desarrollo energético dista de ser sostenible. Por ello, se ha de profundizar aún mas en estas políticas para adoptar medidas adicionales y concretas que implementen las estrategias, con el fin de que nuestro desarrollo energético pueda llegar a ser sostenible; en el caso español, sería conveniente estudiar la posibilidad que la opción nuclear puede brindar en la ayuda a alcanzar el objetivo, complementada con otras estrategias libres de CO_2.

13.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Mientras que los efectos del consumo energético sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y sobre el calentamiento global si han sido objeto de múltiples análisis, tal y como señala IPCC (2001) muy pocos estudios han profundizado sobre los efectos del cambio climático en la demanda de energía. Las relaciones entre las variables climatológicas y el empleo de energía han sido estudiadas por diversos autores (Quayle y Diaz (1979); Le Comte y Warren (1981); Warren y LeDuc (1981); Badri (1992); Yan (1998); Lam (1998); o Pardo et al. (2002), entre otros), pero, tal y como señalan Ruth y Amato (2002), hasta la fecha existen pocos análisis sobre las implicaciones a largo plazo del cambio climático en los patrones de comportamiento del empleo de la energía y las consecuencias sobre las decisiones de inversión asociadas.

De la revisión bibliográfica efectuada se observan múltiples efectos previsibles, pero asimismo una gran variabilidad en las consecuencias; así, por ejemplo, Segar et al. (1992) estiman que la demanda de energía en puntas de verano crecería en Israel un 10% ante incrementos de la temperatura de 4º C, mientras que Cartalis et al. (2001), para el caso griego, plantean que un incremento en 1º C supondría una disminución de la demanda para calefacción del 10% frente a un incremento del 28.4% en la demanda para refrigeración. Sailor (2001), citado en Ruth y Amato (2002),afirma que un incremento de 2º C en la temperatura provocaría un incremento en el consumo de electricidad per cápita del 11.6% en Florida frente a una disminución del 7.2% en Washington; Warren y LeDuc (1981) efectúan una estimación del consumo y de los precios del gas natural en nueve zonas de EEUU, hallando diferencias significativas entre ellos.

Este conjunto de citas nos lleva a una consecuencia fundamental, quizá la más importante de este epígrafe: es necesario conocer con más profundidad el efecto que el cambio climático puede tener sobre la demanda de energía a nivel regional y por sectores económicos. Y todo ello por distintas razones:

1. Los escenarios generalistas de cambio climático pueden llevar a pérdidas muy importantes de información; así, y en el caso español, deberíamos conocer si el previsible incremento de la temperatura media será homogéneo, o si bien afectará más a ciertas regiones y menos a otras;
2. No sólo es importante el conocimiento del efecto en la temperatura media, sino el efecto de las máximas y mínimas;
3. Las infraestructuras locales son distintas a nivel regional; un incremento de las máximas en el litoral cantábrico provocaría un impacto distinto que en el levantino, debido a la diferencia en los equipamientos. En este sentido, es interesante el informe de EIA (1999), donde se señala que sólo el 8% de las residencias familiares en Nueva Inglaterra posee instalaciones de aire acondicionado, frente a la media norteamericana del 47%;
4. Respecto del elenco de indicadores propuesto para la detección del cambio climático en relación con el sector energético, se precisa la elaboración de modelos que desagreguen los distintos elementos que influyen en la evolución de aquellos.
5. En concreto, es necesario discernir entre el efecto renta/riqueza y el efecto temperatura en periodo estival por regiones, con el fin de identificar correctamente el efecto del posible cambio climático.

Por todo ello es imprescindible por un lado la generación de escenarios de cambio climático a mediana o pequeña escala para simular efectos en la demanda energética, por un lado. Y por otro, de esos escenarios surgirán estimaciones de la oferta y de su estructura, básicamente en lo relativo a hidraulicidad, viento y precipitaciones. De las dos primeras surgirán componentes directos sobre la estructura de la oferta, mientras que de la tercera (obviando sus efectos sobre la hidraulicidad) surgirán estimaciones sobre la forma de distribución de energía.

Es asimismo muy importante, considerando que uno de los efectos del incremento de la temperatura media del planeta es el de la subida del nivel del mar, investigar sobre los efectos que en la demanda energética pueda tener la construcción de centrales mitigadoras de estos efectos. En un país como el nuestro, rodeado de mar en tres cuartas partes, tales efectos pueden ser muy importantes.

Es necesario profundizar en los efectos que las variables climatológicas pueden tener en la demanda de energía a nivel nacional; así, hasta la fecha sólo los artículos de Pardo *et al.* (2002), Torró *et al.* (2001), Valor *et al.* (2001a, 2001b) y Climent *et al.* (2003) han incidido en la cuestión. Y siempre desde una perspectiva media y global, esto es, mediante el empleo como indicador de la temperatura su valor medio, y a nivel nacional, mediante el empleo de cuatro estaciones meteorológicas locales (Madrid, Valencia, Bilbao y Sevilla); la razón fundamental esgrimida por los autores (por ejemplo en Climent *et al.* 2003) es la no desagregación de la

demanda de energía a nivel regional y sectorial. Precisamente es ésta una de las principales demandas de los investigadores españoles, pues la desagregación existente en la actualidad por regiones y sectores de actividad es cuanto menos insuficiente.

13.11. BIBLIOGRAFÍA

Alcántara V. y Padilla E. 2003. Key sectors in final energy consumption: an input-output application to the Spanish case. Energy Policy 31.

Ayala-Carcedo F.J. 2003. Impactos del Cambio Climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad física y ecológica del Plan Hidrológico Nacional 2001. En: Arrojo y Del Moral (eds.). La Directiva Marco del Agua: Realidades y Futuros. Fundación Nueva Cultura del Agua, Zaragoza. Pgs. 253-271.

Ayala-Carcedo F.J. 2004. La realidad del Cambio Climático en España y sus principales impactos ecológicos y socioeconómicos. Industria y Minería (en prensa).

Badri M. A. 1992. Analysis of Demand for Electricity in the United States. Energy 177.

British Petroleum. 2004. Statistical Review of World Energy.

Cartalis C., Synodinou A., Proedrou M., Tsangrassoulis A. y Santamouris M. 2001. Modifications in energy demand in urban areas as a result of climate changes: an assessment for the southeast Mediterranean region. Journal of Energy Conversion and Management 42.

Climent F., Valor E., Torró H. y Caselles V. 2003. Incidencia de la temperatura en el consumo de gas y electricidad en España. Información Comercial Española. Revista de Economía 808

De Paz Cobo S. 2003. La transferencia alternativa de riesgos: aportaciones desde el mercado de reaseguros. Tesis doctoral. Madrid.

DGPEM. 2003. Boletín Trimestral de Coyuntura Energética. Tercer Trimestre. Dirección General de Política Energética y Minas, Ministerio de Economía.

EEA. 2003. Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2001 and inventory report 2003. European Environment Agency, Technical Report nº 95.

EIA. 1999. A Look at Residential Energy Consumption in 1997. Washington, D.C., Energy Information Administration.

IPCC. 2001. Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Ginebra. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Labandeira X. y Labeaga J.M. 2002. Estimation and control of Spanish energy-related CO_2 emissions: an input-output approach. Energy Policiy 30 (7).

Lam J. C. 1998. Climatic and Economic Influences on Residential Electricity Consumption. Energy Conversion and Management 397.

Le Comte D. y Warren H. 1981. Modeling the Impact of Summer Temperatures on National Electricity Consumption. Journal of Applied Meteorology 20.

Lloyd's. 1999. Hedging your bets to beat weather. Lloyd's list insurance.

Ministerio de Economía. 2003a. La energía en España 2002.

Ministerio de Economía. 2003b: Memoria Económica del Proyecto de Real Decreto de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España E4.

Quayle R. y Díaz H. 1979. Heating Degree Day Data Applied to Residential Heating Energy Consumption. Journal of Applied Meteorology 19.

Pardo A., Meneu V. y Valor E. 2002. Temperature and Seasonality Influences on the Spanish Electricity Load. Energy Economics 241.

Red Eléctrica de España. 1998. Atlas de la demanda eléctrica española (Proyecto INDEL).

Red Eléctrica de España. 2004. Avance del informe anual 2003.

Ruth M. y Amato A. 2002. Regional Energy Demand Responses to Climate Change: Methodology and Application to the Commonwealth of Massachusetts, North American Meeting, Regional Science Association International, San Juan, Puerto Rico, 14-18 Noviembre.

Sailor D. 2001. Relating residential and commercial sector electricity loads to climate - evaluating state level sensitivities and vulnerabilities. Energy 26.

Segal M., Shafir H., Alpert P., Mandel M. y Balmor Y. 1992. Climatic-related Evaluations of the Summer Peak-Hours' Electric Load in Israel. Journal of Applied Meteorology 31(12).

Torró H., Meneu V. y Valor E. 2003. Single factor stochastic models with seasonality applied to underlying weather derivatives variables. Journal of Risk Finance, Summer.

Valor E., Meneu, V. y Caselles V. 2001a. Daily air temperature and electricity load in Spain, Journal of Applied Meteorology 40(8).

Valor E., Pardo A., Meneu V. y Caselles V. 2001b. Consumo eléctrico y meteorología. Revista Española de Física 154.

Valor E., Climent F.J., Meneu V. y Caselles V. 2002. El modelo español de consumo sectorial de electricidad. Revista Española de Física 16(3).

Warren H. y LeDuc S. 1981. Impact of Climate on Energy Sector in Economic Analysis. Journal of Applied Meteorology 20.

Yan Y. 1998. Climate and Residential Electricity Consumption in Hong Kong. Energy 23 (1).

14. IMPACTOS SOBRE EL SECTOR TURÍSTICO

Águeda Esteban Talaya, Francisco López Palomeque y Eugeni Aguiló Pérez

Contribuyentes

B. Gómez Martín

Revisores

A. Huéscar, R. Lucas, O. Perelli, F. Prats, F. Vera

A. Perry

RESUMEN

La *sensibilidad del turismo al clima* es muy elevada en España ya que sus buenas condiciones climatológicas, sobre todo en el litoral mediterráneo, suponen un factor de influencia decisivo sobre las zonas geográficas de atracción, los calendarios de actividad, las infraestructuras turísticas y su funcionamiento y las condiciones de disfrute y bienestar de los turistas, además de ser uno de los principales elementos de reclamo y atractivo de nuestro país.

Los *impactos del cambio climático* afectarían, en primer lugar, sobre el *espacio geográfico-turístico* pueden producir alteraciones en sus ecosistemas, ya en condiciones de alta fragilidad, dejando de reportar los beneficios sociales, económicos y ambientales disfrutados hasta el momento. La escasez de agua provocaría problemas de funcionalidad o viabilidad económica de ciertos destinos. El incremento de las temperaturas puede modificar los calendarios de actividad. El aumento del nivel del mar amenazaría la localización actual de determinados asentamientos turísticos y de sus infraestructuras. Estos impactos tendrán peor incidencia en aquellas zonas más deterioradas, con importantes desequilibrios y con mayor conjunción de los diferentes efectos climáticos. Las *zonas más vulnerables* al cambio climático se localizan en el espacio litoral (con un alto grado de artificialización) que configura el principal producto turístico español, turismo de sol y playa, y las zonas de montaña, sobre todo en el turismo de nieve.

La *demanda turística* más afectada es la asociada al turismo de ocio y vacaciones (mayoritario en nuestro país). Los turistas modificarían su comportamiento disminuyendo la estancia media en cada destino, retrasando el momento de la decisión del viaje y cambiando la dirección de sus visitas hacia otros lugares, en el caso de los turistas residentes en el extranjero quedándose en sus propios países y para la demanda nacional con desplazamientos hacia las costas del norte o el interior. También podrían incrementarse los viajes en las interestaciones (primavera y otoño).

Sobre la *oferta turística*, el principal impacto lo sufrirán de forma directa los alojamientos y agencias de viajes receptivas de los destinos más afectados, con importantes consecuencias económicas, principalmente en aquellas que más dependen de fuertes inversiones en infraestructuras. La repercusión más importante para el conjunto de la economía sería una *disminución de los ingresos por turismo* y para las zonas más vulnerables, que ya sufren fuertes desequilibrios, una previsible transformación de sus condiciones económicas a medio y largo plazo y, en el peor de los escenarios, un progresivo cierre de establecimientos turísticos y no turísticos, incremento del desempleo y estrangulamiento económico de los destinos.

Existen muchas *incertidumbre* sobre la evolución turística, así se desconocen las posibles variaciones del comportamiento de la demanda debidas al cambio climático y el nivel cuantitativo del impacto que supondría, sobre todo en lo referente a la pérdida de la sensación de confort y seguridad de los turistas, la pérdida de atractivo de un destino o una temporada para el viaje. La *posibilidad de detección del cambio* está muy limitada en la actualidad, por lo que se hace imprescindible la *generación de sistemas de indicadores* que puedan mostrar y diferenciar los impactos por tipos de zonas y productos turísticos principalmente de litoral y montaña. Además, las *necesidades de investigación* en la relación cambio climático y turismo requieren abrir y mantener una *línea específica de financiación proyectos de investigación*, con programas explícitos sobre este tema, que se integre en el Plan Nacional de Investigación y Desarrollo e Innovación (PN I+D+I).

14.1. INTRODUCCIÓN

14.1.1. Singularidad y delimitación del turismo

El turismo es un sistema complejo de difícil delimitación ya que comprende un conjunto de actividades de diferente naturaleza de tipo económico, social, geográfico, cultural, deportivo, medio ambiental e institucional. El sistema turismo, además, tiene un carácter transversal y heterogéneo que le dota de cierta singularidad como actividad al existir una fuerte interrelación entre:

- *Factores económicos*: alojamiento, transporte, alimentación, sector inmobiliario y otros consumos y servicios complementarios que pueden ser potencialmente utilizados por los turistas.
- *Factores sociales:* relacionados principalmente con la ocupación y el disfrute del tiempo de ocio, junto con el contacto con otros espacios sociales, sus costumbres y formas de vida.
- *Factores naturales*: referidos a los medios físicos como las costas, la montaña, los espacios de interior o los asociados a los espacios naturales protegidos, que suponen la composición principal de los recursos turísticos. El clima es un elemento clave del medio ambiente natural donde se desarrolla el turismo.
- *Factores culturales*: donde destaca la presencia del patrimonio histórico como fuente de atracción de los turistas.
- *Factores políticos*: debido a la fuerte presencia de las instituciones públicas tanto en las inversiones en infraestructuras como en la participación de la promoción de los destinos turísticos, además de la directa participación en los planes de ordenación del territorio.

El *sistema turístico* está formado por *cuatro elementos básicos:* el *espacio* geográfico-turístico, la *demanda*, la *oferta* y los *agentes*. Todos los factores y elementos fundamentales interactúan en un determinado marco institucional y legal y en una misma localización: el *destino turístico*, donde se comparten los recursos por un determinado periodo de tiempo, que junto con los servicios utilizados, conforman la oferta turística. Espacio y tiempo son los dos principales componentes sobre los que se sustenta el turismo.

14.1.2. Situación actual del turismo en España

Resulta de sobras conocido que España es un país de una fuerte especialización turística al haberse convertido a lo largo de las últimas cuatro décadas en un país de destino básico desde los países europeos más desarrollados y también, aunque en menor medida, de otros países de la OCDE. De hecho, junto a Estados Unidos y Francia, España se disputa la primacía en el turismo mundial según las cifras aportadas por la Organización Mundial del Turismo (OMT) que indican que nuestro país recibe aproximadamente el 7,5 por 100 de los 694 millones de llegadas de turistas internacionales que se producen en todo el mundo, estimadas en el año 2003.

En el Mediterráneo están surgiendo otros países que ya compiten con los destinos más tradicionales de España, Francia e Italia. Entre ellos, se pueden destacar a Grecia con 14 millones de turistas, Turquía con 12,8 millones de turistas y Croacia con 7 millones en el año 2002 como competidores emergentes que están experimentando crecimientos interanuales superiores a los más tradicionales.

El turismo en España está caracterizado por el volumen de la demanda procedente de los mercados turísticos tanto la realizada por los residentes en países extranjeros hacia nuestro país como la procedente de españoles. Los aspectos más destacables que configuran la demanda turística son la motivación del viaje, el destino elegido y los consumos de alojamiento y transporte, principalmente.

Los principales flujos de la *demanda turística receptiva* procedente del mercado internacional en España durante el año 2003 [1] son:

- Los *visitantes extranjeros entrados por fronteras* se estiman en aproximadamente 82,6 millones.
- El segmento de *turistas* (visitantes de, al menos 24 horas de estancia) supone el 63,6 por 100 del total de visitantes, es decir, aproximadamente 52,5 millones.
- Los *ingresos por turismo* (según la información suministrada por el Banco de España, 2004) han supuesto un total de 36.871 millones de euros.
- Los viajeros extranjeros alojados en establecimientos hoteleros ascienden a 27,3 millones.
- Las *pernoctaciones hoteleras* generadas por los viajeros residentes en el extranjero ascienden a 136,8 millones de noches.

Considerando los efectos del cambio climático, hay que tener en cuenta que de los 52,5 millones de turistas extranjeros en España, alrededor de 40 millones provienen de países del Centro y Norte de Europa cuya motivación más importante es aproximarse a un clima soleado cerca del litoral, definición que resulta más adecuada que la tradicional de sol y playa.

A la demanda procedente del exterior hay que añadir el *turismo interno* con importantes flujos de demanda, que pueden llegar a tener en ciertas zonas una mayor relevancia cuantitativa que la proporcionada por el turismo receptivo internacional. Los viajes realizados por los españoles suponen una importante cuota del mercado turístico español, ya que sus desplazamientos se producen principalmente por el territorio nacional (Esteban Talaya 2003). Los principales flujos de la *demanda turística de los españoles* durante el año 2003 son:

- Los españoles realizaron un total de casi 129,2 millones de *viajes*.
- Los *viajes de corta duración* a segundas residencias que supone un porcentaje muy elevado sobre el total: 65,25 por 100 con 84,3 millones de viajes.
- El resto de los *viajes,* denominados *turísticos*, se cifra en 44,9 millones.
- Los *pagos por turismo* realizados por los españoles en el extranjero han sido de 7.315 millones de euros.
- Los viajeros españoles *alojados en establecimientos hoteleros* en España han sido 35,2 millones.
- El total de *pernoctaciones* realizadas por los viajeros españoles en hoteles en España asciende a 91 millones de noches.

Desde la *perspectiva de la oferta*, España cuenta con un número elevado de empresas y establecimientos, configurando un sector altamente fragmentado y atomizado, con un conjunto amplio de actividades. Algunos datos de interés representativos de los principales subsectores son:

- 17.000 establecimientos hoteleros con aproximadamente 1,4 millones de plazas.
- 1.200 campings, con cerca de 770.000 plazas.
- 127.000 apartamentos reglados con 400.000 plazas, aunque las viviendas de potencial uso turístico se estiman en aproximadamente 5,5 millones.
- 9.000 agencias de viajes entre centrales y sucursales.
- Otra oferta: 29 estaciones de esquí 112 estaciones termales 245 campos de golf, 845 Parques Nacionales y Espacios Naturales Protegidos.

[1] Las fuentes principales de los datos de demanda son: en términos físicos el Instituto de Estudios Turísticos de la Secretaría General de Turismo; en términos monetarios el Banco de España y de los alojamientos hoteleros el Instituto Nacional de Estadística.

14.1.3. Identificación de espacios y destinos turísticos

Uno de los rasgos básicos del turismo en España es la *diversidad* y la *abundancia de sus recursos*, cuya explotación ha dado lugar a procesos de desarrollo turístico diferenciados en el tiempo y en el espacio y a la creación de un gran número de productos que, finalmente, han dibujado un mapa turístico asimétrico, donde se identifican espacios con intensidades turísticas desiguales y cualitativamente distintos. De hecho, la explotación de los recursos que argumentan la localización espacial del turismo es el hecho que permite diferenciar los entornos o ámbitos territoriales, configurados por la función turística (Vera *et al.* 1997).

En un *primer nivel de identificación* de espacios y destinos turísticos en España se recurre a la consideración de *entornos geográficos*, definidos tanto por la naturaleza de los componentes del medio como por su función territorial, en cada caso. Entre las condiciones geográficas que perfilan los rasgos de dichos entornos destaca el clima, que confiere peculiaridad y diversidad a los mismos. El resultado es la identificación de *cuatro entornos* que suponen una primera zonificación turística: el *espacio litoral*, el *espacio de montaña*, el *espacio rural* y el *espacio urbano* (López Palomeque y Vera Rebollo 2002).

En España, el *espacio turístico litoral* ha tenido desde los inicios del turismo de masas una importancia destacada, y cabe recordar que hoy el litoral es el ámbito que concentra la mayor parte de la oferta y del movimiento turístico y muestra, asimismo, los mayores efectos de transformación y reorganización del territorio. El litoral español se extiende por 3.904 kilómetros peninsulares y 2.036 kilómetros insulares, que presentan, no obstante, condiciones ambientales diferenciadas y atractivos y posibilidades distintas para el turismo. Sin duda, en la contrastada realidad turística y en las diferencias de potencialidad de este litoral desempeña un papel clave la diversidad climática de este entorno y de la totalidad del territorio español. En la diversidad climática de España se distingue, en un primer nivel, los siguientes climas: el clima mediterráneo -con su amplio abanico de matices y transiciones-, el clima atlántico, el clima continental y el clima de montaña.

Además de la importancia del turismo litoral, cabe señalar que las prácticas turísticas y recreativas en *espacios urbanos, rurales y de montaña* han alcanzado un notable desarrollo, en consonancia con las nuevas tendencias de la demanda y han sido favorecidos por las respuestas de los distintos agentes, públicos y privados. La puesta en valor de lo natural y lo rural ha abierto nuevas perspectivas para el turismo como instrumento de desarrollo en áreas deprimidas, mientras que los espacios urbanos constituyen escenarios de ocio y turismo, asociados a la cultura y a la oferta global y diferenciada de cada ciudad, permitiendo argumentar estrategias sobre el modelo y la renovación de la escena e imagen urbana (Vera *et al.* 1997). Como resultado, en los últimos años –y también como previsión de futuro- se constatan tendencias diversificadoras en la localización turística, que generan importantes consecuencias de índole territorial, económico y social. Este proceso conduce a la extensión espacial del turismo a todo el territorio (generalización espacial del turismo o "turistificación" del territorio), fenómeno que es más observable a escala intermedia (López Palomeque y Vera Rebollo 2002).

En consecuencia, como esquema operativo para la redacción del presente informe sobre el impacto del cambio climático en el Sector Turismo se ha optado por considerar como *zonificación básica* de referencia los cuatro entornos señalados. Sobre el mapa de España es fácil identificar de manera esquemática los cuatro entornos turísticos, aunque esta escala de análisis presenta un grado de abstracción que oculta la heterogeneidad y los problemas específicos de cada uno de ellos, tanto desde una perspectiva formal como funcional y, sobre todo, sus contrastes ambientales y su diversidad climática. Y también dificulta el análisis del impacto diferenciado que sobre los distintos ámbitos territoriales de un mismo entorno pueda provocar el cambio climático.

Para abordar el espacio litoral se consideran las siguientes zonas: el litoral mediterráneo (septentrional, central y meridional), el litoral atlántico (cantábrico, atlántico norte y sur), las islas Baleares y las islas Canarias. Para tratar el espacio rural se hace referencia, en cada caso, a las zonas geoturísticas más destacadas del interior de España; cuando se aborde el espacio de montaña, se consideran los macizos de mayor dimensión, que son los que albergan el turismo de nieve, y cuando se trate el espacio urbano se mencionan las ciudades más significativas del turismo urbano. Cabe añadir que en el uso de esta zonificación se prestará mayor atención a aquellas zonas más vulnerables al cambio climático y, en consecuencia, se primarán las referencias a las *zonas y productos litorales* (véase el apartado 14.4.2) y a las *zonas y productos de montaña* (véase el apartado 14.4.3).

Además, esta zonificación se completa, cuando sea necesario, con consideraciones a otros dos tipos de unidades espaciales en cada uno de los entornos. Por una parte, las *zonas geoturísticas*, que se dibujan en función de distintas circunstancias, desde razones de operatividad empresarial, de imagen, de promoción o de política turística, hasta la existencia de unas relaciones y componentes espaciales que confieren una situación de especialización funcional del territorio o un carácter homogéneo. Por ejemplo, en el litoral, se identifican la Costa Brava, la Costa Daurada, la Costa Blanca o la Costa del Sol, entre otras. Por otra, las *regiones político-administrativas* -las Comunidades Autónomas- entendidas en este contexto como "regiones" turísticas. La consideración de las Comunidades Autónomas se fundamenta en *dos hechos*:

- En general, por la importancia que tiene la administración pública como agente gestor de los espacios turísticos.
- En particular, porque en el tema de los efectos del cambio climático en el turismo serán, en gran parte, los poderes públicos los que tendrán que tomar decisiones y llevar a cabo acciones.

14.1.4. Impacto del turismo en la economía

Como se ha indicado, el turismo internacional aportó en el año 2003, 36.800 millones de euros, lo que supuso un 3,7 por 100 de crecimiento sobre el año 2002. En términos globales, la influencia del turismo en la economía nacional es relevante, en aspectos como su contribución al Producto Interior Bruto (PIB), a la generación de empleo y a la cobertura del déficit comercial de la Balanza de Pagos. Algunos datos que representan esta importancia son los siguientes:

- La *contribución del turismo al PIB* se cifra para el año 1999 en el 12 por 100, con un incremento de más de un punto en tres años.
- La estimación del *consumo turístico* supone un total de 77.500 millones de euros, de los aproximadamente el 50 por 100 procede del consumo realizado por los españoles.
- El consumo turístico en España se concentra básicamente en *alojamientos y restauración* con aproximadamente el 60 por 100 del total.
- En el año 2003 los ingresos por turismo supusieron el 77,4 por 100 de la *cobertura del déficit comercial.*

Con relación al empleo, los afiliados a la seguridad social correspondiente a los subsectores del sector turístico supuso en el año 2002 algo más de 2 millones de *empleos* que suponen un 12,5 por 100 del empleo en el conjunto de sectores de la economía nacional. Si se tiene en cuenta que la dependencia del turismo de otros sectores económicos de la agricultura, la industria y, sobre todo, los servicios es muy elevada, hay que concluir que, a través de los efectos multiplicadores, una parte muy significativa de la economía española está vinculada a la evolución del turismo.

Considerando que, por definición, el turismo supone desplazamientos de un lugar a otro, es esencial el papel primordial de las *nuevas tecnologías de la información y la comunicación* para vincular una demanda y una oferta separadas en el espacio. Este mismo hecho implica, además, aumentos significativos temporales de población que precisan la provisión de un número elevado de infraestructuras y servicios que hacen si cabe más complejo el funcionamiento del sector pero que, a la vez, contribuyen a crear renta y empleo en estas actividades.

Asumiendo el predominio del turismo de "sol y playa" se observa una *creciente segmentación del mercado* que a los efectos del cambio climático resulta del máximo interés, ya que el impacto afectará más a un tipo de turismo que a otro. Si cada turismo genera distintas capacidades de gasto y diferentes efectos multiplicadores resulta esencial conocer el posicionamiento y la evolución de los distintos mercados. Al mismo tiempo, algunas zonas o destinos turísticos, principalmente los tradicionales, dependen casi exclusivamente del turismo para el desarrollo y evolución de sus economías locales, ya que el resto de los sectores están subordinados a la afluencia de turistas.

La importancia del turismo en la economía española queda limitada a cifras de carácter muy general, como las anteriormente expresadas, lo cuál no facilita al análisis pormenorizado de la influencia de determinados "*shocks*" en el conjunto del sector y en los distintos subsectores que lo integran. En consecuencia, se hace cada vez más imperioso disponer de indicadores económicos y turísticos que vayan más allá del dato relativo a los turistas, lo que permitiría valorar mejor la rentabilidad por tipos de productos, países de origen y destinos.

14.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

La influencia del clima sobre el turismo se manifiesta a *tres niveles* ya que el clima puede actuar como factor de localización turística, como recurso turístico y como atractivo turístico (Gómez Martín 2000, 2004d, 2004e):

- *El clima como factor de localización turística.* El clima es un elemento geofísico o natural del espacio geográfico que se configura como factor de localización turística al intervenir en los procesos de funcionalización de un territorio. Es decir, el clima como elemento del espacio geográfico no es neutro sino que presenta unas características diferenciales que a veces impiden, otras veces dificultan y otras favorecen el asentamiento de las actividades turísticas. En este sentido, en España, el nacimiento de buena parte de los centros turísticos existentes en la actualidad ha estado guiado por el deseo de sacar el mejor partido a unas favorables condiciones climáticas locales y regionales (Gómez Martín 1999a, 2000, Vera Rebollo 1985).

- *El clima como recurso turístico.* El clima existe al margen de cualquier explotación turística, pero se convierte en recurso turístico en el momento en que es incorporado a un bien o servicio turístico, siendo éstos promovidos para el consumo y utilizados con fines mercantiles a través de cualquier canal de comunicación y comercialización, siempre con el objeto de satisfacer las necesidades latentes en la demanda. El recurso turístico clima se configura como básico cuando sin él es difícil el desarrollo y la consolidación de determinadas actividades turísticas sobre un territorio (actividades dependientes del clima y del tiempo meteorológico). Por otra parte, el clima se configura como recurso complementario cuando no determina la actividad turística en sí y se convierte en elemento subsidiario de otros recursos (actividades sensibles al clima y al tiempo meteorológico). En España, son las actividades y modalidades turísticas dependientes de las condiciones atmosféricas las que generan mayores flujos turísticos (sol y playa, turismo de nieve, turismo náutico…). De hecho, buena parte de los productos turísticos ofertados incorporan como

input básico este elemento del medio natural, demostrando la elevada potencialidad turística del recurso clima (Gómez Martín 2000).

- *El clima como atractivo turístico.* La introducción del clima en el producto turístico va más allá de la simple consideración de "materia prima" ya que en muchas ocasiones se convierte en un elemento capaz de aportar calidad a la práctica turística: las condiciones atmosféricas pueden contribuir a que los turistas lleven a cabo sus actividades con unos niveles óptimos de disfrute, seguridad y confort. Es por ello que el clima muchas veces se convierte en factor de atracción, es decir, en un atributo o característica del producto o destino turístico que acaba pesando con carácter decisivo en el acto de compra que realiza el turista. Es esta una de las razones por las que el clima se incorpora en la imagen de los destinos, desempeñando un importante papel en su promoción turística. El análisis de la información verbal e icónica de los folletos turísticos españoles evidencia la presencia constante de referencias directas e indirectas al clima, confirmando su papel como factor de atracción (Gómez Martín 1999b, Olcina Cantos y Vera Rebollo 1998).

Estas y otras constataciones teóricas acerca de la importancia del clima como factor de localización, recurso y atractivo turístico se concretan en unos aspectos específicos de la realidad turística española (Perry 1972, Mings 1978, Baretje y Crespo 1992, Smith 1993, Maddison 2001). De este modo, los *principales aspectos de la relación entre clima y turismo* son (Gómez Martín 2000, 2004d, 2004e).

14.2.1. Los climas del territorio español afectan al tipo de marco ambiental en donde las actividades turísticas se van a desarrollar, conformando en la mayoría de los casos espacios turísticamente atrayentes y funcionales

Así, se produce una alta concentración geográfica en los destinos turísticos de la costa mediterránea, altamente especializados en el producto vacacional y de ocio de sol y playa por mostrar unas condiciones óptimas para su desarrollo (véanse las Figuras 14.1 y 14.2). El 55,3 por 100 de los turistas residentes en el extranjero prefieren como destino para pasar sus vacaciones las Comunidades Autónomas de Cataluña, Baleares y Andalucía. De forma similar, el 45,6 por 100 de los viajes turísticos de los españoles tienen como destino las Comunidades Autónomas de Andalucía, Valencia y Cataluña. Lo mismo sucede con el archipiélago Canario (el 20,6 por 100 de los turistas del extranjero tienen como destino esta región). De todos modos, existen *zonas en el litoral mediterráneo* (extremo SE) afectadas por unas características climáticas extremas que conforman *sistemas frágiles*, afectados en muchas ocasiones por conflictos y problemas de funcionalidad (Perry 2003).

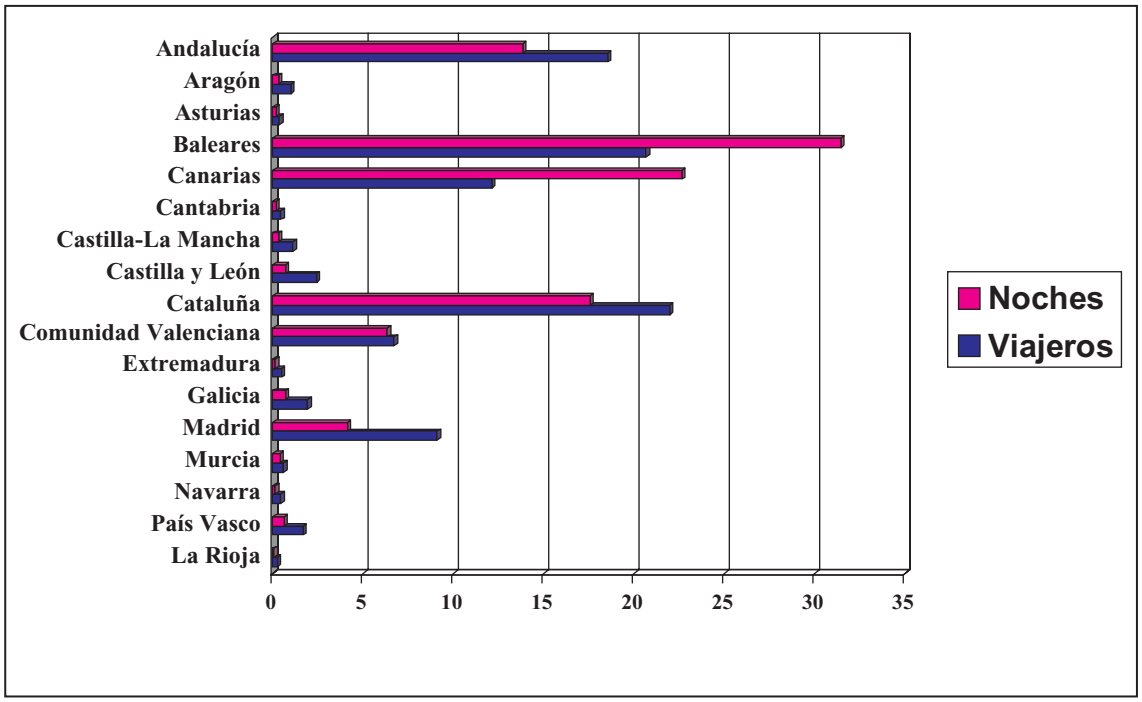


Fig. 14.1. *Distribución por comunidades autónomas de turistas extranjeros en hoteles (%)–2003. Fuente: Elaboración propia basada en datos procedentes del Instituto Nacional de Estadística (2004).*

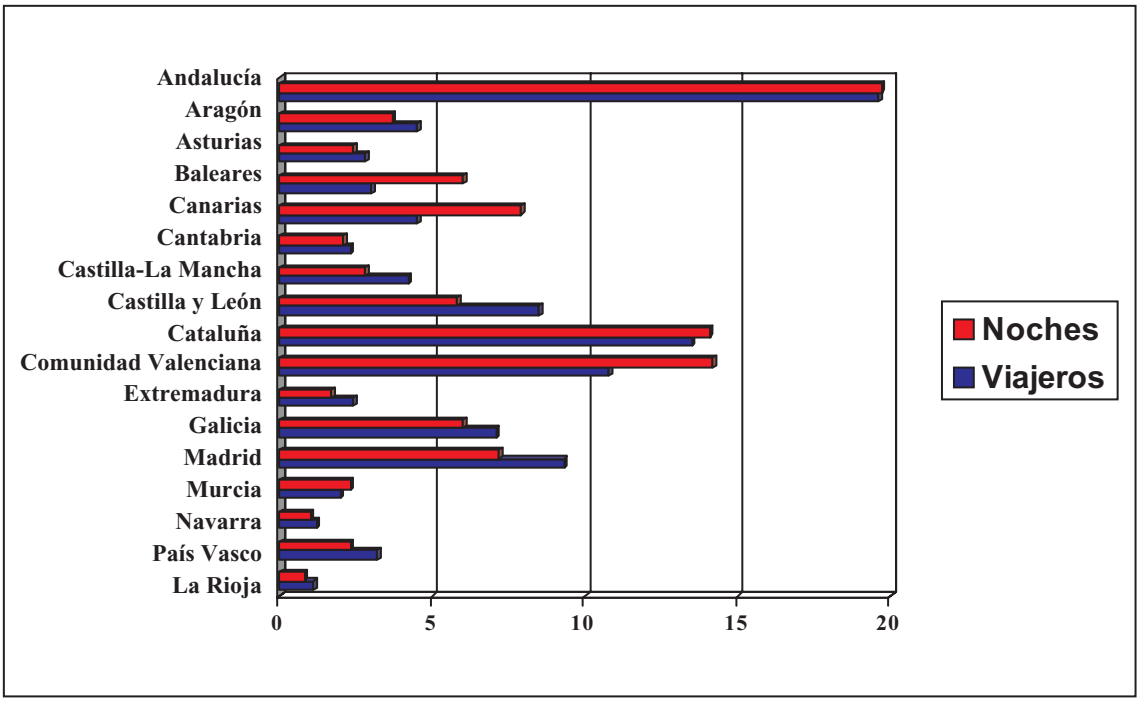


Fig. 14.2. *Distribución por comunidades autónomas de turistas españoles en hoteles (%)–2003. Fuente: Elaboración propia basada en datos procedentes del Instituto Nacional de Estadística (2004).*

14.2.2. El clima ejerce una gran influencia en el establecimiento de los calendarios temporales de la actividad turística

En este sentido, es preciso indicar que aunque los calendarios de potencialidad climático-turística de la mayoría de destinos españoles muestran unos amplios períodos favorables que podrían incidir en la desestacionalización (Gómez Martín 2000, 2004a, Gómez Martín et al. 2002), la concentración temporal de la demanda es acusada a escala global. De este modo, el 48,8 por 100 de los viajes de la demanda nacional se concentran durante los meses de julio, agosto y septiembre (véase Figura 14.3); el 56 por 100 de los viajes de la demanda receptiva lo hace durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

14.2.3. El tiempo meteorológico incide sobre la propia actividad turística y su programación, sobre todo si ésta es practicada al aire libre (De Freitas 2001)

14.2.4. Las condiciones climáticas y meteorológicas influyen sobre las edificaciones e infraestructuras turísticas

No sólo el clima y el tiempo hacen que una región vaya a ser, o no, frecuentada por los turistas, sino que también determinan en gran medida las formas de acogida y de estancia, los tipos de alojamientos (en España y, especialmente, en el sector mediterráneo el clima favorece la variedad de tipos de alojamiento: desde el camping hasta otras formas de acogida menos sensibles a la coyuntura meteorológica), la arquitectura turística en sí, los sistemas de acondicionamiento y hasta el propio diseño urbano (los urbanistas españoles saben de los efectos beneficiosos de la adecuada utilización de la jardinería y de ciertos elementos del mobiliario urbano -carpas, toldos, etc.- en el acondicionamiento de los espacios turísticos exteriores) (Gómez Martín 2004d, 2004e).

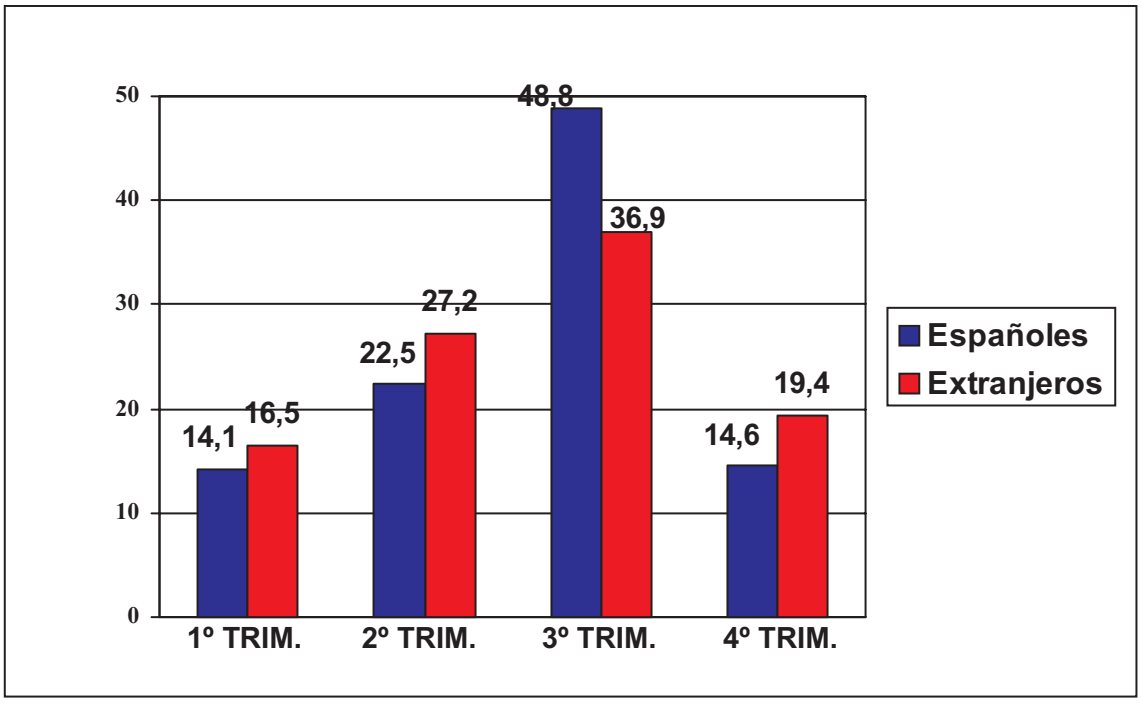


Fig. 14.3. *Distribución de turistas extranjeros y españoles por trimestres (%)-2003. Fuente: Elaboración propia basada en datos procedentes del Instituto de Estudios Turísticos (2004a y b).*

14.2.5. Las condiciones climáticas y meteorológicas ejercen una gran influencia en el buen funcionamiento de los transportes y comunicaciones, facilitando o condicionando el desplazamiento turístico

14.2.6. Las condiciones climáticas y meteorológicas influyen en la sensación de seguridad del turista

En este sentido es preciso indicar que *un riesgo elevado de catástrofes climáticas y en general de catástrofes naturales es incompatible con cualquier tipo de actividad turística.* En España, los sucesos extremos ligados al clima no son despreciables y suponen un importante factor a considerar en las tareas de planificación. De todos modos, la observación evidencia que el riesgo y/o el carácter catastrófico de muchos episodios depende de las inadecuadas intervenciones humanas sobre el espacio geográfico (incorrectas localizaciones de las infraestructuras y equipamientos turísticos, especialmente en puntos vulnerables como frentes costeros, riberas fluviales y laderas montañosas) (Gómez Martín 2004a, 2004b, 2004c, Olcina Cantos 1994).

14.2.7. Las características climáticas y meteorológicas conforman las condiciones ambientales e influyen en la percepción de disfrute y confort (sensación de bienestar) y en la salud de los turistas

Los climas que afectan al territorio peninsular e insular conforman, en condiciones normales, unos escenarios ambientales saludables y confortables para los turistas. De todos modos, la vertiente mediterránea y el interior peninsular se ven afectados en ocasiones por episodios extremos durante los períodos vacacionales (sobre todo olas de calor) que alteran las condiciones de confortabilidad, incidiendo a corto y medio plazo sobre la frecuentación turística.

14.2.8. Las condiciones climáticas y meteorológicas de un lugar se ofrecen a menudo como atractivo turístico y factor de reclamo

Aunque cada actividad turística reclame sus condiciones climático-meteorológicas y éstas se conviertan en factor de atracción y reclamo turístico, parece existir entre los turistas un gusto especial por el sol y las temperaturas relativamente elevadas (confort ambiental): para la mayoría de ellos es siempre complaciente llevar a cabo sus actividades (sean las que sean) en lugares caracterizados por registrar temperaturas suaves y elevada insolación. Así, por ejemplo, para los turistas británicos, el factor fundamental en la elección de España como destino turístico es el clima, especialmente entre aquellos que declaran venir por motivos vacacionales. Lo mismo sucede con los turistas de otras procedencias. Estas mismas preferencias se pueden observar también por modalidades turísticas (Gómez Martín 2000).

La mayoría de empresas turísticas españolas, conscientes de estas preferencias que manifiestan los turistas, incorporan el clima en la imagen de marca del producto a modo de factor de reclamo, ya que saben que éste puede influir sobre el comprador a la hora de elegir destino. Así, por ejemplo, la revisión de los folletos turísticos españoles acusa una presencia notable de los elementos atmosféricos tanto en la información icónica (logotipos, fotografías e ilustraciones) como en la información verbal (cuerpo de texto, tablas estadísticas, eslóganes y titulares) proporcionada en los mismos (Gómez Martín 1999a, 1999b).

14.2.9. Las condiciones climáticas y meteorológicas influyen en el grado de satisfacción del turista

Unas condiciones climáticas y meteorológicas que permitan al turista desarrollar sus actividades con un elevado grado de seguridad, confort y disfrute contribuyen a cubrir las

motivaciones que inicialmente le habían movido y, consecuentemente, contribuyen a elevar su grado de satisfacción. Así, por ejemplo, se puede observar como en el estudio de la Secretaría General de Turismo *Grado de satisfacción de la demanda turística nacional y extranjera en relación con el producto turístico español (1991)*, el "sol y el clima" aparecen entre los elementos que mejor impresión producen en el turista por su carácter satisfactor de necesidades: el 89 por 100 de las respuestas de los turistas españoles mostraban una impresión buena o muy buena del clima-tiempo registrado (puntuación muy elevada en la escala de satisfacción); entre los turistas extranjeros este porcentaje ascendía al 93,1 por 100. De todos modos, los resultados de los exámenes a lo largo de los años se encuentran sometidos, como es lógico, a los azares de la naturaleza (Gómez Martín 1999b, 2004d, 2004e).

14.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

14.3.1. Cambio Climático y sistema turístico

La relación entre los elementos atmosféricos y el turismo ha sido abordada tradicionalmente en un marco de variabilidad natural, ya que se consideraba que el clima era un recurso turístico natural especial entre los recursos turísticos naturales por ser renovable y no degradable. Sin embargo, la publicación en el año 2001 del Tercer Informe de Evaluación del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) ha evidenciado y confirmado que *los recursos atmosféricos también se ven sometidos a modificaciones* como consecuencia de algunas de las actividades que realiza el hombre. Este reconocimiento del cambio climático por causas antrópicas ha provocado que se replantee la relación tradicional clima-turismo, pero ahora en un contexto de cambio e incertidumbre (Gómez Martín 2004e).

Considerando que el *sistema turístico* está integrado por cuatro elementos fundamentales (el espacio geográfico-turístico, la demanda turística, la oferta turística y los operadores del mercado), es lógico pensar que todos ellos se puedan ver alterados, directa o indirectamente, por el fenómeno del cambio climático. Así, cabe esperar que el primer elemento afectado por el fenómeno sea el propio espacio geográfico-turístico y por derivación, y en este orden, la demanda, la oferta y los operadores del mercado. De todos modos, esta secuencia lógica se puede ver alterada para poder responder al cambio climático, sin poner en duda la eficiencia del sector. No en vano, el sistema turístico español presenta una probada capacidad o habilidad de adaptación: es un *sistema dinámico capaz de generar respuestas* y mucho más si se considera que, en este caso, el cambio es lento y, por tanto, permite planificar e intervenir con tiempo sobre los diferentes elementos del sistema para contrarrestar los posibles efectos derivados (Gómez Martín 2004e). Sin embargo, el grado de deterioro que existe en algunos destinos turísticos tradicionales muestra un escaso margen de maniobra y cualquier cambio puede empeorar aún más las actuales condiciones ya de por sí desequilibradas.

14.3.2. Repercusiones en el espacio geográfico-turístico

El clima es un elemento natural o geofísico que forma parte del espacio geográfico-turístico. Su modificación puede generar alteraciones en el resto de elementos geofísicos o geohumanos que conforman esta variable del sistema turístico, convirtiendo un espacio inicial atrayente y eficaz en un espacio carente de recursos, atractivo y funcionalidad.

El cambio climático se prevé que provoque una *reducción de las precipitaciones* (mayor en el sur peninsular) y *aumentos en su variabilidad interanual*. Del mismo modo, las *temperaturas serán previsiblemente ascendentes*, especialmente en verano y es más probable que se incrementen los *sucesos climáticos extremos* (ver capítulo 1). Estos cambios pueden generar una serie de *repercusiones sobre el espacio geográfico-turístico* ya que:

- Se pueden producir alteraciones (cambios significativos en los límites regionales o degradación-desaparición) en algunos de los *ecosistemas* caracterizados por tener un número elevado de hábitat ecológicos y alojar un porcentaje apreciable de la diversidad biológica del mundo (ver capítulos 2 y 3). Estos espacios naturales que se reparten por toda la geografía peninsular e insular y que se han configurado tradicionalmente como espacios atractivos desde un punto de vista turístico, pueden ver alteradas sus cualidades ecológicas y estéticas, sus condiciones de fragilidad y, en general, sus aptitudes turístico-recreativas, *dejando de reportar beneficios sociales, económicos y ambientales.*

- Se pueden producir cambios en el *ciclo hidrológico global*, generando impactos importantes en la distribución y la disponibilidad regional y temporal del agua (ver capítulo 7). La disminución de las reservas de agua puede ocasionar problemas de funcionalidad o viabilidad económica en muchos espacios turísticos actuales, en especial aquellos situados en el frente mediterráneo y en los archipiélagos balear y canario.

- Se pueden producir alteraciones notables en los espacios que hoy acogen al *turismo de invierno.* Podrían desaparecer o reconvertirse hacia otras modalidades turísticas los complejos que se encuentran situados por debajo de los 2.000 metros (aunque este límite varía latitudinalmente), por falta o escasez del recurso nieve. Las estaciones de esquí se verán obligadas a subir en altitud y a incrementar sus inversiones en cañones para la producción de nieve artificial. De todos modos, la irregularidad de la innivación y el acortamiento de la temporada por el retraso en la aparición del manto nival y el empeoramiento prematuro de su calidad en primavera, no garantizarán la rentabilidad de las inversiones en determinados espacios geográficos.

- En los espacios de interior y de litoral, se pueden generar cambios en los *calendarios de actividad* al producirse una disminución de las aptitudes climático-turísticas en los meses centrales del verano por calor excesivo y un aumento de la potencialidad en las interestaciones (primavera y otoño). Algo similar puede suceder en determinadas zonas de montaña, aunque en sentido inverso: la disminución de la temporada de invierno por falta de nieve puede verse compensada por el alargamiento de la estación estival.

El cambio climático global previsiblemente provocará un *aumento en el nivel del mar* en los próximos decenios debido a la expansión térmica del agua de los océanos y a la fusión de glaciares y casquetes polares. Este aumento en el nivel de las aguas marinas puede tener *implicaciones notables sobre todos los asentamientos turísticos costeros españoles* (ver capítulo 11), ya que:

- Puede amenazar su existencia o *localización actual*. Especialmente, se pueden ver afectadas las zonas de costas bajas del Levante y del Golfo de Cádiz.
- Al incrementarse los procesos de erosión, se pueden ver alteradas todas las *infraestructuras* de primera línea de mar (playas, paseos marítimos, diques, espigones, puertos deportivos, entre otros).
- *Puede afectar adversamente a las* reservas de agua dulce disponibles en los humedales y acuíferos costeros a causa de la intrusión de agua salada, agravando una situación ya crítica en la actualidad, por los problemas de abastecimiento en determinados enclaves turísticos.

En definitiva, los impactos en el espacio geográfico-turístico no serán homogéneos y tendrán peor incidencia en aquellas zonas más deterioradas, con importantes desequilibrios y con mayor conjunción de los diferentes efectos climáticos.

14.3.3. Repercusiones en la demanda turística

La sensibilidad del turismo a las condiciones climáticas se manifiesta de *dos formas diferentes* desde la perspectiva de la demanda:

- De *forma directa* ya que el clima es un factor de motivación primaria para el turismo de ocio masivo, sobre todo en dos elementos fundamentales de los procesos de decisión de las vacaciones: el destino y el período temporal.

- De *forma indirecta* ya que las condiciones climáticas son una parte del contexto ambiental donde se desarrolla el turismo. De esta forma cualquier alteración sobre el medio ambiente natural base del atractivo turístico de los destinos influirá sobre las actividades que sostiene como las condiciones de las playas y costas, la montaña, los espacios naturales y urbanos.

Desde la perspectiva de la demanda, los flujos de turistas que recibe España, como se ha indicado antes (véase el apartado 14.1.2), proceden de los viajes internacionales y de los desplazamientos internos y las repercusiones sobre el turismo del cambio climático también se pueden manifestar de forma diferenciada.

Los *flujos receptivos internacionales* proceden principalmente de los países del norte de Europa, básicamente del Reino Unido y Alemania que proporcionan de forma conjunta el 49,6 por 100 de los turistas extranjeros hacia España. La motivación básica de estos turistas es encontrar unas condiciones climáticas más cálidas que en sus países de residencia. Es una motivación por comparación buscando temperaturas más altas y menores lluvias o condiciones adversas para la realización de actividades al aire libre y que no suelen producirse en sus regiones de origen (Perry 2001). Además, España es un país amistoso, fácilmente accesible y seguro, donde, por ejemplo, no es necesaria la vacunación contra enfermedades exóticas o tropicales.

Si estas condiciones climáticas comparativas cambian, sin que se produzcan acciones correctivas, se pueden producir varios *efectos sobre la demanda turística internacional*, considerando que las tendencias contempladas suponen las transformaciones sobre el espacio turístico apuntadas en el apartado anterior:

- *Disminución de los viajes de vacaciones en verano* hacia las zonas españolas del litoral mediterráneo debido al descenso del atractivo de ciertos destinos turísticos del litoral por encontrar las temperaturas en el período estival excesivas.
- *Incremento de los viajes domésticos en origen*, ya que los turistas procedentes del norte de Europa encontrarán en su propio ámbito geográfico unas condiciones más templadas que incrementan el incentivo de realizar viajes en sus propios países.
- *Incremento de los viajes en primavera y otoño* hacia los destinos del este y el sur de España, reduciendo la fuerte estacionalidad que acusan los meses de verano ya que al moderarse las temperaturas interestacionales las zonas costeras ganarían atractivo para este tipo de viajes.
- *Incremento de los viajes de extranjeros hacia las costas del norte de España* ya que las condiciones climáticas que pueden llegar a tener estos destinos les dotarían de mayor atractivo turístico.
- *Incremento del tiempo de estancia de ciertos segmentos* como los grupos de mayores con más tiempo disponible y que empiezan a ser los turistas mayoritarios de algunos destinos como consecuencia del progresivo envejecimiento de la población europea. Estos pueden alargan la temporada de estancia en los destinos del litoral e incluso la adquisición de segundas viviendas en estas zonas turísticas y su traslado permanente.

La *demanda turística nacional* posee unas características algo diferentes a las expuestas por el turista procedente del exterior. Aquellas referentes a la motivación, estacionalidad y

concentración geográfica en destinos del litoral mediterráneo siguen pautas similares que el resto de los países europeos de origen aunque con menor intensidad. Así, la diversificación de la demanda nacional lleva a los españoles a visitar también destinos del interior o con un mayor atractivo natural o cultural por encima de los viajes realizados por los extranjeros. También, hay que considerar que algo más del 90 por 100 de los viajes que realizan los españoles son por el territorio nacional y los cambios en *las condiciones climáticas son mejor asumidas por el turista doméstico en su propio país*, salvo las debidas a catástrofes naturales o a situaciones extremas (inundaciones, incendios forestales) que producen un efecto casi inmediato sobre la demanda. Además, el elevado número de segundas residencias proporciona otras relaciones con el entorno social y natural.

Por todo ello, las posibles repercusiones sobre la demanda nacional interna son las siguientes:

- *Progresiva fragmentación de los viajes* con una reducción de los días de estancia media en los destinos con mayor impacto de las altas temperaturas en verano, asociados al producto de sol y playa.
- *Incremento de los flujos hacia las costas del norte* que podrían mejorar las condiciones climáticas (temperaturas más altas y menos días de lluvias) y puede favorecer los baños en el mar y las actividades al aire libre, aunque las condiciones de uso del mar son diferentes por sus propias características (oleaje, viento, corrientes).
- *Mayores desplazamientos hacia las zonas de interior* con otros atractivos más asociados a la naturaleza, al espacio rural y a la cultura.
- *Disminución de los viajes en las zonas naturales* más deterioradas por los impactos climáticos.
- *Acortamiento de la temporada de turismo de nieve* por la menor cobertura de nieve especialmente a bajas altitudes.
- *Incremento de los viajes hacia países del norte de Europa* que ganarían atractivo en los meses de verano al suavizarse las temperaturas de estas zonas e incrementarse sensiblemente en sus lugares de residencia.

Aunque sólo se han considerado los efectos sobre la demanda en términos físicos, las repercusiones sobre las variables monetarias (ingresos, gasto) serían consecuentes con las descritas sobre los desplazamientos. Así, las zonas en que disminuya la percepción de bienestar atraerán turistas con menor capacidad de gasto.

No puede olvidarse que el turismo es una actividad humana y discrecional (Parry 2000) y el turista espera encontrar unas condiciones favorables que le proporcionen bienestar y una experiencia satisfactoria. Por ello, tanto para el turismo nacional como internacional la demanda más afectada es la asociada al turismo de ocio y vacaciones (mayoritario en nuestro país), mientras que otros tipos de turismo como por motivos de trabajo, visita a familiares y amigos, salud, estudios o deportes se verían menos influidos por el clima y sus posibles cambios.

Un aspecto importante sobre los posibles cambios en el comportamiento de la demanda es el grado de *influencia de la información meteorológica* transmitida a través de los medios de comunicación de masas. Esta información suele tener un efecto directo e inmediato sobre la toma de decisiones de los turistas y muchas veces es demasiado generalista con escaso grado de precisión en el ámbito local y que puede perjudicar a determinados destinos turísticos y temporadas cuando las predicciones no son demasiado favorables.

14.3.4. Repercusiones en la oferta turística

El tercer nivel de impacto del cambio climático en el sistema turístico, después del espacio geográfico y la demanda, está formado por los integrantes de la oferta turística, principalmente las empresas que configuran esta industria.

Los cambios de los flujos de demanda suelen deberse a transformaciones en las preferencias y deseos que se manifiestan principalmente en comportamiento diferenciados. Estos van ha suponer modificaciones también en los prestadores de servicios de forma directa como *alojamientos y agencias de viajes*. Sin embargo, es preciso destacar la fortaleza de la industria turística cuya tendencia de futuro será previsiblemente creciente ya que los principales elementos estructurales de su evolución, principalmente renta y tiempo de ocio, pueden seguir desarrollándose de forma favorable.

El turismo es una actividad con una gran *resistencia a las crisis* y amplia *capacidad redistributiva*. Ello supone que los flujos de turistas al desplazarse de unas zonas a otras podrían seguir generando beneficios económicos medios similares a los obtenidos hasta el momento. El impacto más negativo y directo podría afectar a las empresas situadas en los destinos más vulnerables, con importantes consecuencias económicas, principalmente en aquellas que dependen más de fuertes inversiones en infraestructuras. Pero al mismo tiempo, las tendencias consideradas en la demanda permiten ampliar las actividades de estas empresas en otros períodos de tiempo por el alargamiento de la temporada a meses de primavera y verano.

Otras empresas como los *operadores turísticos y las agencias de viajes en origen* apenas sufrirían estos impactos en términos económicos ya que su capacidad de adaptación es mucho más alta y los cambios en la demanda permitirían ofrecer otros de destinos y otros periodos con mayor intensidad y mejores condiciones económicas.

La principal repercusión en el nivel global de la oferta y, en consecuencia, del conjunto de la economía española es la menor entrada de turistas extranjeros por preferir quedarse en sus países de origen lo que supondría una *disminución de los ingresos por turismo* en el nivel global y para las zonas más vulnerables un riesgo en la estabilidad de sus economías locales. Por pequeños o lentos que sean los cambios, sus efectos sobre zonas, que ya sufren fuertes desequilibrios, pueden provocar a medio y largo plazo una fuerte transformación de sus condiciones económicas y, en el peor de los escenarios, un progresivo cierre de establecimientos turísticos y no turísticos, incremento del desempleo y estrangulamiento económico de los destinos.

14.3.5. Cambios en la acción de los agentes del sistema

El turismo es un sistema en continua adaptación, respondiendo al cambio demográfico y a las condiciones económicas así como a las nuevas demandas y tecnologías. El cambio climático puede presentar nuevos retos y oportunidades para las inversiones turísticas permitiendo capitalizar las nuevas condiciones ambientales (Parry 2000). En este sentido, los *agentes públicos y privados* que actúan sobre el sistema principalmente en destinos turísticos tradicionales pueden orientar sus actuaciones en diferentes direcciones:

- *Incorporar incentivos a los viajes* a sus zonas con atractivos turísticos más unidos a actividades culturales y deportivas.
- *Mantener el valor de los atractivos en las áreas costeras*, desplazando hacia las zonas más del interior aunque próximas los futuros desarrollos turísticos.
- *Propiciar infraestructuras menos rígidas* que favorezcan el esponjamiento de las zonas costeras y su sostenibilidad a largo plazo.

- *Mejorar las condiciones de bienestar* durante la estancia de los turistas, por ejemplo, con la instalación de aire acondicionado en todos los alojamientos.
- *Innovar las condiciones de desarrollo* de la oferta turística existente con nuevos productos o modificando los existentes.

Los cambios tendrían más influencia en aquellas zonas con mayor dependencia económica del turismo y, según las tendencias de demanda y oferta apuntadas, podrían afectar más en aquellas regiones más subordinadas a los flujos de demanda procedentes del extranjero (véase la Figura 14.4). Sirva de ejemplo el hecho de que aproximadamente el 34 por 100 de los paquetes turísticos de vacaciones hacia el exterior de los habitantes del Reino Unido se dirigen a España, principalmente a Baleares y Canarias (Viner y Agnew 1999). El nivel económico y de recursos institucionales en una comunidad o región condiciona su capacidad de adaptación.

Los agentes pueden optar por cambios funcionales en los destinos en orden a equilibrar la actividad humana y las condiciones medio ambientales. Sin embargo, las repercusiones del cambio climático pueden suponer también un *cambio de intereses de los agentes* hacia actividades que aprovechen las oportunidades que ofrecen los nuevos escenarios como la ampliación a zonas de interior descongestionando progresivamente las áreas más vulnerables que suelen ser también las más saturadas y frágiles y cuyo sostenimiento futuro ya estaba condicionado sin contar con los efectos del cambio climático (por ejemplo, turismo rural cercano a la costa).

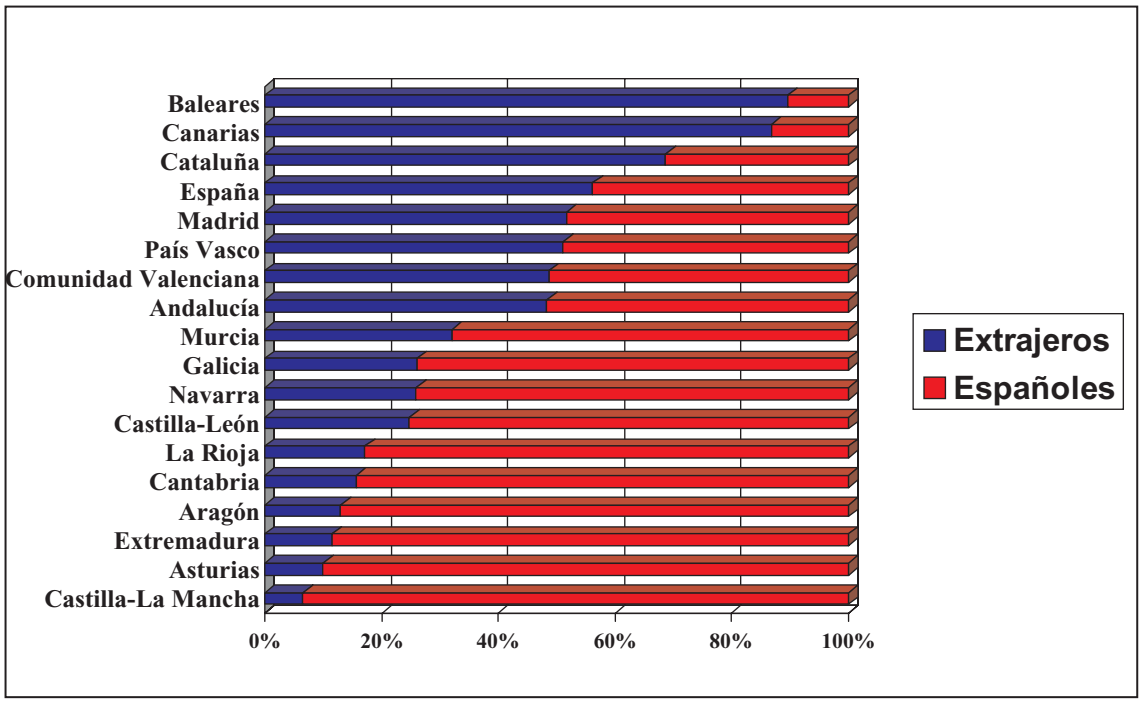


Fig. 14.4. *Distribución de los turistas por comunidades autónomas (%)-2003- Fuente: Elaboración propia basada en datos procedentes del Instituto de Estudios Turísticos (2004a y b).*

Las *estrategias* que podrían desarrollar los agentes del sistema turístico van a depender de los objetivos que se fijen y que pueden ser muy distintos según las zonas, el nivel de repercusión, la intensidad de los cambios de la demanda y las condiciones sociales y económicas de los destinos. La tendencia cada vez más generalizada hacia la sostenibilidad supone asumir crecimientos menos rápidos compensados por una mayor calidad de las instalaciones y servicios ofrecidos y una progresiva disociación del destino a una imagen exclusiva de sol y playa.

14.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

14.4.1. Zonificación turística de España y vulnerabilidad

En España, el impacto del cambio climático podría afectar de manera desigual a los distintos tipos de turismo y a las distintas zonas geoturísticas. Nuestro país dispone de una acusada diversidad de recursos, de productos y de destinos turísticos que, a su vez, presentan un grado de relación o asociación con el clima muy contrastado en cada caso. Atendiendo al carácter preliminar de este Informe, a la escala de análisis con la que se opera y a los objetivos del mismo –identificación de zonas más vulnerables-, se han detectado como zonas y productos turísticos más vulnerables las asociadas al entorno litoral y al entorno de montaña. En concreto, se trata del *turismo de sol y playa*, que ha configurado la función turística de buena parte del litoral español, y el *turismo de nieve* (estaciones de esquí y montaña), que se ha convertido en uno de los turismos más emblemáticos de las zonas de montaña, y, en ciertos casos, el más importante.

La constatación de que el litoral y la montaña son los entornos turísticos más vulnerables al impacto del cambio climático no es una realidad particular de España, sino que a escala mundial también se detecta que el turismo de sol y playa y el turismo de nieve pueden ser los más afectados ante el previsible escenario de cambio climático. De hecho, la Organización Mundial de Turismo cuando organizó la *1ª Conferencia Internacional sobre Cambio Climático y Turismo* (Djerba, Túnez, 9-11 de abril de 2003), centró el tema y los debates en torno a los efectos del cambio climático en tres ámbitos territoriales: las zonas costeras y las islas, las regiones montañosas y las zonas expuestas a sequías o inundaciones.

14.4.2. Zonas y productos litorales

La condición geográfica del *espacio litoral* (dinámica marítima y morfología costera), el modelo de organización territorial y, en particular, del modelo de desarrollo turístico son los factores determinantes del mayor o menor grado del previsible impacto del cambio climático. En una España que vive cada vez más de cara al mar, no de espaldas como en otros tiempos, la *vulnerabilidad natural del litoral se incrementa por su alto grado de artificialización*. Además, dada la diversidad del litoral español y de su desigual potencial y desarrollo turístico, fundamentalmente turismo de sol y playa, se parte de la premisa de que el impacto del cambio climático será distinto en cada zona costera.

Con relación a los *contrastes regionales*, la descripción de las zonas costeras españolas distingue la costa mediterránea e insular de la costa atlántica norte y cantábrica. España cuenta con playas de todo tipo y condición y con climas y aguas muy variados. Más del 80 por 100 del turismo internacional que visita España acude a sus playas: mediterráneas, atlánticas norte, atlánticas sur y de las islas Canarias (de clima subtropical). Según sus atributos, sus condiciones climáticas y la época del año –en clara relación de causa efecto con el clima- las playas españolas presentan una mayor o menor idoneidad para las estancia turística. Considerando la estación del año como referencias se puede decir que existen playas utilizadas prácticamente durante todo el año. Son las situadas en el litoral mediterráneo meridional y en las islas Canarias. Las playas de verano y en buena parte de primavera y otoño son las del litoral mediterráneo septentrional e islas Baleares. Y, finalmente, las playas de verano son las de la España Verde, es decir, Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco. Sin duda, en el escenario de cambio climático los impactos serían diferentes y tras la variación de las condiciones climáticas se modificaría la “época de idoneidad” de las playas con relación al confort, que daría lugar a nuevas situaciones positivas o negativas y, en cualquier caso, a la *necesidad de estrategias adaptativas*.

El *mediterráneo septentrional y central* comprende el litoral de Cataluña, de Valencia y de Murcia. Se distinguen tres sectores, dibujados por arcos cóncavos, producto del hundimiento

de la costa. El primer sector, entre Cabo de Gata y Cabo de Palos en Murcia, presenta una morfología con predominio de la costa rocosa y accidentada. El segundo sector, entre Palos y el Cabo de la Nao, en Alicante, corresponde a una costa muy variada, baja y arenosa y luego alta y abrupta. Finalmente, el tercer sector, desde el Cabo de La Nao al cabo de Creus en Girona, presenta una alternancia de costa rocosa y alta con la costa arenosa y baja.

El *litoral de Andalucía* se extiende por el Mediterráneo meridional y por el Atlántico sur, y en el se distingue dos sectores: el primero, entre Punta de Tarifa y Cabo de Gata, se caracteriza pro ser generalmente rocoso y acantilado, si bien se abren algunos sectores bajos con playas arenosas; el segundo, desde Tarifa hasta la desembocadura del Guadiana es una costa baja y mayoritariamente arenosa. En cuanto a los archipiélagos, tanto las Islas Baleares como las islas Canarias presentan unas costas muy variadas, siendo el clima el factor diferencial de las condiciones ambientales de estos destinos turísticos.

El *Atlántico norte y el Cantábrico* ofrecen una diversidad de turismos por lo que en estas regiones turísticas el turismo de sol y playa, en general, no es hegemónico. Y a pesar de que mayormente se fundamente en la motivación de sol y playa, está aún lejos del típico modelo turístico mediterráneo. La costa cantábrica es una costa rectilínea con muy pocos entrantes y salientes y un mar bravío. Escasean las playas, si bien las que existen son de gran atractivo y con arena muy fina, fruto de la acción del mar Cantábrico. Predomina, pues la costa alta y rocosa, debido principalmente a la proximidad de la Cordillera Cantábrica. Las costas gallegas presentan un espacio físico distinto: una costa alta, abrupta, con sucesión de acantilados y con accidentes geográficos que han particularizado estas zonas. Un paisaje singular y de gran reconocimiento turístico, formado por rías que vertebran una costa extraordinariamente articulada con extensos brazos de mar que rompen unas costas generalmente acantiladas y que permiten la instalación de núcleos de población protegidos de un siempre intempestivo océano.

En definitiva, *una morfología y una dinámica litoral muy variadas*, que se verán *afectadas de manera desigual* ante el previsible cambio climático, ya sea por la alteración de las condiciones climáticas como por la elevación del nivel del mar y el cambio de la dinámica marítima. En este último caso, se verían afectados los sectores de Levante y el Golfo de Cádiz.

Los efectos del previsible cambio climático en el turismo litoral podrán provocar un *desplazamiento de las temporadas* debido a la intensificación de un periodo estival más caluroso y más seco pero, en cambio, como efecto favorable se prevé una ampliación y una desestacionalización de la misma. Por consiguiente, puede ser que el periodo susceptible de ser aprovechado para vacaciones se alargue. También, una mayor frecuencia de periodos atípicos, por exceso de calor fuera de temporada y, aunque pueda parecer contradictorio, veranos frescos y revueltos esporádicamente. Los veranos serán cada vez más calurosos hasta el punto de que el sol podrá ser un elemento incomodo y, por lo tanto, con el exceso de calor España puede perder el atractivo y la ventaja comparativa con otros destinos. Se pronostica que hará mucho calor en el sur de Europa para ir de vacaciones pero ello incluye también esta condición en destinos competidores de España. En consecuencia, la previsión a largo plazo es que los países de la cuenca mediterránea –incluyendo España- pasarán a ser destinos turísticos principalmente para la primavera y el otoño.

No obstante, una valoración de este previsible escenario permite desestimar el alarmismo y el carácter catastrófico de algunas hipótesis. Un aumento de la temperatura no tendrá una repercusión grave para España, puesto que la alteración de las condiciones climáticas del litoral podrá tener un *efecto de desestacionalización*, como se ha dicho, ya que es previsible y posible que el turista pueda disfrutar de los baños en la playa desde mayo a octubre. También podrá ser cierto que los meses de julio y agosto disminuya la masificación no sólo por el aumento de las temperaturas sino porque se tienda a fraccionar las vacaciones, lo cual no tiene nada que ver con el cambio climático.

La alteración de las condiciones climáticas, en la orientación que se prevé, podrá suponer asimismo *nuevas oportunidades para el desarrollo del turismo de sol y playa*, con nuevos segmentos de demanda. Puede suponer búsqueda y desarrollo de destinos con temperaturas agradables en verano, como por ejemplo el norte de España (Cantábrico) y las zonas de montaña. También, surgirían oportunidades para otros ámbitos de negocio turístico como el incremento de visitas a espacios naturales protegidos o con una revalorización de destinos relacionados con el deporte náutico costero o de interior y actividades en los ríos.

La *actividad turística depende directamente de la calidad y la disponibilidad de los recursos* renovables y no renovables que utiliza, además de los factores de oferta, infraestructuras y servicios, entre otros. Por ello, la degradación ambiental está directamente asociada con la pérdida de atractivo y, por tanto, a la imposibilidad de seguir desarrollando esa actividad turística. En el caso del previsible escenario de cambio climático, los destinos litorales españoles se verían afectados por la alteración de las condiciones ambientales y, en consecuencia, ello requerirá estrategias adaptativas planificadas. Con relación al deterioro físico del litoral, la sociedad tendrá que hacer frente con inversiones en obras de defensa para proteger, renovar o reconstruir las playas, o bien optar por racionalizar la ocupación humana del litoral.

El cambio de escenario no sólo supone una alteración de la condición de los recursos turísticos sino la modificación de la disponibilidad y competencia por los *inputs* al sistema turístico y, en particular, al *abastecimiento de agua*. Este problema ya existe hoy en día en ciertas zonas por la concentración de la demanda turística en tiempo y espacio. Para hacer frente a las necesidades de la demanda se tendrá que recurrir a la desalinización del agua del mar, al aprovechamiento de recursos subterráneos (que en muchos casos ha desembocado en una sobreexplotación y salinización de los acuíferos costeros, prácticamente irreversible), y la construcción de nuevas presas o de trasvases. Sin duda, la solución al problema del agua es uno de los factores clave para el mantenimiento de buena parte de la industria turística en las costas españolas, especialmente en el posible escenario de cambio climático.

El tema del cambio climático y el impacto en el sector turístico acontece cuando el turismo esta viviendo unos cambios en la oferta y en la demanda a un ritmo no conocido hasta ahora, hasta el punto de que algunos analistas consideran que se trata de un *cambio de paradigma turístico*. Esta referencia tiene interés por cuanto las alteraciones que viviría el turismo en el futuro podrían ser motivadas por los impactos del cambio climático que, si suceden, se proyectarían sobre las modificaciones ya en marcha, sobre las nuevas tendencias de la oferta y la demanda: el cambio en los destinos; la aparición de otros destinos competitivos, tradicionales de sol y playa, otros lejanos y otros destinos de tipo diferente y que compiten con el sol y playa (urbano, de naturaleza, cultural, entre otros). Por otra parte, el tema de la previsible pérdida de atractivo de los destinos españoles se ha de abordar también en términos comparados, es decir, ha de entenderse que el cambio climático también afectaría a otros destinos, tanto del mismo segmento de negocio (sol y playa próximos y lejanos) como de otros productos.

Como conclusión al análisis de esta previsible situación es imprescindible la *puesta en marcha de estrategias convergentes* que proporcionen acciones adaptativas tanto a nivel nacional como particularizadas por destinos, en función de su estado de evolución y del grado de deterioro existente, ya que no es lo mismo actuar en espacios geográficos del litoral poco saturados que en zonas que ya padecen en la actualidad fuertes desequilibrios.

14.4.3. Zonas y productos de montaña

En el turismo de invierno (turismo de nieve-estaciones de esquí), las consecuencias del cambio climático son, hoy por hoy, más evidentes que en el caso del turismo de sol y playa, y también es más patente su dificultad de adaptación. Se coincide, pues, que en general las zonas de montaña afectadas se muestran más vulnerables que las zonas costeras y las islas.

El conocimiento del *manto de nieve y su renovación anual*, así como de los dominios esquiables potenciales, es hoy día bastante preciso, incluso desde de la óptica de las condiciones que ofrece y requiere su explotación comercial y su viabilidad económica. Los distintos macizos montañosos presentan una *gran diversidad*, tanto en términos comparados como en su composición interna, diversidad que obedece en cada caso a su respectiva ubicación latitudinal meridional o septentrional y a su altura, parámetros que determinarán sus condiciones ambientales en general y el régimen de innivación en particular y, por lo tanto, la disponibilidad o no del recurso nieve. Por ejemplo, en el Pirineo una buena parte de las precipitaciones caídas durante los meses de invierno son de nieve y son bastantes los lugares y las zonas donde se registran entre 20 y 30 días de nieve al año, con unos grosores destacados y una permanencia de varios meses. La innivación empieza a ser significativa en muchos lugares del Pirineo catalán a partir de la cota 1.500 m. Pero, es a partir de la cota de 1.800 m. donde los grosores de nieve, que entre diciembre y abril son superiores a los 15 cm., se presentan más interesantes y favorables desde la perspectiva comercial (López Palomeque 1997).

El régimen nival se caracteriza por una *irregularidad temporal* (estacional e interanual) *y espacial* (gradación altitudinal y latitudinal de la montaña española) que provoca, a su vez, una inseguridad del negocio de la nieve. Este régimen da lugar a situaciones cíclicas que abarcan desde unas temporadas muy malas y sin apenas nieve a otras con abundantes nevadas, gracias a una meteorología generosa. El viento, la niebla y las altas temperaturas inciden negativamente en la permanencia de la nieve. Además, hay que tener en cuenta la estructura comercial de la estación y la capacidad de sus servicios técnicos, factor básico para el buen mantenimiento del manto de nieve (máquinas, señalización).

La irregularidad de la nieve ha obligado a adoptar como estrategia la producción de este recurso natural con *la fabricación de nieve* (nieve producida), la instalación de "cañones de producción de nieve", que ya es la práctica habitual en todas las estaciones desde que en 1985 La Molina (Girona) instalase los primeros cañones. En la temporada 2002/2003 existían 3.319 cañones. En definitiva, éstas se han visto obligadas a incorporar cañones de fabricación de nieve con el fin de asegurar y permitir la práctica del esquí superando los condicionantes climatológicos. Además, dada la necesidad de actuar en el sentido indicado y los costes y cargas de las inversiones, la administración pública ha acudido en ayuda del sector con diversas líneas de subvenciones (seguro de nieve, inversión en cañones, promoción, maquinaria) (Gómez Martín y López Palomeque 2003).

España cuenta con *29 estaciones de esquí alpino*, de las que 13 disponen, a su vez, de instalaciones y pistas para la práctica del esquí de fondo o nórdico, a las que se suman 15 estaciones exclusivas de esquí nórdico. Las estaciones de esquí alpino españolas contaban en conjunto con un total de 344 remontes mecánicos, de los que 7 eran telecabinas 136 telesillas y 201 telesquís, con una capacidad de transporte de 356.671 viajeros/hora. Estas 29 estaciones de esquí alpino ofrecían un total de 822 pistas que sumaban unos 864 kilómetros lineales esquiables y 9 *Halp-Pipe* y *Snowpark* para la práctica del *snowboard*. En cuanto a las estaciones de esquí nórdico, se ofertaron en conjunto para la temporada 2002/2003 casi 400 kilómetros de pistas. Prácticamente todos los sistemas montañosos más importantes de España cuentan con estaciones de esquí: el Macizo Galaico (estación de Manzaneda); Cordillera Cantábrica (Alto Campoo, Valgrande-Pajares, San Isidro, Leitariegos); Sistema Ibérico (Valdezcaray, Valdelinares, Javalambre); Pirineo aragonés (Astún, Candanchú, Formigal, Panticosa-Los Lagos, Cerler); Pirineo catalán (Baqueira Beret, Boí Taüll, La Tuca,

Espot Esquí, Tavascan, Llessui, Port Ainé, Port del Comte, Rasos de Peguera, La Molina, Masella, Vall de Núria, Vallter 2000); Sistema Central (Navacerrada, Valcotos, Valdesquí, La Pinilla, La Covatilla) y Sistema Penibético (Sierra Nevada). Las estaciones de esquí sitúan sus cotas máximas en torno a los 2.500 metros y las cotas mínimas en torno a 1.500-1.800 m., a excepción de Sierra Nevada (2.550-3.280 m.), la más meridional.

A pesar de la irregularidad y limitación del recurso nieve y de la vulnerabilidad del negocio del esquí, el sector del turismo de montaña y nieve en España en los últimos años está creciendo en sus dos componentes básicos: la demanda y la oferta. El turismo de invierno en España presenta, no obstante, algunas contradicciones estructurales que generan disfunciones, que se agravarán con los impactos del cambio climático si bien variarán según el macizo montañoso: irregularidad del recurso nieve e inseguridad en el negocio de la nieve, dependencia del medio, producción de nieve automatizada en difícil equilibrio ecológico y tutela de la administración.

Las evidencias del impacto del cambio climático en el turismo de invierno son de doble naturaleza. Por una parte, *las evidencias científicas*, los diversos estudios, que demuestran el leve aumento de las temperaturas en la montaña, el menor grosor medio de nieve y la mayor irregularidad temporal y territorial de la innivación. En la montaña española las precipitaciones en forma de nieve tienden a reducirse y las temperaturas en invierno tienden a aumentar (particularmente en febrero y marzo). Un efecto observable que avala estos nuevos parámetros es la reducción de los glaciares pirenaicos –la mitad se han fundido desde mitad de los ochenta- y el aumento de las cotas de nieve. De continuar estas tendencias la nieve será cada vez más escasa en cotas bajas. Por otra parte, las *evidencias vivenciales* refuerzan al conocimiento científico. Se trata de la percepción del cambio que tienen los esquiadores veteranos que constatan que antes la cota de nieve era baja y ahora es alta, que ahora hay menos nieve en cotas bajas. También determinados empresarios y gestores de estaciones participan de esta opinión hasta el punto de han llevado a cabo importantes inversiones en la producción de nieve artificial cuya rentabilidad a largo plazo es incierta, constituyendo una de las mayores preocupaciones en el sector.

El previsible cambio climático no comportará el final del esquí, ya que en las estaciones con dominios en cotas más elevadas podrán sobrevivir como *centros de turismo de invierno*, mientras que la reducción de las nevadas tendría una repercusión económica importante en los valles que viven del esquí y un gran impacto ecológico en la alta montaña. Se prevé que a medida que las estaciones de esquí de cotas más bajas vayan teniendo problemas y abandonen la oferta del esquí, aumentará la presión en áreas de la alta montaña ecológicamente más sensibles. La viabilidad de las estaciones situadas en cotas bajas dependerá inicialmente de los cañones de nieve artificial. Pero a la larga, el aumento de temperatura hará que la producción de nieve sea cada vez menos eficiente y más costosa (Scott *et al.* 2001).

Las *estrategias para adaptarse* al impacto del cambio climático contemplan la intensificación de la innivación artificial, muy desarrollada y en difícil equilibrio ecológico debido a que desde hace dos décadas ha sido una estrategia para hacer frente a la irregularidad temporal y espacial de la innivación. Esta estrategia puede beneficiarse de los avances tecnológicos (cañones de última generación que posibilita la fabricación de nieve a temperatura más alta, aproximadamente dos grados más que hasta la fecha), pero la intensificación del sistema sí entra en conflicto con el principio de la sostenibilidad económica y sostenibilidad medioambiental.

No obstante, la estrategia señalada sólo resuelve el problema particularmente, por lo tanto las estaciones de esquí tenderán a *convertirse en estaciones de montaña* (con una diversidad de productos), perdiendo la especificidad de su producto originario y exclusivo: la nieve. Esta se podrá mantener en menor cantidad, en cotas más altas, con producción artificial, pero será más costosa y en difícil equilibrio con el principio de sostenibilidad medioambiental. Las estaciones

de esquí se transformarán, dejando de ser centros solamente de invierno, para convertirse en "estaciones turísticas" –en ocasiones verdaderos *ressorts*- con variedad de oferta de productos a lo largo del año, destacando la estación estival, con demandas procedentes de turistas que no encuentran confortables los lugares de playa. La desestacionalización de la actividad de estos centros ya está siendo hoy día una realidad y lo será en el futuro. Este proceso supondrá por una parte, una estrategia para optimizar las instalaciones y la propia gestión empresarial, ampliando la cartera de productos con nuevas oportunidades de negocios, y en el marco de este Informe, un proceso adaptativo impuesto por el impacto del cambio climático.

Ante esta previsión, se imponen *dos necesidades*:

- La *ordenación de los proyectos de ampliación* y de iniciativas de nuevas estaciones, evitando la construcción de infraestructuras que a medio plazo podrían quedar obsoletas por el cambio climático.
- La necesidad de *gestionar de manera responsable* el resto de recursos (paisaje, patrimonio monumental) incrementando su valor como recursos turísticos, que hasta ahora tenían una carácter complementario o secundario con relación al turismo de invierno, pero que en el futuro puede ser una alternativa y sustituir a la nieve como principal atractivo de las estaciones de esquí reconvertidas en estaciones de montaña.

14.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

Según lo expuesto en los epígrafes previos, al ser España un país líder en turismo ocupando, el primer lugar en cuanto al turismo de sol y playa y si el cambio climático va a afectar al turismo y, en especial, al de sol y playa, es previsible que nuestro país se puede ver especialmente afectado por este fenómeno de importantes repercusiones.

El turismo de sol y playa en España es un producto maduro sobre todo en el Mediterráneo y va a seguir siendo demandado en tanto que la vivencia y disfrute de un buen clima cerca del mar y la huida de los climas fríos y desapacibles permanezca en las motivaciones de los turistas del norte y centro de Europa. En consecuencia, las decisiones de los turistas como consumidores de un producto y las decisiones y estrategias empresariales a la hora de ofrecer este producto pueden estar sometidas a ciertas modificaciones como consecuencia de la sensibilidad a los previsibles cambios climáticos. Por otra parte, es también probable que tenga lugar un proceso de readaptación de los subsectores turísticos y de los que dependan de ellos, donde algunos pierdan importancia a favor de otros posiblemente beneficiados.

Estos cambios no sólo se producirán en el ámbito del turismo de sol y playa, sino también en *otros productos* como el turismo de esquí e incluso determinados tipos de turismo rural y de naturaleza que pueden estar potencialmente sometidos a circunstancias extremas propiciadas por cambios climatológicos de índice tropical, hasta el presente pocos frecuentes en los países mediterráneos. En consecuencia, el cambio de las estrategias en la toma de decisiones va a ir más allá de lo que se refiere al turismo de sol y playa.

14.5.1. Opciones adaptativas en la demanda

Uno de los elementos integrantes del sistema turístico que más va a percibir los impactos del cambio climático es la demanda turística. El primer cambio que puede manifestar la demanda en su evolución adaptativa a las condiciones del entorno natural se centra en la *modificación del comportamiento de los turistas*, ya que los gustos, deseos y necesidades variarán en función de su valoración de los destinos, de la percepción de las condiciones en que se ofrecen

los nuevos productos o la modificación de los existentes y de las expectativas de tener una experiencia satisfactoria en el viaje turístico. Algunas posibles *reacciones adaptativas de la demanda* son:

- El cambio climático puede acelerar la tendencia existente desde el último decenio del siglo pasado de *disminuir la estancia media de los turistas* hacia destinos de sol y playa. En todo caso, el turista podría repetir en otro u otros periodos del año visitas a destinos de turismo rural, urbano, entre otros. Desde hace alrededor de una década, se han ido conociendo los peligros que tiene para la salud tomar el sol en exceso y sin protección. Si bien es cierto que en los destinos de sol y playa la vivencia en un entorno soleado y de buen clima está ganando terreno al estricto tomar el sol, estos peligros sobre la salud junto con los mayores niveles de insolación debidos al cambio climático pueden conducir a los turistas a disminuir los días de duración de un viaje, reforzando la tendencia ya iniciada hace años por otras causas como se ha indicado anteriormente.

- Otro aspecto hace referencia a los probables cambios que se producirán en el *momento de la toma de decisiones*. El buen clima es una característica básica en los destinos de sol y playa e importante cuando se realizan viajes al Mediterráneo con otras motivaciones. El turista necesita poseer una cierta garantía de buen clima. A su vez, el cambio climático conducirá al aumento de los cambios drásticos en el tiempo que pueden incluso conducir a la aproximación de los climas tropicales fundamentalmente en verano. Ello conducirá al aumento de la incertidumbre sobre las condiciones climáticas de las vacaciones que se pretenden planificar. Por ello, resulta más que probable que el turista tome su decisión de viajar y contratar los servicios turísticos en una fecha más próxima al periodo que se desea viajar, para en su caso suspender la decisión de viaje sin coste adicional y con mayores garantías de tiempo soleado y apacible. Aquí también se acabaría reforzando una tendencia iniciada hace algunos años de esperar a la última semana para adquirir el “paquete turístico” o, en su caso, comprar el billete de transporte y contratar el alojamiento. El desarrollo de los medios electrónicos de reservas y contratación facilitan esta opción adaptativa.

- Si se considera el Tercer Informe de Evaluación del IPCC del año 2001 cuando afirma que el sur de Europa mediterránea es la región más amenazada por el cambio climático por las sucesivas sequías e inundaciones y, en cambio, el norte de Europa puede tener beneficios sobre la agricultura y sobre la afluencia de turistas, se puede deducir en consecuencia que esta mayor vulnerabilidad puede producir que los turistas de los países de centro y norte de Europa decidan quedarse en sus propios países y hacer *turismo doméstico* o e su caso desplazarse a otros países de la misma área geográfica. De ahí la posibilidad de que se produzca una reducción del número de turistas hacia España por un retraimiento generalizado de esos países ante la incertidumbre de cambios climáticos extremos o de escasez de recursos como el agua.

14.5.2. Opciones adaptativas en la oferta

Ante esta realidad, existen suficientes indicios como para pensar que las empresas turísticas de bienes y servicios relacionados tendrán que modificar determinados aspectos de su actuación a la hora de planificar sus estrategias en los diversos ámbitos de gestión. Los fenómenos del cambio climático y sus consecuencias van a generar unos *niveles de incertidumbre superiores* a los que se consideran normales en toda actividad empresarial. Las consecuencias pueden ser:

- En *primer lugar*, en el cálculo económico sobre la viabilidad de nuevas inversiones turísticas van a tener que incorporarse los elementos de incertidumbre debidos al cambio climático, que comportarán, a su vez, niveles de riesgo superiores y, por tanto, el *desvío de probables*

inversiones hacia otros sectores de la economía, en aquellas actividades en que existan alternativas o, en caso contrario, a una progresiva desinversión.

- En *segundo lugar*, y en consonancia con lo anterior, las empresas turísticas deberán establecer *estrategias para protegerse al máximo de estas situaciones de incertidumbre*. La fuerte estacionalidad del turismo de sol y playa en la mayoría de zonas españolas, así como de otros tipos de turismo, como el propio de las estaciones de esquí, hace que determinados cambios climáticos que incidan en los periodos de mayor demanda, conduzcan a una disminución de los resultados económicos. En ambos casos, la temporada turística puede sufrir alteraciones de duración e intensidad. Por ello, el empresario debería estar preparado para poder enfrentarse a unos resultados económicos menos positivos de lo habitual en un determinado año. Como se indica más adelante, esto podría conducir a la creación de instrumentos de aseguramiento que garanticen el resarcimiento de estos probables resultados.

- En *tercer lugar*, en el ámbito de las decisiones a corto plazo, la inseguridad ante los repentinos cambios de tiempo propios del cambio climático alterará el *timing* de reservas y contratación del viaje por parte del turista con el *aumento de las reservas de última hora* para garantizar en mayor medida unas mejores y más estables condiciones meteorológicas. Consecuentemente, la toma de decisiones empresariales puede sufrir importantes retardos para ajustar mejor la oferta a la demanda. El ejemplo más evidente, aunque no el único, tiene que ver con las decisiones en torno a los precios en el proceso de ajuste oferta-demanda, como ocurre con las típicas ofertas de última hora. Por ello, la gestión de la empresa requiriere unos mayores niveles de flexibilidad, sobre todo financiera, para ajustarse de una forma más rápida a las súbitas variaciones de la demanda. Es cierto que el enorme desarrollo de las nuevas tecnologías favorecerá esta tarea, aunque en parcelas como la laboral o la gestión de existencias los cambios serán necesarios.

- Finalmente, en *cuarto lugar*, las empresas deberán establecer estrategias para protegerse al máximo de los efectos de cambios de clima extremos. Por ejemplo, en la construcción de edificios, bien sean de alojamiento o de oferta complementaria, se deberán llevar a cabo obras que los protejan de los daños o las condiciones de bienestar que estos efectos puedan causar para, en cualquier caso, *garantizar la comodidad y seguridad de los clientes.*

14.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

14.6.1. Conflictos territoriales por los recursos

En todos los países donde el clima varía sensiblemente entre sus distintas regiones, como en el caso de España, se producen lógicamente diferencias sustanciales en la dotación de determinados recursos naturales y energéticos cuyo uso y disfrute es indispensable para el turismo como actividad de ocio y para satisfacer las necesidades personales de los cientos de miles de turistas que son población de hecho en una región determinada en un periodo de tiempo concreto. Ante ésta realidad se plantean *dos cuestiones básicas*:

- En primera instancia, van a surgir problemas importantes a la hora de asignar aquellos *recursos naturales* que pueden compartirse entre zonas y regiones. Un caso muy evidente es el agua, ya que durante aquellos procesos climáticos que supongan largos periodos de sequía, van a gravarse los conflictos territoriales ya existentes para abastecer zonas tradicionalmente deficitarias desde zonas excedentarias.

- Con relación a los *recursos financieros* procedentes fundamentalmente del sector público, algunas regiones pueden sufrir ciertas consecuencias propias del cambio climático, como la reducción de las zonas de playas de arena por la elevación del nivel del agua del mar, que

requerirán esfuerzos de ingeniería para infraestructuras que protejan en lo posible dichas áreas, además de ciertos riesgos en algunas regiones que pueden verse abocadas a situaciones catastróficas que requieran el concurso de recursos extraordinarios en grandes cuantías. En definitiva, es muy probable que el cambio climático obligue a llevar a cabo significativas redistribuciones de recursos financieros públicos entre Comunidades Autónomas para hacer frente a estas situaciones, lo que también puede crear pugnas entre territorios.

14.6.2. Repercusiones transversales en la economía de los destinos turísticos

Parece obvio pensar que si el cambio climático afecta a la gestión y los resultados de las empresas turísticas, estas consecuencias se van a generalizar a una *gran parte de los sectores relacionados con el turism*o y, en definitiva, al conjunto de las economías basadas en el turismo.

En este sentido, los *sectores agrícola e industrial* que suministran a la hostelería y la restauración productos, sobre todo perecederos, van a tener que acomodar su *stock* de una forma más flexible para ajustarse a los cambios imprevisibles de sus compradores. Las consecuencias de los posibles cambios en la situación climática dependerán de su grado de intensidad y duración.

En el ámbito de los *servicios* hay que señalar que hoy más que nuca las empresas en general y las turísticas en particular recurren al llamado "*outsourcing*" o subcontratación de tareas. Lógicamente, aquellos servicios demandados puntualmente sólo se verán afectados de forma limitada por una posible temporada de resultados de menores beneficios en razón de un fenómeno climatológico. En cambio, aquellos servicios que se ofrecen de forma continua y que están vinculados a la demanda diaria van también a tener que adoptar estrategias de gestión en función de decisiones que se tomarán a muy corto plazo.

14.6.3. Repercusiones por sectores específicos

Ante esta panorámica sectorial y, en concreto, ante el tipo de repercusión que cabe esperar del cambio climático, es destacable el importante papel que van a jugar el sector financiero y, especialmente, el *sector de seguros*. El sector financiero va a tener que acometer los cambios necesarios para ajustar su actividad a las necesidades de fondos de préstamos por acontecimientos imprevisibles. Los seguros van a sufrir múltiples cambios:

- Como la decisión del viaje va a retardarse hasta la proximidad de la salida, el deseo del turista de garantizar el viaje si las condiciones climatológicas lo permiten harán que se desarrolle más el *seguro de anulación* ante un hecho concreto. En este caso, no solo se plantea el crecimiento de este tipo de seguro, sino también el incremento de su cobertura más allá de la cobertura tradicional basada en problemas como los de salud. Esta nueva vía resulta extremadamente compleja ya que depende de unos indicadores de predicción de la inestabilidad climática hoy por hoy inexistentes.

- También cabe la posibilidad de que se instauren seguros que permitan al turista *resarcirse ante determinadas condiciones climatológicas* una vez iniciado el viaje. En este sentido, se podría pensar en la posibilidad de asegurar desde unos determinados niveles de insolación a partir de las condiciones normales de temperatura del lugar visitado hasta las de recuperar una parte de lo gastado si se producen unas condiciones climatológicas extremas.

- El establecimiento de *nuevas formas de aseguramiento* va a utilizarse también por parte de la empresa ante la aparición de situaciones de inestabilidad e incertidumbre del negocio turístico producto del cambio climático. Podría establecerse un seguro que contemplase la

posibilidad de situaciones climatológicas extremas tanto por sus efectos como por su duración que afectarían de una forma clara a la evolución del negocio turístico. Sería una figura paralela al seguro agrario, que tendría que establecer de una forma clara los condicionantes climatológicos precisos que provocan la obligación de indemnizar por parte de las compañías aseguradoras. Podría suceder que este seguro se convirtiera en prácticamente indispensable para poder ofrecer las garantías exigidas por los bancos a la hora de fijar las condiciones de cualquier tipo de préstamo tanto del inmovilizado como, incluso, de las operaciones de descuento.

Uno de los sectores particularmente afectado podría ser el *sector energético* debido principalmente a los incrementos en el consumo de energía por el acondicionamiento de establecimientos turísticos (alojamientos y restauración) y ante la demanda particular de los propios turistas de unas condiciones en las instalaciones de temperatura agradables. El nivel de consumo energético, así como de otros recursos como el agua, es directamente proporcional a las variaciones climáticas de temperatura. Incluso la resolución de otros problemas como el de abastecimiento de agua en zonas de litoral mediante la desalinización o depuración, o la producción de nieve artificial en destinos de montaña, inciden en un incremento del consumo de energía. El estudio de desarrollo de infraestructuras turísticas que aprovechen otro tipo de fuentes de energía alternativas a las tradicionales o que conserven de mejor forma las utilizadas en la actualidad es todavía una asignatura pendiente en España.

Otro sector especialmente significativo es el *transporte*. Segun el IPCC (2001), la aviación representaba el 3,5 por 100 de las emisiones de gases del efecto invernadero y dentro de unas décadas al ritmo de crecimiento actual puede llegar al 11 por 100. Sin embargo, como el objetivo del presente trabajo es evaluar los impactos del cambio climático sobre el turismo, es preciso incidir que las recomendaciones realizadas desde diferentes organismos e instituciones medio ambientales indican que entre destinos próximos es más aconsejable fomentar la utilización del transporte en tren o autobús y disminuir el uso del avión ya que el tipo de transporte turístico incide sobre el gasto de energía. Por ejemplo, el consumo de energía diaria (estimado por la Oficina Federal de Medio Ambiente – UBA) para un viaje desde Alemania con estancias de 15 días es para Baleares: 317 MJ; Canarias: 732 MJ, Río de Janeiro: 2.101 MJ y México: 2.096 MJ (considerando que 100 MJ = 28 KWH).

Es fácil observar que los destinos lejanos se verían seriamente perjudicados por cualquier restricción legal. En el caso español, las zonas turísticas en las que prácticamente se hace imprescindible el avión -Canarias y Baleares- se verían relativamente perjudicadas con respecto al resto de España sobre todo si se tiene en cuenta que sólo es sostenible un consumo de energía por día menor de 200 MJ.

Lógicamente, todos los sistemas de regulaciones y/o sistemas de incentivos a los medios de transporte para frenar el proceso contaminante generaran fuertes impactos diferenciales en los distintos sistemas de transporte, dependiendo de la tecnología utilizada.

14.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

En el análisis de la influencia y repercusiones del cambio climático sobre el turismo *existen más incertidumbres que certezas* ya que no se dispone de información, o al menos de datos fiables, que permitan conocer los posibles efectos de las variaciones de las condiciones meteorológicas. Son muchos los factores que influyen en las tendencias globales turísticas por lo que es difícil determinar la proporción debida a uno solo.

La observación de acontecimientos puntuales indica que el turismo es muy vulnerable a los desastres naturales siempre en el ámbito local y durante un período de tiempo que depende de la importancia de los daños y la capacidad económica para su reparación o regeneración.

Desde la *perspectiva de la demanda*, se desconoce las posibles variaciones en su comportamiento debidas al cambio climático y al nivel cuantitativo del impacto que supondría. Pueden destacarse, en concreto, los *siguientes interrogantes*:

- A partir de qué *temperatura* se produce el efecto comparativo en contra de viajar a las zonas costeras del sur y del este de España por parte de los turistas del norte de Europa y que favorezca la realización de viajes domésticos.
- Cuáles son las posibilidades de los turistas tanto nacionales como extranjeros de *modificar sus vacaciones de verano* y trasladar los viajes a las estaciones de otoño y primavera.
- Resultarían *atractivos los destinos del norte de España* a los turistas extranjeros si se modifican las condiciones climáticas.
- Cuáles son las posibilidades de que los turistas hacia España modifiquen su *comportamiento* orientándose hacia destinos con preferencia de atractivos culturales, rurales y naturales, cuando la imagen predominante es de sol y playa.
- Bajo qué condiciones perdería el turista la *sensación de confort y seguridad* en los destinos turísticos tradicionales.

Desde la *perspectiva de los agentes* que actúan en el sistema turístico las principales incertidumbres son las siguientes:

- *Restricciones políticas y legales* para la asignación de recursos en las zonas turísticas más vulnerables como la energía y el abastecimiento de agua.
- *Capacidad de adaptación y transformación* de las actuales infraestructuras y empresas turísticas ante los cambios en el comportamiento de la demanda.
- *Cambios en los intereses* de los agentes locales hacia otros sectores o actividades económicas.
- *Cambios en los usos* o en el grado de utilización de los recursos turísticos naturales, culturales y sociales.
- Repercusiones sobre el *transporte* de las restricciones en el ámbito internacional (Protocolo de Kioto) o nacional (Plan Nacional de Asignación) debidas a los compromisos sobre las emisiones de gases.
- *Nivel de compromiso* hacia otras formas de desarrollos turísticos sostenibles y capacidad económica para su implantación.

Al no existir modelos que cuantifiquen las interrelaciones entre el clima y el turismo y las respuestas de la demanda ante sus variaciones, se desconocen cuáles son los límites inferior y superior en los diferentes indicadores climáticos que modificarían los comportamientos de los turistas y los agentes del sistema turístico.

14.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

14.8.1. Indicadores de uso habitual según las zonas y productos turísticos

Existen varios métodos que permiten evaluar la potencialidad del clima desde un punto de vista turístico. Normalmente y, en este sentido, se establece una división entre aquellos que hacen uso de *índices climáticos-turísticos* y aquellos otros que realizan *análisis de tipos de tiempo:*

- Respecto a los *índices climáticos-turísticos*, hay que decir que la climatología turística ha abordado con frecuencia el estudio de la potencialidad climático-turística de un lugar a partir de fórmulas que combinan, de forma más o menos acertada, diversos elementos del clima (Burnet 1963, Cerezuela y Ayala 1987, Davis 1968, Flocas 1975, Hughes 1967, Marchand 1986, Mieczkowski 1985, Poulter 1962, Sarramea 1980). La mayoría de estos índices presentan entre sí muchos puntos comunes, y a veces tan sólo varían en el número y la naturaleza de los parámetros tomados en cuenta o en el peso relativo otorgado a cada uno

de ellos. La utilización de estos índices presenta ciertos *aspectos positivos*: en general, son relativamente fáciles de calcular; acentúan la interdependencia de los diversos elementos del clima y permiten comprender con una cifra única una realidad a menudo compleja, dando resultados relativamente fáciles de entender y de interpretar. Pero también presentan *aspectos menos convincentes*:

- La mayoría de los índices se calculan a partir de datos expresados cada cual en *su propia unidad de medida*, lo cual les expone a las objeciones de muchos especialistas que no admiten ver la suma de magnitudes de naturaleza diferente entrar matemáticamente en combinación.
- Los índices suponen una *pérdida considerable de información* y conducen a un alto grado de abstracción debido, fundamentalmente, a la escala utilizada (la de las medias mensuales e incluso en ocasiones, la de las medias trimestrales). El clima experimentado por los turistas no puede identificarse con el clima "teórico" que definen las medias: todas las encuestas demuestran que el turista reacciona únicamente en función de las condiciones reales y del modo cómo el tiempo se manifiesta.
- Los índices *rara vez incorporan las preferencias* que manifiestan los propios turistas en cuanto a las condiciones que consideran óptimas para la práctica turística.

- El método de los *tipos de tiempo* (Barbière 1981, Besancenot *et al.*1978, Crowe *et al.* 1977a, 1977b, 1977c) solventa algunos de estos problemas al no utilizar medias y trabajar directamente con las situaciones atmosféricas vividas día a día por los turistas. Además, permite incorporar los aspectos subjetivos de la percepción. El método de los tipos de tiempo consiste en realizar una clasificación de situaciones diarias más o menos aptas para la práctica turística. Esas situaciones o tipos de tiempo, que se conforman a partir de varios parámetros atmosféricos, se someten a un análisis de frecuencias en el marco de una determinada unidad regional.

Sin embargo, la utilización de estos indicadores nunca se ha aplicado para evaluar el impacto del cambio climático y sus efectos sobre el sector turismo. Normalmente, las variaciones en el *número de turistas* o en los *niveles de ocupación* hotelera pueden ser utilizados para conocer si han existido consecuencias en la demanda ante determinadas condiciones climáticas en el destino o diferenciales climatológicas inusuales entre el país de origen y el de destino (Scott y McBoyle 2001). No obstante, en ningún caso se ha podido aislar el fenómeno climático del resto de factores que pueden haber contribuido también al resultado de una temporada turística concreta o, por el contrario, actuando como contrapeso a unos factores climatológicos determinados.

En el futuro será necesario *desarrollar sistemas de predicción fiable* que integren los cambios climáticos por alteraciones de los ecosistemas con los factores socioeconómicos, especialmente, turísticos que intervienen en el uso de una determinada zona. Obviamente, serían indispensables los esfuerzos interdisciplinarios que permitan evaluar hasta que punto los indicadores turísticos están o no influidos por estos fenómenos meteorológicos, qué grado de retardo puede aplicarse a los efectos de las condiciones climáticas o cuáles son sus consecuencias a largo plazo.

Tabla 14.1. *Zonas, productos e indicadores turísticos.*

ZONAS Y PRODUCTOS TURÍSTICOS LITORALES	
Indicadores	**Descripción**
Consumo energético	El consumo energético (electricidad, gasóleo, etc.) es muy sensible a la variación de las condiciones atmosféricas. El análisis detallado y diacrónico de este indicador en los destinos turísticos puede evidenciar el cambio climático.
Consumo de agua	El incremento en el consumo de agua en los destinos turísticos puede ser factor indicativo del cambio climático.
Inversión en la regeneración de playas e infraestructuras costeras	El incremento de los sucesos extremos y el aumento en el nivel de las aguas marinas provocarán daños en el litoral que necesitarán ser corregidos para mantener su eficiencia turística. La perspectiva temporal de las inversiones puede configurarse como indicador de cambio climático.
Inversión en acondicionamiento de espacios interiores y exteriores	El aumento de las temperaturas favorecerá la instalación de sistemas de acondicionamiento del aire interior pero también favorecerá la instalación de carpas, toldos, fuentes y arbolado en los espacios exteriores. La evolución temporal de las inversiones realizadas en este sentido puede ser indicativa del cambio climático.
Duración de las estancias según meses y reparto estacional de los turistas	Los cambios climáticos provocarán modificaciones en los calendarios de actividad: la desconcentración de los flujos estivales y/o la duración mensual de las estancias (menor en los meses centrales del verano y mayor en los extremos e interestaciones) pueden dar testimonio del cambio climático.

ZONAS Y PRODUCTOS TURÍSTICOS DE MONTAÑA	
Indicador	**Descripción**
Consumo energético	El consumo energético (electricidad, gasóleo, etc.) es muy sensible a la variación de las condiciones atmosféricas. El análisis detallado y diacrónico de este indicador en los destinos turísticos puede evidenciar el cambio climático.
Consumo de agua	El incremento en el consumo de agua para la producción de nieve en las estaciones de invierno puede ser factor indicativo del cambio climático.
Inversión en la producción de nieve	El incremento de las inversiones para la producción de nieve y acondicionamiento de la misma pueden ser indicativo de cambio climático.
Duración en días de la temporada de invierno	El análisis diacrónico de la duración en días de las temporadas de invierno en las diferentes estaciones de esquí puede aportar información sobre el cambio climático.
Límite inferior de las zonas esquiables	La evolución anual del límite inferior de las zonas esquiables puede evidenciar el fenómeno del cambio climático.

14.8.2. Nuevos indicadores propuestos según las zonas y productos turísticos

Los nuevos indicadores que permitan dar respuesta a los interrogantes planteados se pueden *diferenciar por tipos de zonas y productos* principalmente de litoral y de montaña (ver tabla 14.1).

14.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

La Primera Conferencia sobre Cambio Climático y Turismo organizada por la Organización Mundial del Turismo en el año 2003 obtuvo las siguientes conclusiones relacionadas con las *políticas públicas* (WTO 2003):

- Introducir incentivos fiscales o *ayudas financieras* para afrontar la modificación de las infraestructuras turísticas construidas con el objetivo de afrontar las consecuencias del cambio climático.
- Considerar, cuando sea necesario, una modificación del *régimen fiscal* (por ejemplo, los nuevos hoteles en las zonas costeras más vulnerables podrían amortizar sus inversiones en periodos más reducidos).
- Incorporar *incentivos fiscales* para fomentar el uso de materiales de construcción tradicionales.
- Incrementar las *inversiones públicas en infraestructuras* para nuevos desarrollos turísticos que aminoren los impactos del cambio climático.
- Adoptar, cuando sea necesario, una *legislación* que modifique las políticas de planificación, los sistemas de delimitación de zonas y las prioridades de uso del territorio.
- Introducir *cambios en el calendario escolar* que eviten la concentración excesiva en época de vacaciones.
- Proporcionar a los empleados del sector turístico una *formación* orientada a tratar las consecuencias del cambio climático, incluyendo la asistencia práctica a la toma de decisiones.
- Proporcionar formación para *reciclar a los trabajadores del sector turístico* cuando se haya perdido cuotas significativas de mercado.
- Revisar las *políticas de financiación de las oficinas de turismo* asegurando que las actividades de promoción y marketing están adaptadas a las nuevas realidades climáticas (por ejemplo, promoviendo la interestacionalidad).
- Reorientar las *políticas nacionales de transporte*, acordando, por ejemplo, dar una menor prioridad a la aviación y una mayor prioridad a los transportes internos.

Todas estas recomendaciones suponen la incorporación de *nuevos principios para la gestión pública del turismo*, con la necesaria coordinación entre las diferentes áreas o sectores implicados (economía y hacienda, educación, trabajo, medio ambiente, infraestructuras) así como entre los diferentes niveles de competencias (nacional, regional y local), con una mayor participación de la administración pública en la gestión del turismo.

Las principales y más directas implicaciones se producirán en las políticas regionales y locales. Estas políticas deben *revisar las estrategias existentes* de gestión de visitantes asociadas con los incrementos puntuales de la demanda en ciertas zonas costeras y rurales (Parry 2000). Deberían ser implantadas políticas que refuercen las inversiones en infraestructuras turísticas que capitalicen nuevas oportunidades de mercado en nuevas áreas, además de la necesaria *reconversión de determinados destinos y productos tradicionales.*

El necesario *liderazgo público* debe estar acompañado por el esfuerzo de todas las empresas del sector turístico de forma que adapten sus actividades utilizando tecnologías y logísticas más limpias y que entrañen un consumo de energía más racional para minimizar en la medida de lo posible su contribución al cambio climático (WTO 2003).

A todo lo anterior, es preciso añadir que se hace cada vez más necesario orientar las investigaciones hacia la *interpretación de los posibles escenarios futuros* del clima para conocer los impactos más probables sobre el turismo (según se expone en el siguiente apartado). El incentivo público es necesario para realizar estudios que exploren las posibles respuestas estratégicas de la industria turística e identifiquen nuevas oportunidades de expansión de los mercados, con un carácter conjunto entre responsables públicos del turismo, investigadores, sector privado y expertos en clima, que suelen ser los más productivos.

14.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Este Informe tiene carácter preliminar y con él se pretende realizar una evaluación del previsible impacto del cambio climático en el turismo y, también, indagar sobre el conocimiento existente hoy día en torno a este tema, detectando las necesidades de investigación, *identificando áreas críticas de desconocimiento*, que deberían abordarse en el futuro, y proponiendo futuros proyectos de investigación sectorial o integral, tanto para conjuntos de sectores como para determinadas áreas geográficas. Corresponde en este apartado exponer los argumentos que han de orientar la investigación futura con el fin de objetivar el conocimiento y reducir las incertidumbres sobre el impacto en el turismo español del cambio climático, bajo al premisa de establecer *estrategias adaptativas* sin catastrofismo.

Como primera respuesta se puede afirmar que *la investigación en España sobre la dialéctica cambio climático-turismo está por hacer*. En la actualidad, el tema se encuentra en una fase de expectativa en la que se está tomando conciencia de la importancia del tema, pero aún no hay estudios científicos sobre los impactos que podrá tener el cambio climático en el turismo en España. Los trabajos del IPCC y de la ONU, así como otros asociados a éstos, están teniendo en nuestro país un gran eco en los medios de comunicación, hecho que está ayudando a divulgar la naturaleza de estos problemas. Las instituciones y promotores del conocimiento están a la espera de la confirmación del alcance del cambio climático (el Tercer Informe de Evaluación de 2001 del IPCC aporta datos de su constatación) y de sus consecuencias para tomar decisiones y llevar a cabo las acciones que correspondan. La comunidad científica, después de una primera fase de acotación del problema, empieza a formular objetivos específicos y a diseñar metodologías para objetivar la dimensión del cambio y de los impactos específicos en cada ámbito.

Tanto las necesidades de investigación como las áreas críticas de desconocimiento se proyectan sobre las distintas fases de desarrollo del fenómeno y del propio proceso de investigación. En consecuencia, las carencias de conocimiento y las necesidades de investigación se identifican en los distintos apartados de este Informe y en los diferentes *ítem* que se desarrollan en cada caso, así como en los *distintos elementos del Sistema Turístico*: la demanda, la oferta, los operadores del mercado y el espacio geográfico-turístico, particularmente en este último, ya que comprende los recursos naturales con potencialidad turística y, en concreto, los recursos atmosféricos.

Con relación a las fases de estudio del fenómeno y sus consecuencias, señalar que ya se ha constatado la existencia del cambio climático a lo largo del siglo XX, y que el IPCC ha realizado nuevas predicciones sobre cómo será el clima a lo largo del siglo XXI, dibujando escenarios del cambio climático a partir de estimaciones de confianza de los cambios observados (probable, muy probable, ...) e identificando los efectos del cambio: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Para garantizar el nivel de calidad de los informes del IPCC (y conseguir mayor certeza para las estimaciones de confianza de los cambios observados), *es necesario apoyar los programas de investigación* y mantener y mejorar las *redes de observación sistemática del clima* y llevar a cabo estudios de modelización y de procesos físicos del sistema climático.

En cuanto a la dialéctica entre cambio climático y turismo, cabe afirmar que existen *necesidades de investigación* en torno a:

- El *papel que desempeña el clima actual en el sistema turístico español* (ver el apartado 14.2 de este Informe, sobre sensibilidad al clima actual).
- Los *impactos del cambio climático sobre el turismo*: repercusiones en el espacio geográfico-turístico, la oferta, en la demanda turística, y en los operadores del mercado (ver apartado 14.3, sobre impactos del cambio climático en el sector turístico.
- Evaluación a distintas escalas territoriales y delimitación de *zonas críticas y vulnerables* (ver apartado 14.4, sobre zonas más vulnerables).
- Las *repercusiones en otros sectores*, dado el carácter transversal del turismo, e identificar las repercusiones en los *inputs* del sistema turístico (ver apartado 14.6, sobre repercusiones sobre otros sectores o áreas).
- La creación de *sistemas de indicadores* en el sector para la detección del cambio (ver apartados 14.7 y 14.8, sobre las principales incertidumbres y de conocimientos y la posibilidad de detección del cambio)
- El diseño de *modelos de gestión* para optimizar las principales opciones adaptativas y las implicaciones en las políticas turísticas, instrumentales y regionales (ver apartados 14.5 y 14.9, sobre principales opciones adaptativas y las implicaciones para las políticas).

Para estructurar y hacer viables las orientaciones señaladas se formulan las siguientes *propuestas*:

1. Incorporar a los sistemas actuales de estadísticas e indicadores de turismo y actividades asociadas *nuevas variables sobre la relación de clima/turismo* y entre cambio climático y turismo. Por ejemplo, en el Sistema de Indicadores Ambientales del Turismo (Ministerio de Medio Ambiente), en el Sistema de Estadísticas de la Secretaría General de Turismo o en otros sistemas de gestión de datos sobre turismo de escala nacional y regional.

2. Crear un *Sistema de Indicadores sobre la Relación Cambio Climático-Turismo*, para medir el alcance de los impactos del cambio climático en el sistema turístico español. Debería integrar indicadores, variables o *ítem* de todos los elementos del sistema turístico (demanda, oferta, espacio geográfico-turístico, operadores), para poder evaluar objetivamente y de manera integral el impacto del cambio climático y poder disponer de información para la toma de decisiones. Las deficiencias detectadas apuntan hacia la necesidad de identificar variables válidas y organizar la medición con el correspondiente protocolo de interpretación y difusión (diseñar una red de registros que contemple la cobertura territorial y la cobertura temporal). La aproximación analítica de la incidencia del cambio climático en el turismo español ha de contemplar multitud de aspectos. No obstante, en aras a la operatividad ha de simplificarse necesariamente la identificación de los hechos singulares y las variables de referencia. El sistema de indicadores debe comprender indicadores del impacto, indicadores capacidad de adaptación o indicadores de vulnerabilidad, entre otros.

3. El Sistema de Indicadores mencionado ha de reunir una serie de condiciones. El valor instrumental de un sistema de indicadores está sujeto al cumplimiento de una serie de requisitos en al selección y construcción de los indicadores. El Sistema de Indicadores ha de contemplar las *distintas escalas de manifestación del fenómeno*. Los requisitos se identifican en función de las diferentes fases del proceso de obtención de la información, la consistencia metodológica, validez científica, aplicación y comunicación.

4. *Institucionalización de la promoción y financiación de la investigación en cambio climático y turismo*. Por la naturaleza horizontal e intersectorial que tiene el turismo y por el carácter estructural de la dialéctica cambio climático-turismo se requiere abrir y mantener una línea

específica de financiación proyectos de investigación, con programas explícitos sobre esta problemática, que se integre en el Plan Nacional de Investigación y Desarrollo e Innovación (PN I+D+I).

14.11. BIBLIOGRAFÍA

Alonso Fernández J. 1979. Valoración climática de las costas turísticas españolas. Boletín de la Real Sociedad Geográfica, t. CXII (1): 7-20.

Banco de España 2004. Boletín Estadístico. Madrid. Banco de España.

Barbière E.B. 1981. O fator climatico nos sistemas territoriais de recreação. Revista brasileira de geografia, t. XLIII (2): 145-265.

Baretje R. y Crespo B. 1992. Tourisme. Climatologie. Meteorologie. Essai Bibliographique. Aix-en-Provence. Centres des Hautes Etudes Touristiques.

Besancenot J.P., Mounier J. y Lavenne F. De 1978. Les conditions climatiques du tourisme littoral. un méthode de recherche compréhensive. Norois, t. XXV (99): 357-382.

Burnet L. 1963. Villégiature et tourisme sur les côtes de France. Paris. Hachette.

Cerezuela F. y Ayala L. 1987. Bioclimatología turística de la Costa del Sol. Málaga. Sección de Publicaciones de la Universidad de Málaga, Diputación Provincial de Málaga y Caja de Ahorros de Ronda.

Crowe R.B., Mckay G.A. y Baker W.M. 1977a. Le climat de l'Ontario et son influence sur le tourisme et les loisirs de plein air. Volume I, Objectif et définitions des saisons. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique. Toronto. Publications en météorologie appliquée, REC-1-73.

Crowe R.B., Mckay G.A. y Baker W.M. 1977b. Le climat de l'Ontario et son influence sur le tourisme et les loisirs de plein air. Volume II, Été. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique. Toronto. Publications en météorologie appliquée, REC-1-73.

Crowe R.B., Mckay G.A. y Baker W.M. 1977c. Le climat de l'Ontario et son influence sur le tourisme et les loisirs de plein air. Volume III, L'Hiver. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique. Toronto. Publications en météorologie appliquée, REC-1-73.

Davis N.E. 1968. An optimun summer weather index. Weather, t. XXIII (8): 144-146.

De Freitas C.R. 2001. Theory, concepts and methods in Tourism Climate Research. En: Matzarakis A. y De Freitas C.R. (eds.). Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation. International Society of Biometeorology. Pgs. 3-20.

Esteban Talaya A. 2003. Tendencias de la demanda turística en España, La Actividad Turística Española en 2002, AECIT: 43-60.

Flocas A.A. 1975. Winter and summer indices in Athens. Scientific Annals of the Faculty of Physics and Mathematics, Aristotelian University of Thessaloniki, t. XV: 247-264.

Gómez Martín Mª B. 1999a. La relación clima-turismo. consideraciones básicas en los fundamentos teóricos y prácticos, Investigaciones Geográficas 21: 21-34.

Gómez Martín Mª B. 1999b. El Clima como activo del turismo. los folletos turísticos catalanes, En: El Territorio y su Imagen, Vol. I. Pub. Universidad de Málaga y Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Málaga. Pgs. 515-526.

Gómez Martín Mª B. 2000. Clima y turismo en Cataluña. Evaluación del potencial climático-turístico de la estación estival. Tesis Doctoral inédita, Dpto. Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Barcelona.

Gómez Martín Mª B. 2004a. Duración y características de la estación climático-turística estival en Cataluña, Estudios Geográficos, CSIC (en prensa).

Gómez Martín Mª B. 2004b. Percepción de la demanda y métodos de evaluación de la potencialidad turística de los recursos atmosféricos en Cataluña. Documents d'Anàlisi Geogràfica (en prensa).

Gómez Martín Mª B. 2004c. An evaluation of the tourist potential of the climate in Catalonia (Spain): a regional study. Geografiska Annaler. Blackwell Publishing (en prensa).

Gómez Martín Mª B. 2004d. Weather, climate and tourism. a geographical perspective, Annals of Tourism Research, Pergamon, Elsevier (en proceso de evaluación).

Gómez Martín Mª B. 2004e. Reflexión geográfica en torno al binomio clima-turismo, Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, AGE (en proceso de evaluación).

Gómez Martín Mª B. y López Palomeque F. 2003. Destinos de montaña y nieve, en La actividad turística española en 2002 edición 2003, AECIT, Madrid. Pgs. 427-438.

Gómez Martín Mª B., López Palomeque F. y Martín-Vide J. 2002. Aptitud climática y turismo. Variaciones geográficas y cronológicas de la potencialidad climático-turística del verano en Cataluña, Ería 59: 333-345.

Hughes G.H. 1967. Summers in Manchester. Weather, t. XXII (5) : 199-200.

Instituto de Estudios Turísticos. 2004a. Movimientos turísticos de los españoles (Familitur). Año 2003. Madrid. Secretaría de Estado de Turismo y Comercio, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Instituto de Estudios Turísticos. 2004b. Movimientos Turísticos en Fronteras. (Frontur). Año 2003. Madrid. Secretaría de Estado de Turismo y Comercio, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Instituto Nacional de Estadística 2004. Encuesta de Ocupación Hotelera. Año 2003. Madrid. INE.

IPCC. 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press. 994 pgs.

López Palomeque F. 1997. Turismo de invierno y estaciones de esquí en el Pirineo Catalán, Investigaciones Geográficas, 15: 19-39.

López Palomeque F. y Vera Rebollo F. 2002. Espacios y destinos turísticos, en Geografía de España : 545-571, Editorial Ariel, Barcelona.

Maddison D. 2001. In search of warmer climates? The impact of climate change on flows of British tourists. Climatic Change 49: 193-208.

Marchand J.P. 1986. Tourisme et contraintes climatiques. L'exemple irlandais. Bulletin de l'Association de Geographes Français, t. LXIII (5): 369-374.

Mieczkowski Z. 1985. The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism. The Canadian Geographer/Le Géographe canadien, t. XXIX (3): 220-233.

Mings R.C. 1978. Climate and Tourism Development: an annotated bibliography. Climatological Publications. Bibliography Series. 4. State Climatologist for Arizona, Tempe.

Olcina Cantos J. 1994. Riesgos climáticos en la Península Ibérica. Madrid: Acción Divulgativa S.L.

Olcina Cantos J. y Vera Rebollo F. 1998. La propaganda del clima de Alicante a finales del siglo XIX. Las obras de promoción turística como fuente para el estudio del clima de la ciudad. En: Fernández García F., Galán E. y Cañada R. (coord.). Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas. Editorial Parteluz, Madrid : 357-370.

Parry M. (ed.) 2000. Assessmen tof Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe ACACIA, University of East Anglia, Norwich.

Perry A. 1972. Weather, climate and tourism». Weather. t. XXVII (5): 199-203.

Perry A. 2001. More heat and drought - Can Mediterranean tourism survive and prosper? En: Matzarakis A. y De Freitas C.R. (eds.). Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation. International Society of Biometeorology. Pgs. 35-41.

Perry A. 2003. Impacts of climate change on tourism in the Mediterranean. En : Giuponi C.. Schechter M. y Elgar E. (eds.). Climate Change in the Mediterranean: socio-economic perspectives of impacts, vulnerability and adaptation. Pgs. 279-289.

Poulter R.M. 1962. The next few summers in London. Weather, t. XVII (8): 253-257.

Sarramea J. 1980. Un indice climatico-marin pour quelques stations balneaires françaises. Annales de Géographie, t. LXXXIX (495): 588-604.

Scott D. y Mcboyle G. 2001. Using a modified tourism climate index to examine the implications of climate change for climate as a tourism resource. En: Matzarakis A. y De Freitas C.R. (eds.). Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation. International Society of Biometeorology. Pgs. 69-89.

Scott D., Mcboyle G., Mills B. y Wall G. 2001. Assessing the vulnerability of the alpine skiing industry in Lakelands Tourism Region of Ontario (Canada) to climate variability and change. En: Matzarakis A. y De Freitas C.R. (eds.). Proceedings of the First International

Workshop on Climate, Tourism and Recreation. International Society of Biometeorology. Pgs. 153-170.

Smith K. 1993. The influence of weather and climate on recreation and tourism. Weather 48 (12): 398-404.

Vera Rebollo J.F. 1985. Las condiciones climáticas y marítimas como factores de localización del turismo histórico alicantino. Investigaciones Geográficas 3: 161-178.

Vera F., López Palomeque F., Marchena M. y Antón S. 1997. Análisis Territorial del Turismo, Editorial Ariel, Barcelona.

Viner D. y Agnew M. 1999. Climate Change and Its Impacts on Tourism, University of East Anglia, Norwich.

World Tourism Organization 2003. Climate Change and Tourism, Proceedings of the First International Conference on Climate Change and Tourism, Organización Mundial del Turismo, Madrid.

15. IMPACTOS SOBRE EL SECTOR DEL SEGURO

Mª Teresa Piserra, Alfonso Nájera y Roberto Lapieza

Contribuyentes

T. Loster, A. Wirtz, B. Soriano, J. Sáez

Revisores

T. Arévalo, M. Benito, F. Burgaz, M. Chao, G. Fuertes A. García Barona, M. Garcisánchez, B. González, L. de Mingo, F. Mira, M Pérez-Morales, J. C. Sánchez, M. Loriente, J. Satrústegui, A. Villamarín

RESUMEN

La siniestralidad global anual del mercado español no vida desde 1967 hasta 1981 tiene un promedio del 57%, que se elevó a un 71% de media para las décadas siguientes hasta la actualidad, lo que se explica por la reducción en el número de entidades operando en el sector compitiendo de forma agresiva reduciendo las tasas ante un nivel de siniestralidad similar marcada principalmente por el ramo de automóviles y multirriesgo. En principio estos datos no permiten considerar de forma evidente al cambio climático entre los factores determinantes de esta evolución ni discriminar su grado de participación en la misma.

La detección de los efectos del cambio climático en el seguro español se centra en el estudio de la siniestralidad de coberturas clave como inundaciones, tormentas, heladas, granizo y sequía. En otros ramos como salud, accidentes personales o transportes, las cifras actuales no son suficientemente esclarecedoras.

El Consorcio de Compensación de Seguros es una Sociedad Estatal cuyo objetivo es indemnizar en régimen de compensación los siniestros producidos por acontecimientos extraordinarios, incluyendo eventos de la naturaleza y entre ellos, los riesgos climáticos. En la serie 1971-2002, las indemnizaciones por inundaciones tienen una tendencia ascendente con repuntes que son eventos significativamente mayores cada cierto número de años. Se atribuye esta evolución al aumento del índice de penetración del seguro, al incremento de las exposiciones aseguradas y al mayor volumen de capitales asegurados, lo cual es reflejo claro del desarrollo socioeconómico de cada época, sin descartar por ello alguna incidencia, difícilmente determinable, del efecto del cambio climático.

El reaseguro internacional destaca que en el posible escenario de aumento en el nivel de pérdidas por cambio climático, los ramos del seguro que se verán más afectados son daños (patrimoniales, industria, ingeniería e incendios), representativo del aumento del valor de los bienes en zonas con una elevada exposición al impacto climático, y salud, vida y responsabilidad civil pueden verse afectados, aunque en principio en menor medida. En referencia a la distribución por tipo de evento, España sigue la tendencia mundial, son las tormentas y las inundaciones los eventos más numerosos y de mayor factura.

El esquema de seguro agrario en España a través de Agroseguro, ha sido sometido a continuas transformaciones para compensar resultados y abarcar el mayor número posible de cultivos a través de un variado abanico de modalidades de cobertura. Por este motivo, las estadísticas no permiten analizar la siniestralidad de forma homogénea. Sin embargo, su distribución geográfica es la referencia de las zonas que, de ocurrir una desviación significativa de los parámetros climáticos, verán modificada la producción agrícola, por lo que se seguirá imponiendo una adaptación de las técnicas de cultivo. La mitad oriental de la península, por elevada peligrosidad de los fenómenos climáticos y meteorológicos, y por la concentración de cultivos sensibles a dichas variables, se confirma como la zona más sensible a un cambio climático.

Las principales necesidades de investigación del sector del seguro se centran en buscar la combinación de peligro, vulnerabilidad y valor económico expuesto o no, junto a las modalidades de aseguramiento, con el fin de recrear escenarios históricos y probabilísticos específicos para el sector seguros (modelos catastróficos).

Aunque no se han detectado indicios claros de los efectos del cambio climático en el seguro, la variedad de escenarios posibles para el futuro impone la alerta y la constante adecuación de

los métodos y técnicas del tratamiento asegurador de los riesgos relacionados con el calentamiento global. La capacidad de adaptación y la experiencia de los esquemas CCS y Agroseguro son una garantía en los requerimientos de las posibles variaciones de siniestralidad. Pero será la manifestación de estas variaciones en la práctica la que determine la evolución de esos esquemas a largo plazo y la búsqueda de las soluciones aseguradoras apropiadas, asequibles y socialmente soportables, donde, además, se compagine un reaseguro internacional atento a los requerimientos de cada momento y una participación estatal sensible a las necesidades de respaldo que se precisen.

15.1. INTRODUCCIÓN

15.1.1. Datos relativos al mercado asegurador

15.1.1.1. Perspectiva mundial

El volumen de primas mundial alcanzó en el año 2002 los 2.504 millardos de EUR, lo que representa el 8,1 % del PIB mundial (Swiss Re 2003). Ese importe se desglosa en Seguro Vida 1.464 millardos de EUR y Seguro No Vida: 1.040 millardos de EUR.

15.1.1.2. Perspectiva española

El *volumen de primas* alcanzó en el año 2002 los 48.972 millones de EUR en primas devengadas brutas lo que representa el 7% del PIB (DGSFP 2003). Ese porcentaje en Gran Bretaña es del 15%; en Suiza, del 13%; en Corea del Sur, del 12%, y en Japón, de 11%, (Swiss Re 2003). El volumen de primas 2002 se desglosa en Seguro Vida, 26.810 millones de EUR y Seguro No Vida 22.162 millones de EUR.

En la tabla 15.1 se compara la evolución de los parámetros principales del sector durante 2000-2002.

Tabla 15.1. *Principales Parámetros del Sector Seguros en España (2000 – 2002). Fuente: DGSFP (2003).*

Millones de EUR	2000	2001	2002
Primas Devengadas Brutas Vida y No Vida	41.858	42.763	48.972
Primas Brutas / PIB a p.m. (%)	6.8	6.5	7.0
Primas Brutas / Habitante	1.033	1.040	1.170
Primas Brutas No vida	17.421	19.319	22.044
Siniestralidad (siniestros/primas) Bruta (%)	75,7	73,9	69.8

La *cuota de mercado mundial* que corresponde a España es del 1,7 %, mientras que la de EE.UU. es del 38%; la del Japón del 17%; la de Gran Bretaña del 9%; y la de Alemania del 5%. En cuanto al gasto de seguro per capita en España alcanza 1.170 EUR; en Suiza, 4.693 EUR; en Gran Bretaña 3.698 EUR; en Japón 3.335 EUR; y en EE.UU. 3.300 EUR (Swiss Re 2003).

Para dar una idea de la *importancia de cada ramo* en el mercado de seguros no vida de España, a continuación se incluye por ramo y su comparativa 2001-2002 (tabla 15.2).

***Tabla 15.2**. Volumen de primas por ramo. Negocio No Vida. Fuente: DGSFP (2003).*

RAMOS/PRIMAS(Millones EUR)	Primas 2001	Primas 2002	Distribución (%) 2002
Automóviles	8.840	9.870	44.7
Multirriesgos	2.771	3.339	15.1
As.sanitaria y Enfermedad	2.994	3.269	14.8
Responsabilidad civil	842	1.107	5.0
Decesos	996	1.069	4.8
Otros Daños	570	841	3.8
Accidentes	691	730	3.3
Crédito y caución	459	512	2.3
Transportes	395	497	2.2
Asistencia	428	378	1.7
Incendios	152	224	1.0
Defensa jurídica	123	126	0.5
Pérdidas Pecuniarias	58	82	0.3
TOTAL	19.319	22.044	100

Como puede comprobarse en la tabla 15.3, de 1970 al 2002 el *número de entidades aseguradoras* se ha reducido drásticamente; disminución que, si ya es significativa en el caso de las Sociedades Anónimas, aun lo es más cuando se trata de las Mutuas o de las reaseguradoras, aunque éstas últimas partían de un número ya escaso.

Al número de entidades inscritas en el Registro de la DGSFP a 31 de diciembre de 2002, esto es, 399 en total (frente a las 684 de 1970), hay que añadir 351 entidades europeas habilitadas para operar en España en régimen de Libre Prestación de Servicios.

***Tabla 15.3.** Entidades de seguros privados clasificados por su forma jurídica. Fuente: DGSFP (2003).*

Entidades Seguro Directo	1970	1980	1990	2000	2001	2002
Sociedades Anónimas	479	494	391	259	251	247
Mutuas	139	136	75	52	51	47
Sucursales de Entidades Extranjeras	55	39	31	39	37	37
Mutualidades de Previsión Social	--	--	--	69	70	65
Total Entidades seguro directo	**673**	**669**	**497**	**419**	**490**	**396**
Reaseguradoras Especializadas	11	13	8	4	3	3
Total Entidades de Seguros	**684**	**682**	**505**	**423**	**412**	**399**

El *número de corredores de seguros* (personas físicas y sociedades) autorizados en España a finales del año 2002 era de 4.820. De éstos, 1.576 están autorizados por las Comunidades Autónomas y el resto, 3.244, lo están por la Dirección General de Seguros y Fondos de Pensiones.

15.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

15.2.1. Hitos de la historia del seguro en España

1412.- Capítulos de las Cortes de Tortosa. Primer documento que define y regula el seguro (contra fuga de esclavos).

1428.- Primer protocolo específico de seguros (Bartolomé Massous, notario de Barcelona).

1428.- Contrato marítimo más antiguo del que se tiene noticia firmado en España.

1435.- El municipio de Barcelona crea la primera institución de seguros a prima fija (actividad marítimo-mercantil: mercancías y cascos de buques).

1537.- La Universidad de Comerciantes de Burgos crea el primer modelo uniforme de póliza de seguro (actividad marítimo-mercantil).

1539.- Ordenanzas del Consulado de Sevilla.

1553.- Ordenanzas del Consulado de Burgos.

1737.- Ordenanzas de Bilbao. Normativa mercantil aplicada en España hasta la aprobación del Código de Comercio.

1785.- Se crea la primera compañía española que opera en el ramo de incendios, que es también la primera sociedad de seguros por acciones y la primera que cubre en España riesgos distintos a los marítimos: Real Compañía de Seguros Terrestres y Marítimos de Madrid.

1822.- Se funda la Sociedad de Seguros Mutuos de Incendios de Casas de Madrid.

1829.- Se aprueba el primer Código de Comercio, que reguló los seguros de transporte marítimo y terrestre.

1842.- Se constituye la Sociedad de Seguros a Prima Fija contra el Granizo y la Piedra: “El Iris”.

1846.- Se crea la Sociedad Mutua de seguros de cosechas y ganado, préstamos sobre cereales y creación de capital.

1859.- Se constituye la “Protección Agrícola” para seguro de cosechas.

1885.- Nuevo Código de Comercio, que regula los seguros contra incendios, sobre la vida y el de transporte terrestre.

1897.- Se funda en Madrid “La Unión Agrícola y Pecuaria”, sociedad mutua contra incendios, sobre la vida, cosechas y ganado.

1900.- Ley de Accidentes de Trabajo (seguro de accidentes de trabajo).

1902.- Primer proyecto de Ley de Seguros Agrarios.

1908.- Instituto Nacional de Previsión.

1908.- Primera Ley que regula la actividad del seguro privado en España. El Reglamento que la desarrolla data de 1912. En ambas disposiciones se prevé la creación de órganos de supervisión y control (Comisaría General de Seguros, Inspección de Seguros, etc).

1910.- Cajas de seguros populares (sanidad).

1915.- Primera Asociación de Agentes de Seguros (Barcelona).

1919.- Seguro de Retiro Obligatorio Obrero.

1919.- Se crea la Mutualidad Nacional de Seguros Agropecuarios, punto de partida del Sistema de Seguros Agrarios tutelados por el Estado.

1928.- Se crea el Seguro Obligatorio de Viajeros.

1928.- Instauración del Seguro de Crédito a la Exportación.

1928-1929.- Se crea la Compañía Española de Seguros de Crédito y Caución, S.A.

1931.- Seguro de Maternidad.

1940.- Se crea el Servicio Nacional de Seguros del Campo.

1940.- Tribunal Arbitral de Seguros.

1941.- Ley de Mutualidades de Previsión Social.

1941.- Se crea el Consorcio de Compensación de Riesgos de Motín.

1941.- Se firma la primera póliza de seguro colectivo (entre Telefónica y la “Sudamérica”).

1942.- Se instaura el Seguro Obligatorio de Enfermedad.

1944.- El Consorcio de Compensación de Riesgos de Motín pasa a ser Consorcio de Compensación de Riesgos sobre las Cosas.

1954.- Ley de Ordenación de los Seguros Privados. Sustituye a la de 1908.

1954.- En sustitución de los Consorcio de Compensación vigentes, se crea un único Consorcio de Compensación de Seguros.

1962-1965.- Se instituye el Seguro Obligatorio de Automóviles.

1963.- Se crea el Régimen de Seguridad Social.

1964-1967.- Se regula cobertura de riesgos nucleares.

1970.- Se crea la Compañía Española de Seguros de Crédito a la Exportación, S.A.

1978.- Se aprueba la Ley de Seguros Agrarios Combinados.

1980.- Se constituye Agroseguro.

1986.- Nuevo Reglamento de Riesgos Extraordinarios. Los recargos toman como referencia los capitales asegurados en lugar de las primas.

1991.- Estatuto Legal del Consorcio. Empresa pública. Fin del monopolio de la cobertura de los riesgos extraordinarios.

2004.- Nuevo Reglamento de Riesgos Extraordinarios. La pérdida de beneficios queda incluida en la cobertura de los riesgos extraordinarios.

(Del Caño 1983; Maestro 2000; y Burgaz y Pérez-Morales 1996).

15.2.2. Aseguramiento de peligros naturales en España relacionados con un cambio climático

Se detallan las coberturas aseguradoras específicas para lluvia, inundación, viento y variaciones de temperatura, así como alguna de sus manifestaciones (i.e. granizo, tornados), por ser éstos los fenómenos naturales más susceptibles de variar su comportamiento (intensidad y/o frecuencia) por cambio climático.

En cuanto a los ramos, se considera el genérico de patrimoniales, los específicos riesgos agrícolas por su sensibilidad al clima y el ramo de ingeniería.

Asimismo, se dedica un apartado al Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), por su importante papel en la cobertura de los riesgos extraordinarios en España (Según Reglamento del seguro de riesgos extraordinarios aprobado por Real Decreto 300/2004 del 24 de febrero). El CCS es una Sociedad Estatal, con personalidad jurídica propia y plena capacidad para obrar, dotada de patrimonio propio, distinto al del Estado, y sujeta en su actividad al ordenamiento jurídico privado. El objetivo del CCS es indemnizar, en régimen de compensación, los siniestros producidos por acontecimientos extraordinarios, incluyendo eventos de la naturaleza y entre ellos, los riesgos climáticos. Su actuación es de carácter subsidiario, pues sólo indemnizará cuando la entidad aseguradora privada no cubra el riesgo extraordinario o sea insolvente.

15.2.2.1. Ramo de Patrimoniales

Precipitaciones: El mercado privado de seguros cubre los daños materiales causados por precipitaciones (lluvia, granizo o nieve) que, o se pueden considerar “atípicos o extraordinarios”, o su intensidad es superior a un único valor de intensidad para toda la Península Ibérica.

Las reclamaciones de los asegurados se avalan ante la compañía de seguros con un certificado del Instituto Nacional de Meteorología (INM) del observatorio (u observatorios) con datos, más cercano al lugar del siniestro. El seguro privado cubre los daños producidos por el agua que penetre a través de tejados, balcones o ventanas a consecuencia de filtraciones en tejados o desbordamientos en canalones y conductos de desagües superiores. También se cubren los daños ocasionados por el granizo y la nieve de cualquier intensidad (incluido peso de la nieve). Se excluyen los daños causados por filtraciones en pisos bajos, aguas subterráneas o residuales, o si ocurren como consecuencia de un mal estado de mantenimiento de la vivienda.

Inundación: El mercado privado de seguros no cubre los daños causados por las inundaciones. Ver apartado 2.2.4 sobre el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS).

Viento: El mercado privado de seguros suele definir su responsabilidad frente a daños por viento cuando superan un valor de velocidad (km/hora), único para toda el territorio nacional. Las reclamaciones de los asegurados se avalan ante la compañía de seguros con un certificado del INM del observatorio (u observatorios) con datos, más cercano al lugar del siniestro. Para daños producidos por vientos fuertes (rachas de 3 segundos de más de 135 km/h) y tornados, la responsabilidad pasa a ser del CCS.

15.2.2.2. Ramo Agrícola

Precipitaciones: Seguro de Granizo, Lluvias torrenciales y/o Lluvias Persistentes de carácter voluntario para el agricultor con tasas distintas por zona y cultivo. Se realiza en el contexto del Sistema Español de Seguros Agrarios combinados, donde hay participación privada a través de compañías de seguros integradas en un pool gestionado por Agroseguro y participación estatal a través del Consorcio de Compensación de Seguros.

Inundación: Seguro de Inundación de carácter voluntario para el agricultor con tasas distintas por zona y cultivo.

Viento: Seguro de Viento y/o Siroco de carácter voluntario para el agricultor con tasas distintas por zona y cultivo.

Variaciones de Temperatura y Humedad: Seguro de Helada, Sequía y Golpe de calor (Asurado) de carácter voluntario para el agricultor con tasas distintas por zona y cultivo.

15.2.2.3. Ramo de Ingeniería

Precipitaciones y Viento: Existe una cláusula de amplia utilización en el mercado, donde se indica que la compañía de seguros cubre los daños producidas por “fenómenos climatológicos” cuya magnitud supere la correspondiente a un período de retorno de 10 años. La indemnización se condiciona a que el diseño y ejecución del bien asegurado se haya realizado considerando las normas vigentes y las medidas adecuadas de seguridad.

Inundación: El mercado privado cubre la inundación a través de una cláusula similar a la de los “fenómenos climáticos”, donde son objeto de indemnización los daños como resultado de un valor de precipitación igual o superior al correspondiente a un período de retorno (10-20 años).

15.2.2.3. Consorcio de Compensación de Seguros (CCS)

Las indemnizaciones del CCS están condicionadas a la existencia de una póliza de seguros en vigor en ciertos ramos, donde el mercado privado no asume los siniestros derivados de ciertos riesgos extraordinarios.

Precipitaciones: El CCS no será responsable de los daños causados por la lluvia directa, si ésta es el agente único del siniestro. Consultar definición de Tempestad Ciclónica Atípica.

Inundación: Cubre “inundación extraordinaria”, que se define como “el anegamiento del terreno producido por la acción directa de las aguas de lluvia, las procedentes de deshielo o las de los lagos que tengan salida natural, de los ríos o rías o de cursos naturales de agua en superficie, cuando éstos se desbordan de sus cauces normales, así como los embates de mar en las costas. No se entenderá por tal, la producida por aguas procedentes de presas, canales, alcantarillas, colectores y otros cauces subterráneos, construidos por el hombre, al reventarse, romperse o averiarse por hechos que no correspondan a riesgos de carácter extraordinario

amparados por el CCS, ni la lluvia caída directamente sobre el riesgo asegurado, o la recogida por su cubierta o azotea, su red de desagüe o sus patios".

Viento: El CCS cubre los daños que han sido producidos por los vientos contemplados en la definición de Tempestad Ciclónica Atípica, entre los que se incluyen los "Vientos extraordinarios" y los "tornados".

Los datos de los fenómenos atmosféricos y sísmicos, y de erupciones volcánicas y caídas de cuerpos siderales se obtendrán mediante informes certificados expedidos por el INM, el Instituto Geográfico Nacional y demás organismos públicos competentes en la materia.

Pérdida de Beneficios: A los efectos de la cobertura de los riesgos extraordinarios por el CCS, se entiende que se produce una pérdida de beneficios cuando, a consecuencia de alguno de los acontecimientos extraordinarios incluidos en la cobertura, tiene lugar una alteración de los resultados normales de la actividad económica del sujeto asegurado, derivada de la paralización, suspensión o reducción de los procesos productivos o de negocio de dicha actividad.

Exclusiones del CCS en cuanto a los Riesgos Extraordinarios

Con relación a la causa directa del siniestro, el CCS no se responsabilizará de los daños derivados de:

- Lluvia directa sobre el riesgo asegurado o la recogida por su cubierta o azotea, su red de desagüe o sus patios.
- Granizo, peso de la nieve y vientos no extraordinarios (rachas de tres segundos inferiores a 135 km/h).
- Goteras, filtraciones o humedades.
- Rotura de presas, alcantarillas o canales artificiales (salvo si la rotura se produjo como consecuencia de evento extraordinario).
- Elevación del nivel freático, movimiento de laderas, deslizamiento o asentamiento de terrenos, desprendimiento de rocas y fenómenos similares, salvo que éstos fueran ocasionados por la acción del agua de lluvia que, a su vez, hubiera provocado en la zona una situación de inundación extraordinaria y se produjeran con carácter simultáneo a dicha inundación.
- Oleaje o corrientes ordinarios cuando afecten a bienes total o parcialmente sumergidos de forma permanente.
- Eventos que, por su magnitud y gravedad, sean calificados por el Gobierno español como "catástrofe o calamidad nacional" (esta calificación nunca se ha producido en la historia del CCS, a pesar de las grandes pérdidas ocasionadas por algunos eventos catastróficos).

15.2.3. Estadística 1967-2002 de la Dirección General de Seguros y Fondos de Pensiones (DGSFP). Primas adquiridas y siniestralidad periodificada de los ramos no vida, seguro directo

La evolución del mercado español de seguros no vida, en cuanto a primas y siniestros se refiere, se ha ido aproximando paulatinamente, sobre todo en la última década, a los parámetros de comportamiento previsible en un país desarrollado en el entorno de la Unión

Europea. Se partía de un nivel muy bajo, que en primas adquiridas representaba en 1967 un importe de 161 millones de EUR, que se multiplicaba por 10 en 1980 y, por 100, en el año 2000, mientras que la siniestralidad superaba los 80 millones de EUR en 1967, se multiplicaba por 10 en 1979 y, por 100, en 1995. Con ello se comprueba que los porcentajes de la relación siniestralidad/primas fueron incrementándose paulatinamente. Así, de 1967 a 1981 esa relación se mantuvo entre el 50 y el 60 por 100, con un promedio del 57%, mientras que de 1982 a 2002 el promedio se sitúa en el 71%, con un mínimo del 63% en 1982, y un máximo del 78% en 1991 (figura 15.1).

Las razones de esa evolución habría que buscarlas, desde una perspectiva general, en un mayor control y mejor regulación del mercado con vistas a su saneamiento, lo que llevó a una significativa reducción del número de entidades en un contexto de aumento de la competencia en el sector, por el mejoramiento de la gestión y de las políticas de comercialización. Pero sobre todo, habrá que tener en cuenta el comportamiento de determinados ramos, que dejaron reflejo de su peso en la evolución de todo el seguro No Vida, como puede ser el caso de Automóviles (R.C. y otras garantías), cuya siniestralidad en 1989 representaba el 58 % del total de la siniestralidad No Vida, totalizando sus primas, en el mismo año, el 47 % del global de primas de ese mercado. Lo mismo es de aplicación al ramo de Multirriesgo.

En Automóviles, hay que subrayar en primer lugar, que el parque automovilístico español experimentó un crecimiento vertiginoso a partir de los años setenta, lo que, en ausencia de medidas de prevención y con bastantes carencias en la infraestructura viaria, representó un aumento de la siniestralidad. Y en segundo lugar, la elevación de los límites de indemnización para respetar los mínimos impuestos por la normativa comunitaria para el seguro obligatorio, se dejaría notar de forma notable en los pagos por siniestros.

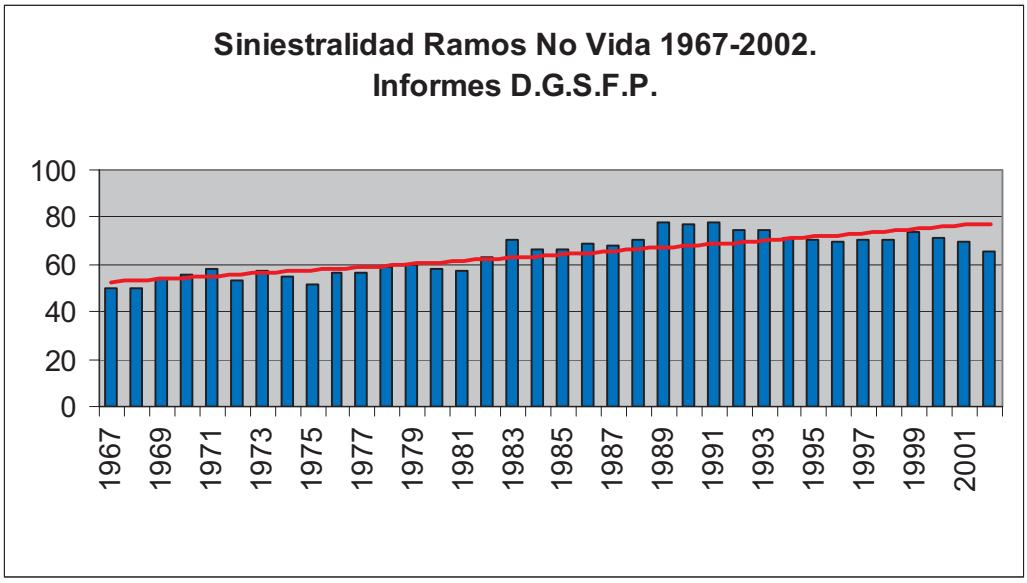


Fig. 15.1. *Estadística Siniestralidad1967-2002 Ramos No Vida en España. Fuente: Memorias DGSFP*.

En cuanto a Multirriesgo, la comercialización de estos seguros a partir de mediados de los años setenta no sólo supuso aglutinar en una póliza los antiguos seguros de robo e incendios, entre otros, sino también la ampliación de garantías, paralelamente a un mayor conocimiento de los asegurados respecto de sus derechos indemnizatorios. El resultado sería también un repunte de la siniestralidad, fundamentalmente en hogar y “pymes”.

15.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

15.3.1. Perspectiva desde la cobertura de los Riesgos Extraordinarios

Los datos de las principales reaseguradoras y otras instituciones del seguro mundial indican que en los últimos tiempos, la siniestralidad mundial relacionada con eventos climáticos (incluidos los eventos extremos) ha experimentado un incremento en frecuencia e intensidad.

En la misma línea, el Tercer Informe sobre el Cambio Climático (IPCC 2001), utilizando datos del sector, asume e incorpora esa evidencia del aumento siniestral, y vaticina que el campo asegurador será uno donde los efectos tendrán mayor verificación. Se trata de averiguar si ese panorama tiene su reflejo en el territorio español, y de si es posible (y en qué medida) atribuir ese aumento de la siniestralidad, en caso de comprobarse, al fenómeno del cambio climático.

A la hora de revisar el comportamiento siniestral de las catástrofes naturales en España hay que hacer una salvedad importante: que los datos estadísticos de que se dispone sobre daños indemnizados por el CCS abarcan como mucho 30 años, con lo que, tratándose de este tipo de siniestralidad, resulta una serie excesivamente corta como para permitir conclusiones de peso.

15.3.1.1. Grandes eventos

En la nomenclatura del CCS, los “eventos extremos” se denominan "grandes eventos", y así se consideran los que hayan dado lugar a pagos que superen un importe de 12.000.000 EUR, del año 1992 (CCS 2003). En la serie de 1977 a 2002 se contabilizan 32 grandes eventos (tabla 15.4). Todos, excepto el ocurrido en abril de 1982 (atentado de ETA contra el edificio de Telefónica, en la calle Ríos Rosas de Madrid), son eventos de la naturaleza. Y de esos 31 eventos restantes 29 corresponden a fenómenos de inundación y 2 eventos a inundación y tempestad ciclónica atípica conjuntamente (en Extremadura en noviembre de 1997 y en Baleares en noviembre de 2001).

En la citada relación de grandes eventos, se descubre que de los 10 siniestros de mayor indemnización pagados por el CCS, 7 corresponden a la década de los ochenta, y entre ellos están los 4 siniestros más costosos. Los 3 restantes ocurrieron en el período 1990-2002 (tabla 15.4).

Para tener una mayor homogeneidad de datos, se toman sólo los grandes eventos por inundación (tabla 15.5). Hay que tener en cuenta que en las estadísticas del CCS y para años anteriores a 1987, los “grandes eventos” de inundación incluyen los daños causados por lluvia, viento y nieve. Desde entonces tienen su consideración específica bajo el epígrafe de “tempestad ciclónica atípica”.

Como no es posible deslindar en los grandes eventos anteriores a 1987 los daños por lluvia y los daños por inundación, y con el fin de poder compararlos con los que a partir de esa fecha corresponden a inundación exclusivamente, se ha calculado el porcentaje que en la siniestralidad general de cada año anterior a 1987 corresponde a lluvias, viento y nieve (tempestad ciclónica atípica), deduciendo ese porcentaje, según cada año, de los distintos grandes eventos por inundación. Lógicamente, al efectuar esta operación algunos eventos quedan excluidos de la tabla por no alcanzar la cifra a partir de la cual se consideran “grandes eventos”.

Se observa que se siguen dando algunas de las características señaladas anteriormente: de los 10 eventos más importantes en cuanto a indemnizaciones pagadas por el CCS, 6 se mantienen en la década de los 80, incluidos los 4 siniestros más elevados, y los otros 4 en la década de los 90. El importe de las indemnizaciones pagadas por el CCS de 1980 a 1990, por

11 grandes eventos de inundación, alcanzó la cifra de 1.109.551.537 EUR, mientras que los pagos del período 1990-2000, por 13 grandes eventos, se situaron en los 500.479.267 EUR, la mitad de la década anterior.

Tabla 15.4. *Grandes eventos. Daños en los bienes. Riesgos Extraordinarios. Fuente: CCS 2003.*

NÚMERO DE ORDEN	MES Y AÑO DE OCURRENCIA		LUGAR DE OCURRENCIA	Nº DE EXPEDIENTES	INDEMNIZACIONES Importes Nominales	INDEMNIZACIONES Importes Actualizados
1º	JUNIO	1977	País Vasco	3.889	7.842.757	49.822.373
2º	ENERO	1980	C. Valenciana	390	7.436.635	30.835.697
3º	ABRIL	1982	C. de Madrid	46	14.975.833	45.639.676
4º	OCTUBRE	1982	C. Valenciana	9.136	60.217.813	171.879.513
5º	NOVIEMBRE	1982	Cataluña	1.587	15.899.787	44.889.872
6º	AGOSTO	1983	País Vasco	24.802	248.266.592	642.103.010
			Cantabria	761	2.192.059	5.669.420
			Navarra	101	254.985	659.479
			TOTAL:	25.664	250.713.636	648.431.909
7º	NOVIEMBRE	1983	Cataluña	3.899	8.221.845	20.661.293
			C. Valenciana	2.947	8.086.492	20.321.154
			TOTAL:	6.846	16.308.337	40.982.447
8º	OCTUBRE	1984	Galicia	4.207	14.424.110	33.413.534
9º	JULIO	1986	C. Valenciana	4.327	10.817.899	21.792.716
10º	OCTUBRE	1987	Cataluña	3.243	13.214.694	24.803.938
11º	NOVIEMBRE	1987	C. Valenciana	17.277	115.147.717	215.323.391
			R. de Murcia	1.523	3.064.633	5.730.788
			TOTAL:	18.800	118.212.350	221.054.179
12º	JULIO	1988	País Vasco	2.322	22.741.620	40.996.457
13º	SEPTIEMBRE	1989	C. Valenciana	4.163	18.144.555	30.390.344
			R. de Murcia	984	4.633.371	7.760.440
			Baleares	421	3.714.327	6.221.132
			Andalucía Este	431	3.458.602	5.792.818
			TOTAL:	5.999	29.950.855	50.164.734
14º	NOVIEMBRE	1989	Andalucía Este	7.266	70.219.964	116.310.862
			Andalucía Oeste	170	3.254.895	5.391.339
			C. Valenciana	112	1.342.661	2.223.955
			TOTAL:	7.548	74.817.521	123.926.159
15º	DICIEMBRE	1989	C. de Madrid	97	15.721.178	25.895.837
16º	OCTUBRE	1991	C. Valenciana	5.116	16.099.522	23.813.936
17º	JUNIO	1992	País Vasco	3.103	20.882.292	29.833.676
18º	OCTUBRE	1994	Cataluña	4.631	46.830.863	59.902.115
19º	SEPTIEMBRE	1995	Cataluña	3.664	20.203.720	24.909.943
20º	SEPTIEMBRE	1996	C. Valenciana	3.114	12.642.405	15.063.998
			Cataluña	1.594	5.673.158	6.759.825
			Baleares	313	1.320.540	1.573.483
			TOTAL:	5.021	19.636.103	23.397.306
21º	DICIEMBRE	1996	Andalucía Oeste	1.154	22.867.597	27.034.053
22º	JUNIO	1997	País Vasco	5.701	72.555.488	84.929.938
23º	SEPTIEMBRE	1997	C. Valenciana	7.494	38.202.020	44.496.599
24º	NOVIEMBRE	1997	Extremadura	3.006	18.951.322	22.001.214
25º	FEBRERO	1998	Andalucía Este	985	23.591.151	27.279.302
26º	SEPTIEMBRE	1999	Cataluña	6.539	34.515.763	38.615.214
27º	JUNIO	2000	Cataluña	2.952	27.510.603	29.965.433
28º	OCTUBRE	2000	C. Valenciana	6.914	65.763.977	70.701.844
			R. de Murcia	2.042	8.344.700	8.971.259
			TOTAL:	8.956	74.108.677	79.673.103
29º	SEPTIEMBRE	2001	C. Valenciana	3.430	30.047.419	31.458.146
30º	NOVIEMBRE	2001	Baleares	6.901	24.607.222	25.648.391
31º	MARZO	2002	Canarias	1.920	34.694.884	35.730.611
32º	AGOSTO	2002	País Vasco	4.609	20.204.327	20.470.204
TOTAL				169.283	1.218.803.997	2.203.688.226

- Situación a 30 de septiembre de 2003.
- Actualización a 31 de diciembre de 2002.

Euros

Si excluimos de la tabla 15.5, los 2 siniestros con mayor período de retorno (marcados con asterisco), y que en esta serie podrían considerarse “atípicos”, como son las inundaciones del

País Vasco de 1983 y las de Valencia de 1987, resulta una distribución más equilibrada de los 10 siniestros más costosos de la serie: 5 en cada década, aunque los 2 más importantes siguen estando en los 80. Además, se observa que los importes que totalizan las dos décadas invierten, como cabía esperar, su tendencia. Así, de 1980 a 1990 aparecen pagos por 416.350.824 EUR (correspondientes a 9 eventos), mientras que de 1990 a 2000 las indemnizaciones alcanzan los 500.479.267 EUR (correspondientes a 13 eventos). Téngase en cuenta que estamos tratando con importes actualizados.

15.3.1.2. Grandes eventos por inundación

Tabla 15.5. *Grandes eventos por inundación. Elaboración propia a partir de datos del CCS.*

GRANDES EVENTOS POR INUNDACIÓN
Euros

Mes y Año de Ocurrencia	Lugar de Ocurrencia	Indemnizaciones Importes Nominales	Indemnizaciones a 31.12.01
Junio de 1977	País Vasco	5.568.357	34.443.899
Enero de 1980	C. Valenciana	1.323.721	5.344.454
Octubre de 1982	C. Valenciana	34.805.896	96.734.526
Noviembre de 1982	Cataluña	9.190.077	25.264.213
Agosto de 1983 (*)	País Vasco, Cantabria y Navarra	189.790.222	477.958.086
Noviembre de 1983	Cataluña y C.Valenciana	12.345.411	30.208.094
Octubre de 1987	Cataluña	13.214.694	24.151.838
Noviembre de 1987 (*)	C. Valenciana y R. De Murcia	118.212.350	215.242.628
Julio de 1988	País Vasco	22.741.620	39.918.654
Septiembre de 1989	C. Valenciana, R.de Murcia , Baleares y Andalucïa Este	29.950.855	48.845.895
Noviembre 1989	Andalucia Este, Oeste y C. Valenciana	74.817.521	120.668.119
Diciembre de 1989	C. de Madrid	15.721.178	25.215.031
		522.113.545	**1.109.551.537**
SUBTOTAL, exceptuado País Vasco (agosto-83) y C. Valenciana (noviembre-87):		**214.110.973**	**416.350.824**
Octubre de 1991	C. Valenciana	16.099.522	23.187.864
Junio de 1992	País Vasco	20.882.292	29.049.344
Octubre de 1994	Cataluña	46.830.863	58.433.746
Septiembre de 1995	Cataluña	20.203.720	24.255.057
Septiembre de 1996	C. Valenciana, Cataluña y Baleares	19.638.386	22.784.835
Diciembre de 1996	Andalucía Oeste	22.870.109	26.326.214
Junio de 1997	País Vasco	72.624.932	82.776.266
Septiembre de 1997	C. Valenciana	38.237.438	43.366.946
Noviembre de 1997	Extremedura	16.869.297	19.069.253
Febrero de 1998	Andalucía Este	23.487.433	26.445.345
Septiembre de 1999	Cataluña	34.731.364	37.834.880
Junio de 2000	Cataluña	27.751.601	29.433.239
Octubre de 2000	C. Valenciana y R. De Murcia	74.049.252	77.516.277
		434.276.209	**500.479.267**
Septiembre de 2001	C. Valenciana	29.554.450	29.751.954
TOTAL		**991.512.561**	**1.674.226.657**

15.3.1.3. Todos los eventos por inundación

Si de la valoración de los siniestros por inundación se excluyen los dos grandes siniestros ("atípicos") citados de 1983 y 1987 la línea de tendencia potencial se presenta en la figura 15.2. Así se obtiene una trayectoria de línea ascendente, jalonada de eventos significativamente mayores cada cierto número de años, en períodos que se reparten de forma bastante homogénea.

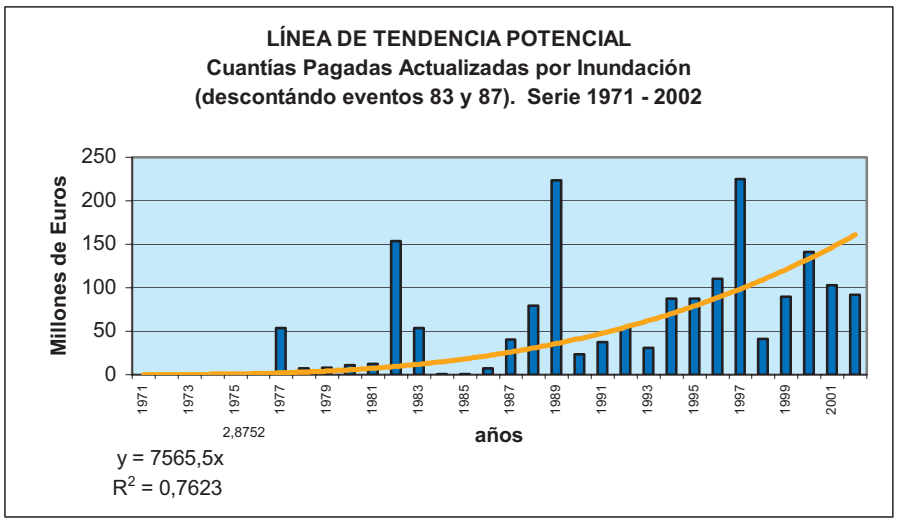


Figura 15.2. *Elaboración propia a partir de datos del CCS.*

15.3.1.4. A modo de conclusión

Achacar al cambio climático esta evolución del coste de la siniestralidad que hemos obtenido por diversos métodos, carece del suficiente fundamento. Resultaría difícil, sin otras evidencias, atribuir esa evolución a factores que no sean: el aumento del índice de penetración del seguro, el incremento de las exposiciones aseguradas y el mayor volumen de capitales asegurados.

Desde el punto de vista mundial también será complicado calcular en términos verosímiles qué incidencia tiene en la línea ascendente de siniestralidad el cambio climático. En una publicación reciente de *Munich Re* un autor experto se formula la pregunta de "por qué las inundaciones están siendo más frecuentes y más costosas", y contesta de la siguiente forma: "El aumento de las pérdidas por inundación en los últimos años y décadas es principalmente atribuible al mayor desarrollo de áreas próximas a ríos y lagos", sin olvidarse de la falta de cuidados para prevenir daños, de la ignorancia y de los objetivos lucrativos (Kron 2003). Así, parece que el cambio climático no figura entre los factores más determinantes en el aumento de tales pérdidas.

En torno a estas mismas reflexiones, Pamela Heck, climatóloga del Departamento de Peligros Catastróficos de *Swiss Re*, apuntaba en una entrevista lo siguiente: "Las pérdidas aseguradas se incrementaron exponencialmente durante los pasados 30 años. Este aumento se debe principalmente a factores económicos, demográficos y geográficos, tales como el rápido incremento del valor de los bienes, su concentración en áreas altamente expuestas y la alta vulnerabilidad de la moderna tecnología. El impacto real debido al cambio climático es, sin embargo, difícil de cuantificar". Insiste la experta más adelante en que el futuro impacto del cambio climático y de los eventos climáticos extremos en la tendencia de pérdidas, es difícil de cuantificar; sin embargo, "algunas medidas tendrán un efecto directo en la reducción de pérdidas", refiriéndose a la prevención y mitigación de riesgos (Swiss Re 2004a).

15.3.2. Perspectiva del Reaseguro internacional

Una valoración adecuada de las pérdidas aseguradas por elementos de la naturaleza considera todas las circunstancias, es decir, el aumento de la concentración de personas y valores económicos, el incremento de la vulnerabilidad, las nuevas tecnologías y lo más importante, una mayor penetración del seguro en el mercado español. Esta serie de motivos pueden hacer pensar que el aumento en las pérdidas no se deba en exclusiva al cambio climático, sin olvidar que todos estos factores mencionados van a mantenerse y, seguramente, aumentar. Desde este punto de vista y pensando en el sector asegurador, "ya no es importante hablar exclusivamente de la realidad de un cambio climático, sino de las consecuencias económicas de los siniestros a los que tendrá que hacer frente el sector seguros" (Sammonds 2002).

Y como claro ejemplo de esta preocupación, se destaca el comentario realizado por la Asociación Americana de Reaseguro al subrayar que el 50% de las pérdidas totales aseguradas en todo el mundo durante los últimos 40 años por eventos de la naturaleza, incluyendo los de origen geológico, han ocurrido desde 1990. De mantener un ritmo semejante, la intervención de los gobiernos de los distintos países para hacer frente a las pérdidas podría ser necesaria.

En el posible escenario de aumento en el nivel de pérdidas hay que destacar los ramos del seguro que se verán más afectados. El primero de ellos es el conocido como "daños" (property en inglés), que incluye patrimoniales, industria, ingeniería e incendios, representativo del aumento del valor de los bienes en zonas con una elevada exposición al impacto climático. Otros ramos como salud, vida y responsabilidad civil (RC), pueden verse afectados, aunque en principio en menor medida.

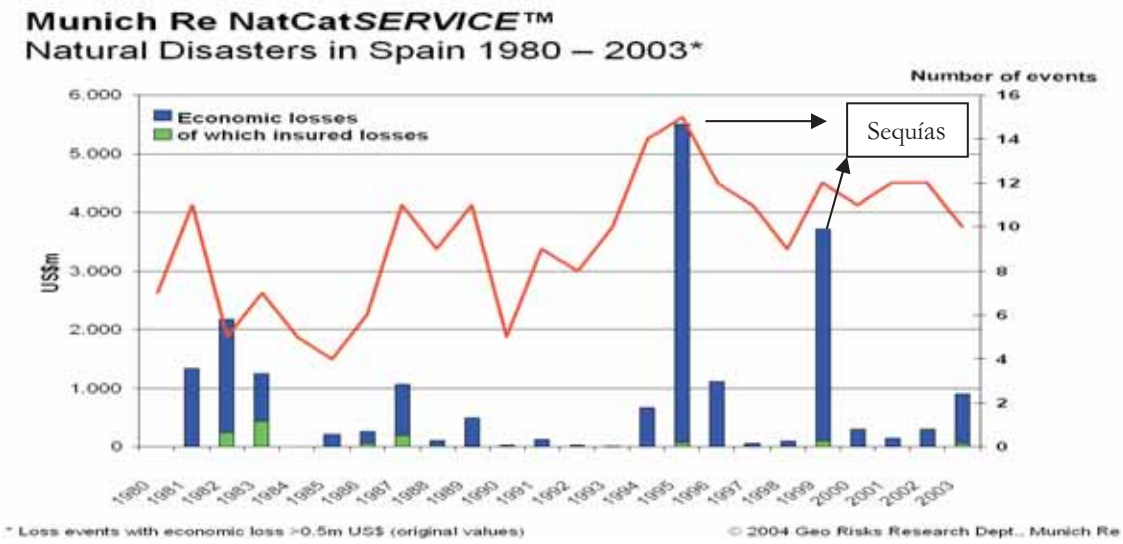


Fig. 15.3. *Desastres de la naturaleza en España (1980 – 2003).*

En la figura 15.3 se puede observar un resultado muy similar al obtenido por el CCS para un período de tiempo comparable. Pese a que el número de siniestros no es elevado, no deja de ser significativa la acumulación de siniestros en la última década (1994 – 2003), al igual que el aumento del coste económico de la pérdidas generadas por estos siniestros, ya que las cifras han sido indexadas.

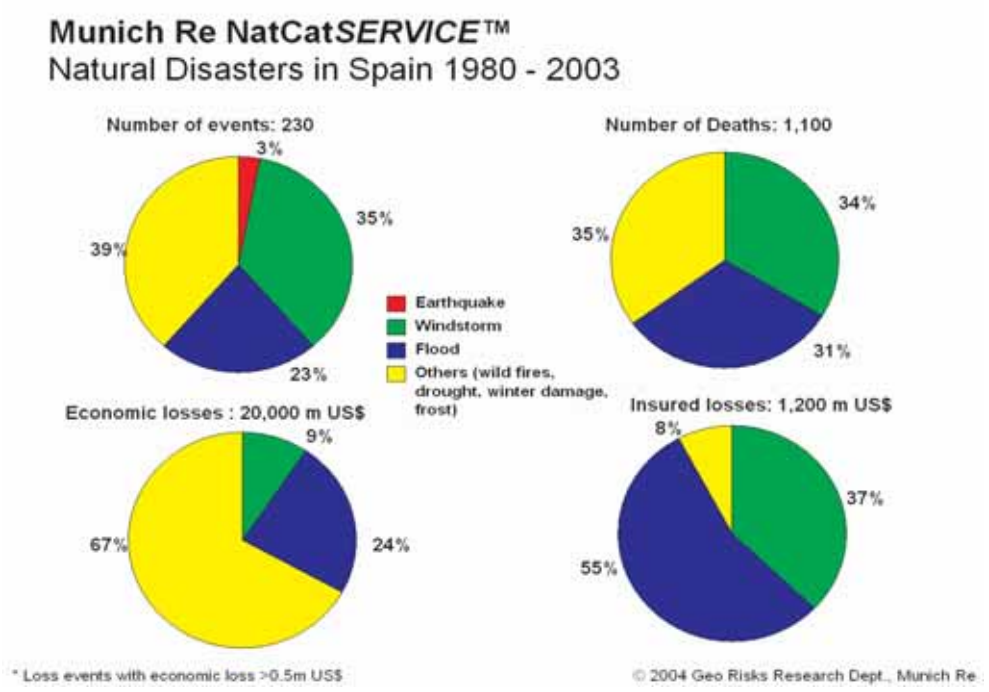


Figura 15.4. *Distribución de desastres de la naturaleza en España 2 (1980 – 2003). Fuente: Geo Risks Research Department, Munich Re.*

También es importante identificar las zonas en las que han ocurrido dichos siniestros, ya que la densidad del seguro y el valor económico de los bienes no son iguales en zonas urbanas y rurales. Por ejemplo, el granizo de agosto 2003 se produjo sobre zonas del sur de Aragón, evento siniestral que de haberse producido en zonas urbanas como las ciudades de Madrid o Barcelona, habrían llevado a pérdidas mucho más elevadas.

En referencia a la distribución por tipo de evento, España sigue la tendencia mundial, ya que destacan las tormentas y las inundaciones (figura 15.4). Así lo ratifica Munich Re en su estudio de las catástrofes 2003 (Munich Re 2003), donde se indica que el 76 % de las pérdidas aseguradas se deben a tormentas y el 8 % a inundación. En el caso de España, lo más destacable en cuanto a pérdidas aseguradas, son las inundaciones por encima de las tormentas. Debido a que los procedimientos de evaluación de los daños económicos y asegurados de Munich Re no son los mismos que los del CCS, los datos no son comparables.

15.3.3. Perspectiva del sector agrícola

Dentro del sector seguros, el agrícola por razones obvias, es uno de los más sensibles a la climatología y a la meteorología. Además, en España existe una larga tradición en la búsqueda de fórmulas óptimas de aseguramiento de cultivos contra los peligros climáticos, hasta alcanzar la que actualmente está en vigor y que representa un ejemplo modélico de gestión de la política agraria desde el sector asegurador.

Aunque se puede documentar con respaldo estadístico la historia de los seguros agrarios en España desde 1902 (Burgaz y Pérez-Morales 1996) no es hasta el año 1940, después de la Guerra Civil Española, que el Estado implanta el “Sistema de Seguros Agrarios”. Desde ese

año y hasta 1980, se cuenta con la estadística siniestral del granizo en los cultivos, sin existir datos fiables para inundaciones, sequías, tormentas, heladas o resto de peligros. Sí hay información sobre las Ayudas del Estado a las Calamidades, que se puede identificar con eventos distintos al granizo, pero sin especificar. Desde 1980, introducido por la Ley de Seguros Agrarios Combinados 87/1978, se van añadiendo paulatinamente y de forma selectiva, la cobertura de helada, viento, lluvia, inundaciones, etc.

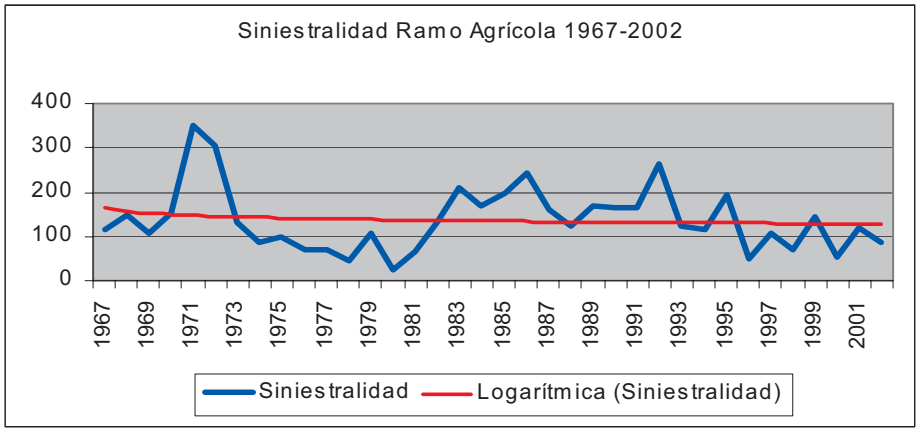


Fig. 15.5. *Fuente: Elaboración propia con datos de Burgaz y Pérez-Morales 1996, e información de Agroseguro (2003).*

En el Figura 15.5. se muestra la siniestralidad 1967-2002 (igualando el período observado al de la figura 15.1) del total del seguro agrario, donde se puede observar un repunte (350%) en el año 1972, cuando se produjo una crisis en el sistema de seguros por alta siniestralidad, que condujo a una redacción de nuevas normas técnicas (tarifa de pedrisco 1973). Otros años con siniestralidad significativa son 1983 (209%), cuando se produjeron inundaciones en el País Vasco y Cantabria; 1986 (242%) con heladas de primavera y 1992 (265%) con una acentuada sequía. La línea de tendencia se desliza suavemente a la baja para el período estudiado, reflejando el efecto compensatorio que producen los ajustes en tasas por cultivo y zona en el esquema del seguro agrario español.

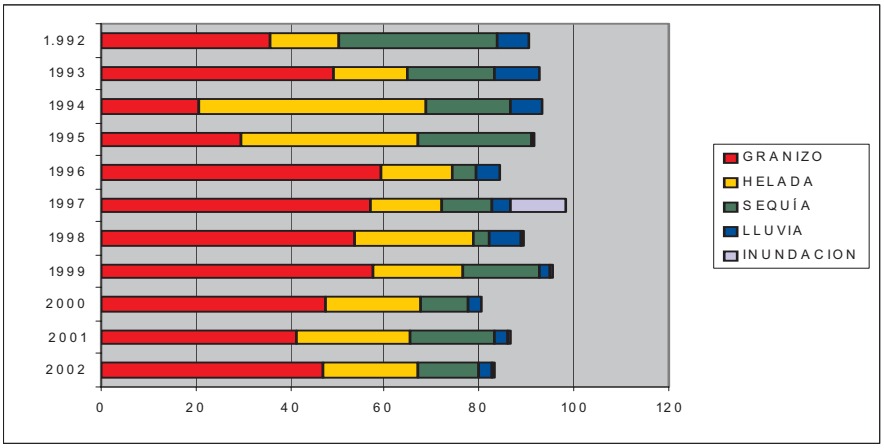


Fig. 15.6 *Distribución porcentual del número de siniestros en seguro agrario (Agroseguro) 1992-2002*
Fuente: Elaboración propia con datos de Agroseguro (2003).

La figura 15.6 permite diferenciar la distribución porcentual del número de las comunicaciones de siniestro en el seguro agrario de Agroseguro, por causas. Se han seleccionado las cinco categorías más significativas (por ello cada columna no alcanza el 100%, aunque se consideran datos anuales que contemplan el 80% o más de las reclamaciones), dejando el incendio, varios tipos de viento y enfermedades, fuera de la gráfica por su menor incidencia. Destaca en primer lugar el volumen de comunicaciones por siniestros de granizo, ya que esta cobertura supone el 50% de la primas del seguro agrario para la serie 1987-2002.

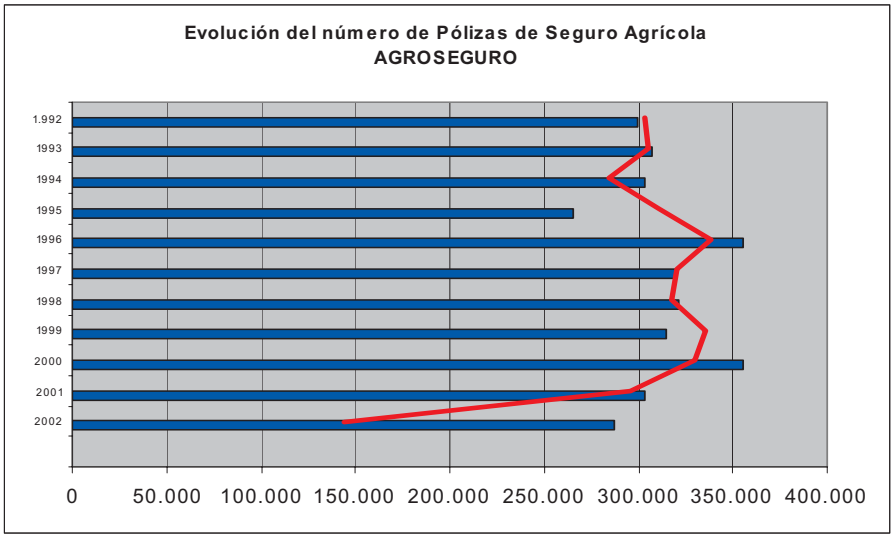


Fig. 15.7. *Fuente: Elaboración propia, con datos de Agroseguro (2003).*

La tendencia al descenso en el número de reclamaciones desde el 2000 se explica junto con la figura 15.7, donde también se presenta una disminución en el número de pólizas desde el mismo año, consecuencia directa de la agrupación de explotaciones del mismo propietario bajo la misma póliza, pero sin que deba interpretarse como una disminución del volumen de negocio asegurado.

Observando la figura 15.8., no se identifica ninguna tendencia en la siniestralidad del granizo ni de la helada, causas analizadas por ser las de más representatividad en cuanto a volumen de primas (53% y 31% en seguro agrario 2002, respectivamente), que permita enmarcar su desarrollo en un escenario de cambio climático. Más bien, el acercamiento de los ratios de siniestralidad al 100% en los últimos años desde valores más elevados, se puede interpretar como una respuesta de adaptación del esquema de aseguramiento a las necesidades del sector agrícola.

15.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

15.4.1. Riesgos Extraordinarios. Indemnizaciones por eventos climáticos

Las cifras reflejadas en el mapa de la figura 15.9 representan las indemnizaciones (importes actualizados) efectuadas por el CCS por daños en los bienes producidos por eventos climáticos (serie 1971-2003), que comprenden inundación, tempestad ciclónica a típica, embate de mar y también, de 1971 a 1986, lluvia, granizo y viento. El 80% de esas indemnizaciones corresponde a inundación. Debe destacarse que el 40% de las indemnizaciones por riesgos climáticos contempladas en la serie se concentran conjuntamente en Valencia y Vizcaya, casi a partes iguales.

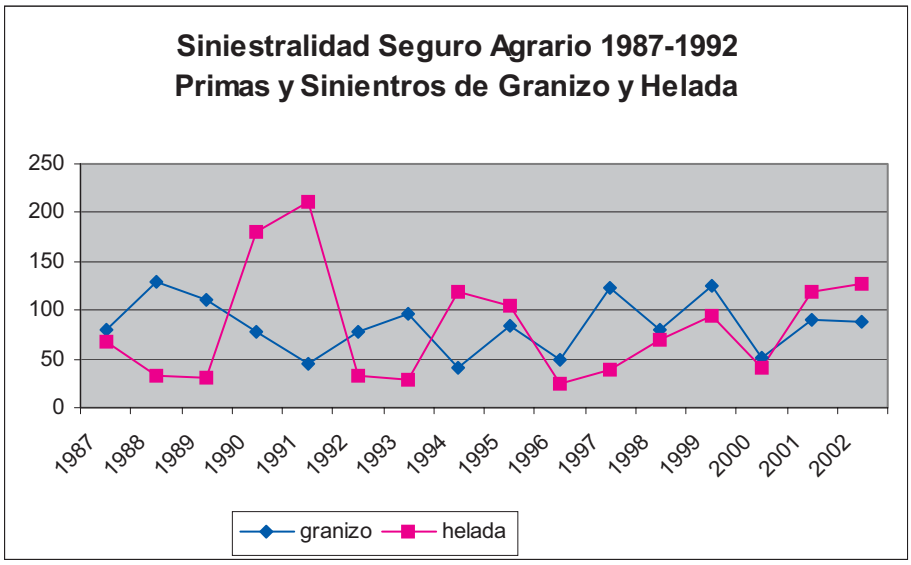


Fig. 15.8. *Fuente: Elaboración propia con datos facilitados por Agroseguro (2003).*

15.4.2. Principales eventos climáticos y meteorológicos ocurridos en España (1980-2003, Munich Re)

A continuación se detalla en la tabla 15.6, los principales eventos climáticos y meteorológicos ocurridos en territorio español, que figuran en la base de datos de Munich Re desde 1980. El importe asegurado no figura en todos los casos por falta de estadísticas oficiales, por lo que Munich Re efectúa sus cálculos a partir de información de prensa, datos oficiales y estimaciones en función de la penetración del seguro en la zona afectada.

15.4.3. Mapas de Agroseguro para el riesgo climático en el seguro agrícola

En la figura 15.10 se presentan los mapas de riesgo de helada, inundación, pedrisco (granizo), sequía y viento para cultivos, donde se incorporan el análisis de probabilidad de ocurrencia (peligrosidad) del Instituto Nacional de Meteorología junto con la experiencia siniestral del sector agrícola por comarca agraria (para algunos peligros, por término municipal y otras subdivisiones). Por tanto, la distribución de los cultivos y su sensibilidad a dichos peligros meteorológicos o climáticos, permite diferenciar áreas de riesgo. A grandes rasgos, las zonas de alto riesgo por peligro, serían:

- helada: interior de los dos tercios norte de la península
- inundación: provincias de la fachada mediterránea y puntuales en costa norte
- granizo: cuadrante noreste
- sequía: mitad sur y Valle del Ebro
- viento: provincias de la costa atlántica y cantábrica, Pirineos, costa sur mediterránea, Zamora, Salamanca y Valladolid.

En la figura 15.11 se ha construido la gráfica de distribución porcentual de siniestros individuales comunicados 2000-2002 para el seguro agrícola y las causas principales, granizo y helada, en las provincias que aportan mayor volumen. Para el granizo, Valencia, Lleida, Zaragoza y Castellón, aportan las mayores comunicaciones de siniestro, llegando a totalizar entre el 40 y 70% de la estadística anual. Para la helada, los siniestros están más dispersos entre las 9 provincias estudiadas, constituyendo entre todas el 50 y 65% de la estadística anual. Para cualquier escenario de cambio climático con modificación de pautas de ocurrencia del granizo y la helada, estas provincias, y particularmente Valencia, son las que más verán más afectado su patrón de siniestralidad, en unos casos en positivo y en otros en negativo.

Figura 15.9. *Indemnizaciones del CCS. Riesgos climáticos. Daños en los bienes.1971-2003. Cifras actualizadas, en millones de Euros. Elaboración propia a partir de datos del CCS.*

Tabla 15.6. *Daños económicos y asegurados en España (1980 – 2003). Fuente: Geo Risks Research Department: Munich Reinsurance Company 2003. Importes en valor original, no actualizados.*

Año	Evento	Zona	Daños económicos (mill. USD)	Daños asegurados (mill. USD)
1981	Viento / Heladas	Valle Guadalquivir	300	Descon.
1981	Sequía	Centro y sur	1035	Descon.
1982	Ola Calor	Barcelona	4	Descon.
1982	Sequía	Centro y sur	1500	Descon.
1982	Tormenta Invierno	Cataluña	350	224
1982	Tormenta Invierno	Cataluña	300	224
1982	Inundación	Levante	375	Descon.
1983	Inundación	País Vasco, Burgos	1250	430
1985	Heladas	España	350	200
1985	Ola Fría	Costa Brava, Valencia	11	Descon.
1985	Sequía	Sud-este	200	Descon.
1986	Tormenta Invierno	España	100	48
1987	Inundación	Valencia, Murcia	1000	185
1987	Tormenta	Tenerife	32	Descon.
1989	Inundación	Málaga	375	Descon.
1989	Tormenta	Costa Blanca, Ibiza	65	16
1991	Sequía	Norte	1	Descon.
1995	Sequía	Andalucía	4500	Descon.
1995	Ola Fría	La Rioja	825	65
1995	Tormenta	España	8	Descon.
1996	Inundación	Bisecas	20	Descon.
1999	Tormenta Invierno	Canarias	415	Descon.
1999	Tormenta Invierno	Bilbao, Asturias (Martin)	100	24
1999	Sequía	Extremadura, Castilla la Mancha	3200	
2001	Granizo	Valencia	50	Descon.
2001	Tormenta	Cataluña, Baleares	6	Descon.
2002	Inundación	Sur	100	Descon.
2003	Tormenta	San Sebastián, Costa Dorada	1	Descon.
2003	Tormenta	Aragón, Cataluña	10	Descon.

15.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

15.5.1. Involucración

La adaptación al escenario siniestral y de tratamiento de riesgos al que aboque el posible cambio climático en el ámbito asegurador, depende de su alcance y de la capacidad de reacción desde la institución aseguradora y de los principales protagonistas en escena: el asegurado, el mercado asegurador y el Estado, así como del grado de implicación de cada uno de ellos. Esta involucración (Figura 15.12.) tiene una doble vertiente: una cuantitativa, que hace referencia a la capacidad financiera y, otra cualitativa, en relación con las distintas formas en que puede concretarse la implicación de cada uno de esos actores, sobre todo en lo que atañe a soluciones y alternativas de aseguramiento.

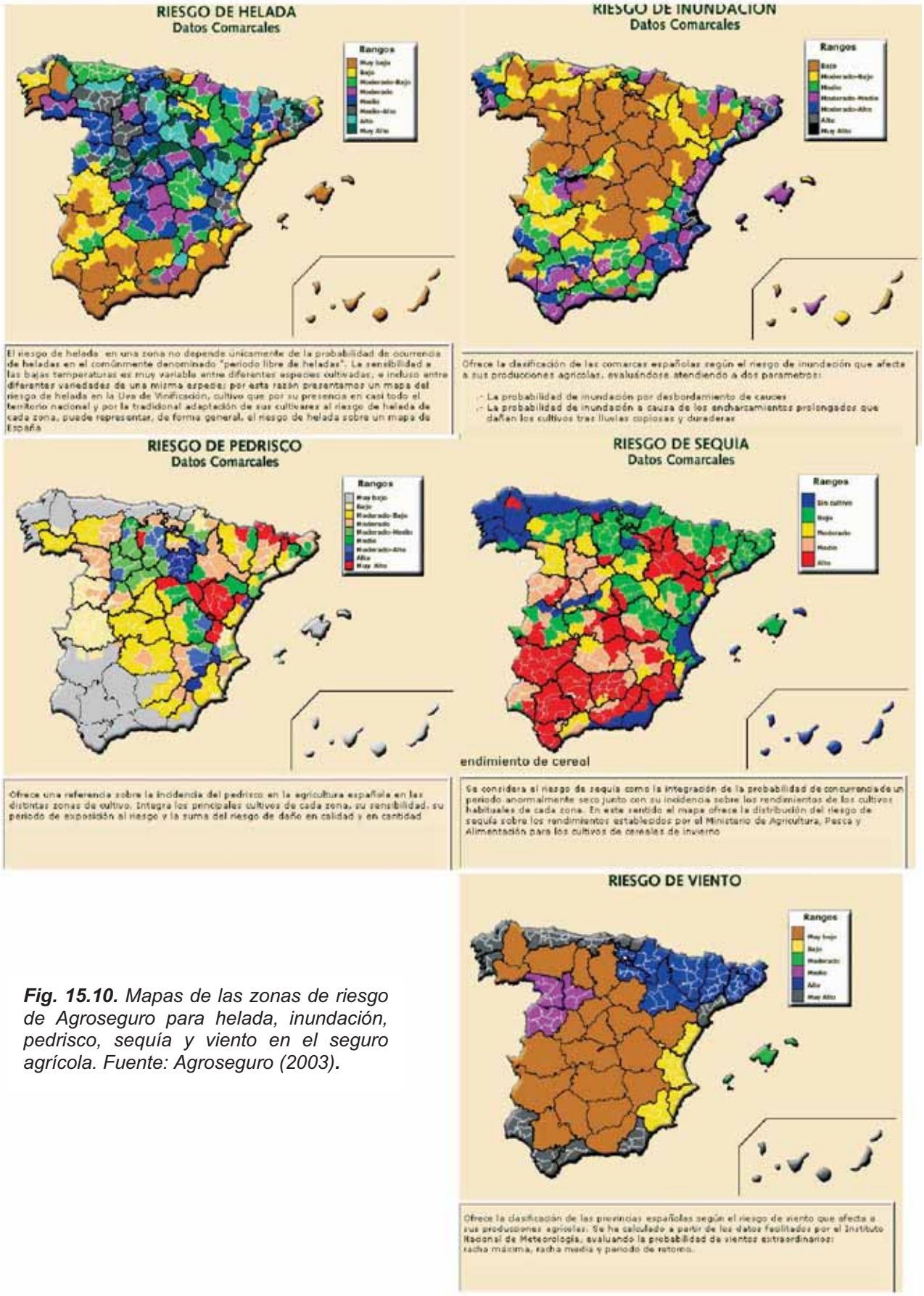


Fig. 15.10. *Mapas de las zonas de riesgo de Agroseguro para helada, inundación, pedrisco, sequía y viento en el seguro agrícola. Fuente: Agroseguro (2003).*

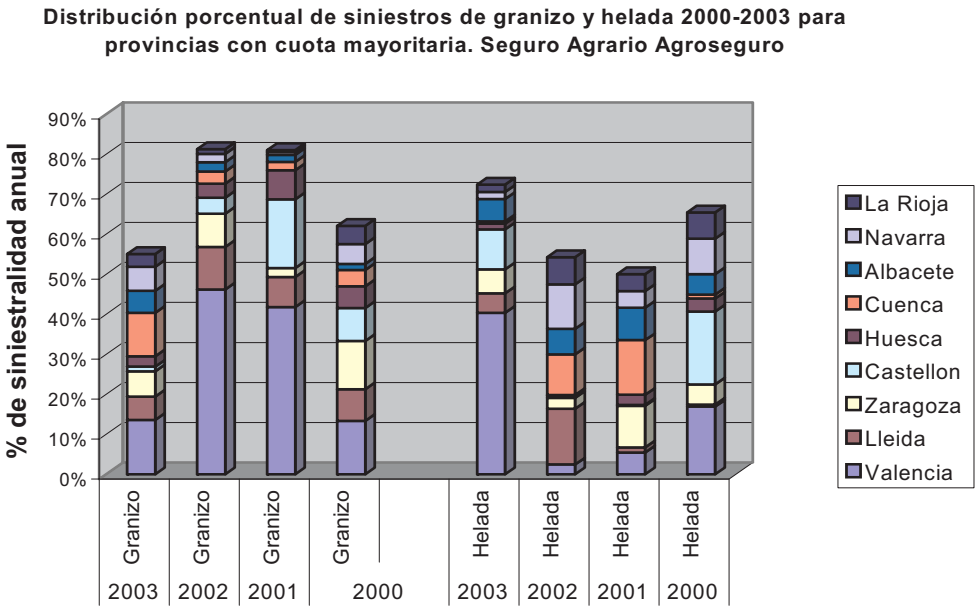


Fig. 15.11. *Fuente: Elaboración propia con datos de Agroseguro (2003).*

Fig. 15.12. *Interacción entre los distintos actores para conseguir una mayor involucración.*

El aspecto cuantitativo de la cuestión:

- precio de seguro asequible para el asegurado
- capacidad del mercado de seguro y reaseguro
- capacidad de mercado de capitales (transferencia alternativa de riesgos)
- capacidad del Estado (último recurso)

El aspecto cualitativo de la cuestión, es decir, las distintas alternativas de financiación de riesgos en función de la involucración de los actores:

- Asegurados: percepción del riesgo, compra de cobertura, medidas preventivas, participación en el riesgo (franquicias).
- Mercado asegurador: desarrollo de nuevos modelos de gestión de riesgos y de nuevas técnicas y fórmulas de aseguramiento.
- Mercado de capitales: desarrollo de la ingeniería financiera para la transferencia alternativa de riesgos.
- Estado: adecuación de su participación a las nuevas circunstancias, haciendo viable la cobertura aseguradora.

15.5.2. Promoción e información sobre el seguro

Un escenario siniestral severo como consecuencia de un cambio climático, va a obligar a un cambio profundo respecto de cómo se percibe la institución del seguro desde el punto de vista de los distintos actores (asegurado, mercado, Estado). Probablemente se imponga una nueva cultura aseguradora, acorde con la nueva circunstancia siniestral, en la que se resalten de forma más notoria y práctica algunos de los fundamentos del seguro y otros aspectos que se van a revelar como fundamentales en la viabilidad de las soluciones aseguradoras, y que requerirán de acciones de promoción e información para que calen en la conciencia social. En este sentido, habrá de hacer hincapié en algunos puntos fundamentales:

- El seguro como actitud responsable de los afectados potenciales (participación activa, protagonismo, en la protección de sus vidas y sus bienes).
- El seguro como instrumento de transferencia de riesgos (posibilidad de recuperación / financiación de la pérdida sufrida).
- El seguro como canal de solidaridad entre afectados potenciales (mutualización y reparto del riesgo para hacer viable la cobertura).
- El seguro como mecanismo preventivo (aplicación de franquicias, reducciones de primas, etc. para fomentar la mitigación de los riesgos).

15.5.3. Difusión de la cultura de la prevención

La prevención ha de figurar como elemento fundamental en cualquier estrategia integral de tratamiento de los riesgos de carácter climático. La necesidad de crear una nueva sensibilidad, una nueva forma de plantarse y asumir el problema y, en definitiva, una nueva cultura de la prevención, viene dada por las implicaciones que ésta tiene desde diferentes perspectivas:

- La prevención como valor social (factor de estabilidad y de cohesión)
- La prevención como imperativo político (como objetivo de interés general)
- La prevención como rentabilidad económica (inversión a futuro)
- La prevención como acicate de la investigación (en el conocimiento, en la mitigación, en el tratamiento)
- La prevención como pilar de la gestión de los riesgos climáticos

Dentro de las herramientas técnicas específicas del seguro, a continuación se valoran las posibilidades existentes para que el sector sea capaz de soportar un elevado volumen de riesgos, es decir, ¿qué métodos de transferencia de riesgos pueden ser considerados para tratar de disminuir el impacto del cambio climático en el sector seguros?.

15.5.4. Sistemas de prediccion y vigilancia

Son los métodos clásicos y propios de las ciencias actuariales que las compañías de seguros aplican para paliar y corregir el impacto de una alta siniestralidad, entre los que se destacan:

- Incremento de tarifas
- Cancelación de pólizas (saneamiento de cartera)
- Limitación en los importes de indemnización
- Aumento en deducibles / franquicias
- Mejoras en la suscripción técnica de riesgos
- Depuración de la peritación de siniestros

La historia demuestra que, tras un grave siniestro, las compañías de seguros tienden a aumentar drásticamente las primas, como sucedió tras el paso del huracán Andrew en 1992 en el estado de Florida (EE.UU.). Sin embargo, tras un período de tranquilidad, se vuelve a un nivel tarifario insuficiente respecto al riesgo asumido, cuyo nivel teórico de probabilidad, en principio no varía (Matthews *et al.* 1999).

15.5.5. Reaseguro

El objetivo básico de la transferencia de riesgo al reaseguro es reducir la responsabilidad del asegurador directo, tratando de evitar futuras desviaciones desconocidas que se puedan ver especialmente agravadas en el caso de eventos de la naturaleza. El reasegurador reduce las pérdidas potenciales del asegurado al asumir parte de su riesgo, aunque él mismo busca el equilibrio en su cartera a través de la dispersión geográfica del negocio que adquiere (distintos aseguradores en diferentes países) y, especialmente, ante situaciones de pérdidas elevadas y difícilmente controlables, como siniestros con prolongados períodos de retorno.

Cabe destacar que más allá de la mera transferencia del riesgo, el reaseguro, por su larga experiencia en el tratamiento de los peligros de la naturaleza, ha ofrecido apoyo tradicionalmente al sector al realizar numerosos y profundos análisis de mercados y grandes siniestros, además de proporcionar asesoramiento respecto a las diversas opciones adaptativas a los nuevos riesgos. En la tabla 15.7 se comprueba la rápida evolución positiva (2000-2002) de la relevancia del reaseguro como apoyo al seguro directo.

El reaseguro no es la única forma de adaptación al cambio climático, sino es la opción más tradicional, ya que en los años 90 surgieron lo que se conocen como ART (Alternative Risk Transfer) procedentes del sector puramente financiero.

15.5.6. ART (*Alternative Risk Transfer*)

Se puede considerar que las soluciones ART son productos financieros orientados a resolver situaciones de transferencia de riesgos puntuales, más que a la utilización de los mismos como un producto de referencia estándar. Dichas soluciones actúan como un complemento a los métodos tradicionales de reaseguro para optimizar la retención del riesgo, reducir la volatilidad de los ingresos a lo largo del tiempo y obtener nuevas fuentes de financiación de capacidad para asumir negocio.

Tabla 15.7. *Primas Mundiales del Seguro Directo y Reaseguro. Fuente: Partner Re (2004).*

(en Millones de Euros)	Directo	Reaseguro	% Cesión
América del Norte	479.300	54.371	11
Europa	289.420	40.987	14
Japón	48.516	1.673	3
Asia	76.119	9.201	12
Resto del Mundo	19.239	8.365	43
Total 2002	912.594	117.107	13
Total 2000	761.192	86.157	11
Crecimiento 2000 - 2002	0,2	0,34	2

A través de las distintas formas presentadas de transferencia de riesgos, el sector seguros demuestra su capacidad de adaptación a sucesos catastróficos. El problema es saber si puede ser lo suficientemente rápida, y más aun, el grado de aceptación de dichos métodos alternativos dentro de un sector tan tradicional.

En definitiva, los productos ART se diseñaron para limitar el riesgo de cualquier sector a sucesos de cuantía potencialmente impredecible y recurrencia errática, donde cabría el escenario de un posible cambio climático. Esta transferencia de riesgos puede ser realizada por compañías de seguros, reaseguro o por el propio asegurado, quien puede acudir al mercado financiero y contratar un bono catastrófico, como ya ocurre en algunas empresas del sector energético.

A continuación se describen brevemente las distintas soluciones alternativas que pueden contribuir para que el sector seguros se adapte a las consecuencias del posible cambio climático:

- Métodos de financiación del riesgos (Reaseguro Financiero. El reaseguro financiero se refiere al método de reaseguro de bajo riesgo técnico, que incluye una parte de riesgo temporal con una vigencia de varios años. Generalmente se diseña para carteras estabilizadas y se considera el tipo de interés en el cálculo de su coste)
- Mercados de capitales
    - Derivados climáticos (Opciones / Swaps): su funcionamiento es muy similar al de sus homónimos en el sector de capitales aunque en este caso ofrecen una protección (hedge) contra las variaciones climáticas (temperatura, lluvias, sequías,...).
    - Bonos (Cat Bonds): de funcionamiento semejante al de los bonos más comunes, pero en los que el pago de intereses y del nominal están unidos a un índice meteorológico.

Últimamente han surgido más métodos alternativos de transferencia de riesgos como se refleja en la figura 15.13, aunque los ya descritos pueden ser considerados como los más utilizados. Pese a todo y como informa GAO (United States General Accounting Office) y Swiss Reinsurance Company, el número de Bonos Catastróficos supone tan sólo entre el 2,5 y el 3 % de la cobertura catastrófica a nivel mundial.

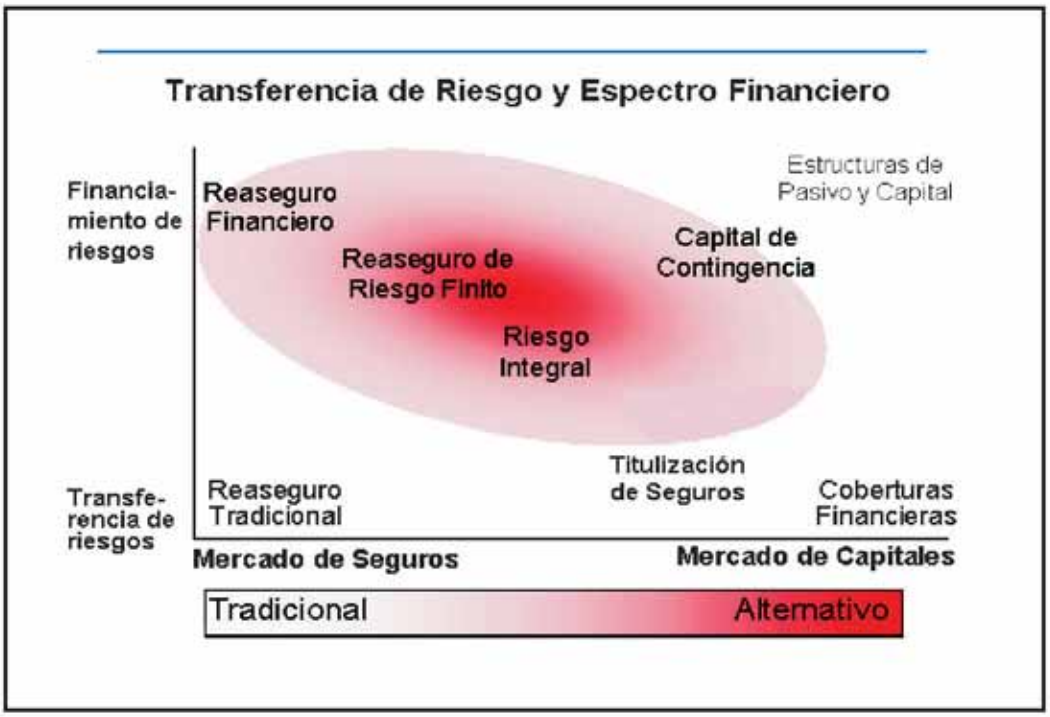


Figura 15.13. *Transferencia de Riesgo y Espectro Financiero. Fuente: Munich Re (2000).*

15.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES O ÁREAS

15.6.1. Seguro y Reaseguro

El efecto directo que un cambio climático con un aumento en la siniestralidad ofrece al sector seguros es obviamente negativo. Principalmente porque el cálculo técnico de las primas que una compañía de seguros debe cobrar para poder hacer frente a las posibles pérdidas, se realiza sobre resultados y siniestralidad del pasado. Si el cambio climático conlleva eventos de distinta frecuencia y/o intensidad no esperada o desconocida, puede conducir a muchas compañías de seguros a una posible situación de insolvencia. En el caso de España y para el mercado privado de seguros, la existencia del CCS y de Agroseguro, supone un buen respaldo, aunque no exime a ninguno de los “pools” citados el considerar las consecuencias de los escenarios de cambio climático.

En cuanto al reaseguro, por su posición de respaldo al sector, se ve directamente implicado con mayor y más intensa siniestralidad, ante los efectos de un posible cambio climático. Más si se tiene el cuenta que puede sufrir el impacto de las acumulaciones de siniestros procedentes de diversas compañías de seguros en la misma zona afectada. La incorrecta y/o incompleta gestión de las ubicaciones de los riesgos que componen una cartera, ya sea desde el punto de vista del asegurador como del reasegurador, puede resultar decididamente perjudicial en caso de siniestro catastrófico al desconocer su extensión e importe total.

15.6.2. Sociedad en general

Aunque no parezca tan evidente la implicación que supone la posible afectación del cambio climático sobre el sector seguros en la sociedad, se puede estudiar lo ocurrido en zonas del mundo donde la incidencia de los eventos climáticos resulta mayor. Como indica Swiss Re en un estudio del año 2000 (Beder 2001) alrededor de 650 aseguradoras estadounidenses se declararon insolventes entre 1969 y 1998 debido a desastres de la naturaleza.

La situación de quiebra de parte de un mercado asegurador, no sólo ocasiona una disminución en la competencia del sector, la subida de precios del seguro, la desconfianza de los asegurados y un efecto directo en el IPC de estos países, sino que puede llegar a la situación de no encontrar cobertura aseguradora. Así ocurre ya en algunas zonas de alta exposición a los riesgos de la naturaleza en Estados Unidos, donde la población encuentran serias dificultades para conseguir un seguro para su propiedad.

15.6.3. Estado

En última instancia, serán los Estados los encargados de velar por la oferta de seguros para dichas coberturas o los que acaben completando dicha protección. En el caso de España, está mayoritariamente resuelto por la existencia del CCS, aunque no es responsable de todas situaciones de siniestro posibles. Siempre hay espacio para soluciones conjuntas de seguros públicos complementados con la participación del sector privado y el Estado. Hay que tener en cuenta de forma adicional, que gran parte de las infraestructuras pertenecientes a gobiernos, mantienen en muchos casos una política de “autoseguro”, y en ese caso se verían igualmente afectados. En caso de una catástrofe natural no se ha de considerar tan sólo la pérdida directa sino el importe de su reconstrucción – recuperación.

15.6.4. Banca

Actualmente, las empresas de servicios financieros, y los bancos en particular, comienzan a considerar el potencial del cambio climático a la hora de evaluar la rentabilidad de inversiones o desarrollar nuevos productos (World Bank 1999), lo que se puede considerar tanto un nuevo nicho de mercado y a la vez, como un nuevo motivo de competencia. Lo que queda claro es que la banca ha sido capaz a lo largo de los últimos años de adaptarse a nuevas y más complicadas situaciones creando nuevos productos y nuevos servicios. Una nueva serie de productos ya ha nacido, desde fondos de inversión conducidos por parámetros del medio ambiente hasta sofisticados derivados diseñados para corregir desviaciones frente a riesgos meteorológicos.

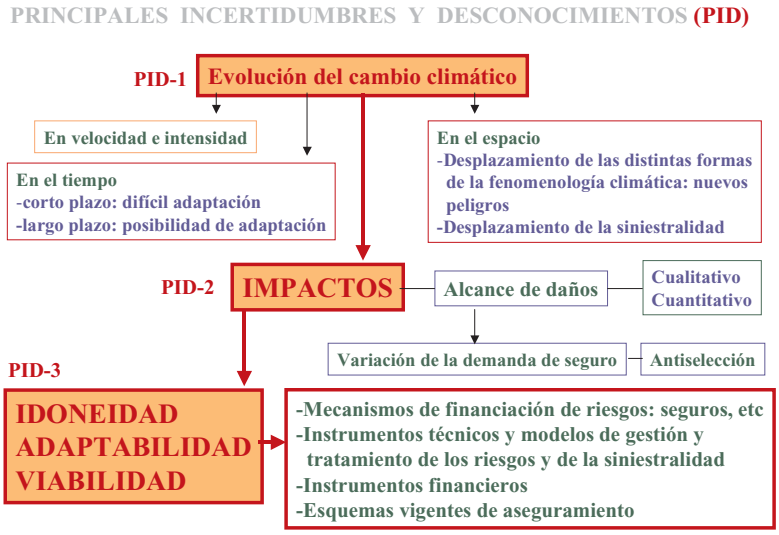
15.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

Las principales incertidumbres e interrogantes fundamentales en torno a los efectos del cambio climático en el sector asegurador afectan a tres niveles distintos (Tabla 15.8):

15.7.1. Evolución del cambio climático

De todos los escenarios que puedan vislumbrarse como posibles, se desconoce a ciencia cierta cuál de ellos se decantará, qué grado de variación climática tendrá y a qué velocidad llegará, dependiendo de la región, área, zona que se considere. Lógicamente, habrá más capacidad de reacción cuanto mayor sea el plazo en que el cambio se produzca y cuanto menor sea ese cambio. El desplazamiento geográfico de las distintas formas de la fenomenología climática y, por tanto, el desplazamiento de la siniestralidad, es otra incertidumbre a considerar.

Tabla 15.8. *Principales incertidumbres y desconocimientos.*



15.7.2. Impactos y efectos que cabe esperar

El impacto, el alcance de los daños y la intensidad de pérdida van a depender del comportamiento del posible cambio climático y de la vulnerabilidad de las áreas afectadas (exposición al riesgo, población y valores expuestos, concentración...). Las pérdidas cualitativas, intangibles, como las que pueden afectar a la estructura social, al sistema político y a la cultura de una población, no son ámbitos en los que el seguro tenga un papel fundamental que desempeñar. Un daño cuantitativamente muy elevado puede representar por vía consecuencial, pérdida en el sentido indicado; pero también puede suponer una alteración cualitativa en la forma de concebir el seguro y en sus modalidades y aplicaciones.

Cabe augurar que la variación del alcance e intensidad de los daños (incertidumbre) tendrá una repercusión directa en la variación de la demanda del seguro. El problema de la antiselección (que solamente adquieran seguro quienes tienen los mayores niveles de riesgo) seguirá latente en la cobertura de catástrofes, y de su planteamiento dependerá, en buena medida, la naturaleza y alcance del sistema de cobertura que se adopte.

15.7.3. Idoneidad, adaptabilidad y viabilidad de la institución aseguradora

Del primer punto (7.1), depende la resolución de la idoneidad, adaptabilidad y viabilidad de los instrumentos y sistemas de cobertura ante los escenarios que se produzcan, lo que remite a la pregunta de cuál será el margen de maniobra y la capacidad de respuesta de las organizaciones, empresas, instituciones y organismos que participan o son susceptibles de participar en las soluciones aseguradoras frente a esos escenarios.

15.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

15.8.1. Variación de la siniestralidad

- En ramos clave:
  - *Tormentas*: El referido incremento de la siniestralidad por las tormentas al sector seguros tanto en el mercado primado español como en las estadísticas del CCS, puede

relacionarse con el incremento de las sumas aseguradas en zonas expuestas y de la penetración del seguro. No obstante, es un factor a tener en cuenta.
- *Inundación*: Íd que en tormentas.
- *Heladas, sequía, granizo*: son ramos tradicionalmente relacionados con los riesgos agrícolas. Debido a la prolongada estadística de la cobertura del granizo para este tipo de riesgos (1940-2003), se plantea como posible la identificación de un patrón de incidencia de las temperaturas extremas en verano con las granizadas.

- Otros ramos: Las cifras actuales no son suficientemente esclarecedoras en ramos como salud, accidentes personales o transportes, es decir, no existe una correlación clara entre estos ramos y la evolución del clima actual.

15.8.2. Insuficiencia manifiesta de los precios

El precio del seguro se calcula en función de la experiencia en el pasado, aunque últimamente se ha comprobado que los precios cobrados por coberturas catastróficas o de eventos de la naturaleza han sido claramente insuficientes para hacer frente a los grandes siniestros, no pudiendo ser recuperados en la cantidad de años prevista, antes de la ocurrencia de otro gran siniestro de importe similar o mayor.

Esto sucede porque es muy difícil considerar el potencial en pérdidas de un evento extremo y sobre todo, cuando su período de retorno puede variar, como por ejemplo, por un posible cambio climático. Así, para una ola de calor como la sucedida en el verano de 2003 en Europa, se consideraba un período de retorno de 450 años (Munich Re 2004). En las próximas décadas quizás se podrá comprobar si dicho parámetro se ha reducido para el peligro de altas temperaturas debido a un período de retorno inferior.

15.8.3. Reacción de los sectores financieros hacia sectores rentables

La reacción de las instituciones financieras puede ir a la búsqueda y continua creación y crecimiento de productos financieros adaptados, principalmente derivados y fórmulas financieras, para la mitigación o acomodo de cualquier industria a dichos efectos. Por otro lado, también adaptan productos ya existentes, como créditos hipotecarios, para poder hacer frente a los riesgos que involucren los riesgos climáticos en este nuevo escenario.

15.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

Desde la perspectiva del sector del seguro, se enumeran a continuación las actuaciones identificadas como necesarias y positivas, junto con el ente que deber promoverlas, para que la actividad aseguradora se pueda desarrollar en España en un entorno más acorde con las previsibles consecuencias de un cambio climático:
- Revisión de las Normas Básicas de Construcción y Diseño para adaptar las antiguas y las nuevas estructuras, de todo tipo, a manifestaciones más extremas y/o más frecuentes de los peligros climáticos. Mº de Fomento.
- Planificación Territorial y Usos del Suelo acordes con la peligrosidad que se defina en cada área a los fenómenos climáticos. Mº de Medio Ambiente, Ministerio de la Vivienda.
- Promoción de la educación en la prevención desde la educación primaria. Mº de Educación.
- Promoción de la prevención. Protección Civil. Mº del Interior.
- Financiación de la investigación dirigida a todas las áreas donde el clima tiene su influencia. Mº de Ciencia y Tecnología. Ministerio de Sanidad.

- Adaptación de coberturas aseguradoras y Normas Internacionales de Contabilidad (NIC). Mº de Economía y Hacienda.
- Análisis de viabilidad de política agraria. Mº de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Para mejor desarrollo de estas medidas, una vez analizadas e implantadas desde el nacional, ha de hacerse el seguimiento en el entorno autonómico.

15.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

Se distinguirán las necesidades de investigación en cuanto estén relacionadas con la peligrosidad de los fenómenos naturales en estudio y la vulnerabilidad y valor económico de los bienes asegurables.

15.10.1. Peligrosidad

Se refiere a un mejor conocimiento de los fenómenos, de forma que se puedan detectar indicios de cambio climático.

- Adaptación de los formatos (p.e. nuevas tecnologías) y plazos de disponibilidad de los datos de los fenómenos meteorológicos a las necesidades de sector seguros.
- Explicación de los escenarios que se manejan en el IPCC específicos para España, para su correcto uso en todos los campos de estudio.
- Estandarización de toma de medidas de las variables meteorológicas y climáticas, así como los procedimientos, con los países europeos.

15.10.2. Vulnerabilidad

- Estudios experimentales de vulnerabilidad de estructuras y cultivos en las distintas áreas geográficas, a los principales fenómenos meteorológicos y climáticos en sus manifestaciones más extremas.
- Estadísticas detalladas y prolongadas en el tiempo, de los datos de siniestralidad para el mercado asegurador español, tanto por áreas como por eventos catastróficos, que ayuden a detectar el cambio climático.

15.10.3. Valor económico

- Estadísticas actualizadas de penetración del seguro en España por tipo de riesgo, expresado en valores asegurados.
- Estadísticas actualizadas del parque inmobiliario (censo), como mercado potencial para el seguro.

La combinación de peligro, vulnerabilidad y valor económico expuesto o no, junto a las modalidades de aseguramiento, con el fin de recrear escenarios históricos y probabilísticos específicos para el sector seguros, resulta en *modelos catastróficos (cat models)* de aplicación muy extendida en mercados fuera de España. En algunos casos se incluyen, para la generación de bases de datos de eventos estocásticos, la influencia del cambio climático a medio y largo plazo. En el mercado de seguros español no se utilizan los modelos catastróficos, lo cual significa que no pueden facilitar a las Agencias de Calificación la documentación requerida para conseguir su calificación, algo muy importante para los accionistas, para el mercado de capitales y para competir internacionalmente.

15.10.4. Seguimiento

Con el ánimo de que no quede aquí este análisis de la evolución del mercado de seguros durante las últimas décadas, que trata de identificar las repercusiones que el cambio climático puede haber ejercido y prever las que en un futuro próximo puedan acontecer, se propone la creación de un observatorio de seguimiento del comportamiento del sector del seguro. Éste, desde una plataforma de tipo fundacional, podría contar con la participación del mercado de seguro directo y reaseguro, tanto nacional como internacional, y por supuesto, la presencia de las entidades CCS y Agroseguro.

15.10.5. En resumen

15.10.5.1. Los datos estadísticos

Analizadas las estadísticas disponibles, se puede concluir en cuanto a cada una de ellas:

Siniestralidad de los ramos No Vida de la DGSFP (1967-2002)

La siniestralidad global de 1967 a 1981 presenta un promedio del 57%, mientras que de 1982 a 2002 se sitúa en el 71% (figura 15.1). Este incremento de la media en más de 10 puntos entre los períodos citados, se ha argumentado por la reducción en el número de entidades operando en el sector que comenzaron a competir de forma feroz, reduciendo las tasas ante un nivel de siniestralidad similar. Sin que quepa descartar definitivamente su influencia, los datos no permiten considerar de forma clara y evidente al cambio climático entre los factores determinantes de esta evolución y, aun menos, discriminar su grado de participación en la misma.

Las indemnizaciones por inundación del CCS (1971-2002)

La tendencia ascendente en la serie para el período analizado (figura 15.3) se ha atribuido al aumento de la penetración del seguro en una sociedad con más cultura aseguradora y al incremento tanto de las exposiciones como de los valores asegurados. Sin poder excluir del todo su incidencia, no se detectan signos claramente identificables de que el cambio climático haya dejado su huella –y en qué medida- en la tendencia que presenta dicho periodo. La fachada mediterránea (principalmente Valencia) y el País Vasco (Vizcaya), concentran un gran porcentaje de la siniestralidad por riesgos climáticos y podrían considerarse como zonas sensibles a las consecuencias de un calentamiento del clima en el futuro.

Base de datos de eventos climáticos y meteorológicos de Munich Re (1980-2003)

Los importes económicos de los eventos recogidos por Munich Re para algo más de dos décadas, se elevan en la segunda mitad del período. Por tanto, de nuevo se sostiene la tendencia al incremento de daños y eventos, expuesta en los dos puntos anteriores. Las provincias costeras del Mediterráneo forman parte de varios escenarios de siniestro, por lo que se perfilan también como la zona más susceptible ante un cambio en los parámetros climáticos y meteorológicos.

Siniestralidad del Seguro Agrario (Agroseguro 1967-2002)

El esquema de seguro agrario ha sido sometido a continuas transformaciones en un afán de compensar resultados y abarcar el mayor número posible de cultivos a través de un variado abanico de modalidades de cobertura. Por tanto, las estadísticas no permiten analizar la siniestralidad de forma homogénea. Sin embargo, la distribución geográfica de la siniestralidad

es la referencia de las zonas que, de ocurrir una desviación significativa de los parámetros climáticos, verán modificada la producción agrícola, en un sentido positivo en unos casos (menor número de heladas y menos intensas), o negativo en otros (incremento del número de tormentas acompañadas de granizo). Así, se seguirá imponiendo una adaptación de las técnicas de cultivo. A grandes rasgos se puede afirmar que la mitad oriental de la península, por elevada peligrosidad de los fenómenos climáticos y meteorológicos, y por la concentración de cultivos sensibles a dichas variables, se confirma como la zona más afectable, con especial incidencia en la provincia de Valencia.

En resumen, no se han detectado indicios claros de los efectos del cambio climático en el sector seguros en España, cuya trayectoria se explica por la permanente evolución del mercado en búsqueda de mejores fórmulas, dejando sentir el efecto del desarrollo socioeconómico característico de cada época. Por ello no es posible comparar las estadísticas anuales ni multianuales de forma homogénea. No obstante, se confirma que la tendencia observada en otros mercados de incremento en el número de eventos catastróficos, su intensidad y su coste económico y asegurado, también está sucediendo en España.

> "La evolución de los siniestros asegurados desde 1970 muestra una clara tendencia a siniestros más elevados. Este aumento se debe, en gran parte, a los cambios demográficos y geográficos. En dicho período se puede comprobar, particularmente en países industrializados, un aumento de los valores asegurados […]. Ante una posible desviación de zonas climáticas causada por el cambio climático, se podría contar con una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de siniestros".

Swiss Re (2004b).

15.10.5.2. El seguro español, presente y futuro

En España, el esquema de aseguramiento de los peligros derivados por un posible cambio climático está consolidado a través del CCS (riesgos de las personas y las cosas) y Agroseguro (riesgos agropecuarios).

El CCS, con una extensa experiencia desde su creación (1954), ha manejado hasta ahora una siniestralidad en un contexto de nivel moderado de peligrosidad de los fenómenos cubiertos. Su excelente gestión administrativa en conjunto con el mercado privado de seguros, y el respaldo en última instancia del Estado, lo configuran como un sistema modelo en el mundo, fundamentado en la solidaridad y mutualización de los riesgos.

Respecto a Agroseguro, constituido en 1980 sobre la base de unos enriquecedores antecedentes de experiencias desde principios de siglo, positivas y negativas, que han servido para diseñar un sistema óptimo y dinámico acorde con una política agraria sostenible y moderna, se enfrenta también en conjunto con el mercado privado de seguros cada año, al difícil reto de adaptar la técnica actuarial a una actividad en franco desarrollo tecnológico.

La permanencia y dilatada experiencia de los esquemas CCS y Agroseguro permite afirmar que el sector del seguro en España está preparado para amortiguar y absorber variaciones de siniestralidad derivadas de un posible cambio climático a corto y medio plazo. Pensando en el largo plazo, y dependiendo del escenario de cambio climático que vaya decantándose, la adecuada compaginación de unas técnicas aseguradoras y unas herramientas financieras ágiles, unidas a un reaseguro internacional atento a los requerimientos de cada momento y a una participación estatal sensible a las necesidades de respaldo que se precisen, puede dar

lugar a soluciones sólidas e imaginativas de aseguramiento a precios asequibles y socialmente soportables.

A modo de esquema, en la figura 15.14 se relaciona de forma cualitativa (A), la sensibilidad de los ramos del seguro que pueden verse afectados por un cambio climático, con cada peligro meteorológico (viento, precipitaciones y temperatura) susceptible de variar sus patrones de ocurrencia. Para estos mismos ramos se relaciona en la gráfica B, también cualitativamente, los intereses asegurados más involucrados en cada uno de ellos.

Fig. 15.14. *Relación cualitativa de la sensibilidad de los ramos del seguro que pueden verse afectados por un cambio climático, con cada peligro meteorológico.*

15.11. BIBLIOGRAFÍA

Agroseguro. 2003. El Seguro combinado en cifras 2002. Memoria anual. www.agroseguro.es.

Beder S. 2001. Insurers sweat over global warming. Engineers Australia. Agosto 2001.

Burgaz F.J. y Pérez-Morales Mª.P. 1996. 1902-1992: 90 años de seguros agrarios en España. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: 557 pp.

Castelo J. y Guardiola A. 1992. Diccionario MAPFRE de Seguros. Fundación Mapfre Estudios. Ed. Mapfre. Madrid. 647 pgs.

CCS-Consorcio de Compensación de Seguros. 2003. Estadística Riesgos Extraordinarios, Serie 1971-2002. Madrid. 148 pgs.

Del Caño F. 1983. Derecho Español de Seguros. Tomo I. Imprenta Sáez. Madrid. 571 pgs.

DGSFP-Dirección General de Seguros y Fondos de Pensiones. 2003. Seguros y Fondos de Pensiones. Informe 2003. Madrid. pgs. 72-163.

IPCC. 2001. www.ipcc.ch/pub/reports.htm

Kron W. 2003. High water and floods: resist them or accept them?. Shadenspiegel 3, Munich Re: p. 27.

Maestro M. 2000. El sonido más temido. Apuntes para una historia del seguro de incendios. Madrid. 230 pgs.

Matthews P.B, Sheffield M.P., Andre J.E., Lafayette J.H., Roethen J.M. y Dobkin E. 1999. Insolvency: will historic trends return? Best's Review – Property / Casualty Edition, March, 59.

Munich Re. 2000. ART Solutions. Central Division. Corporate Communications.

Munich Re. 2004. TOPICS GEO. Annual Review: Natural Catastrophes 2003.

Partner Re. 2004. The reinsurance market 2004: Presentation to ICMIF Meeting of Reinsurance officials.

Sammonds P. 2002. What's floods got to do with it?. Spiked Science.

Swiss Re. 2003. World insurance in 2002: high premium growth in non-life insurance. Sigma 8, Zurich: 40 pgs.

Swiss Re. 2004a. A first glimpse at climate change to come?. www.swissre.com.

Swiss Re. 2004b. Catástrofes de la naturaleza y catástrofes antropógenas en 2003. www.swissre.com.

World Bank. 1999. www.worldbank.org

16. IMPACTOS SOBRE LA SALUD HUMANA

Julio Díaz, Ferrán Ballester y Rogelio López-Vélez

Revisores

E. Alonso, F. Escorza Muñoz, J. I. Elorrieta Pérez de Diego, A. Estrada Peña, I. Galán, J. F. García García, R. García Herrera, M. E. Gómez Campoy, R. Iglesias García, C. Íñiguez, G. López-Abente, R. López Casares, R. Machado Trigo, J. V. Martí Boscà, M. Mayoral Arenas, M. Millán Muñoz, I. J. Mirón Pérez, R. Molina Moreno, J. C. Montero Rubio, J. M. Ordóñez, M. Porta, M. Sáez, A. Tobías Garcés, F. Vargas Marcos

M. Lacasaña

RESUMEN

Las interacciones entre el cambio climático y la salud humana son múltiples y complejas. No obstante con un ánimo sintetizador podrían resumirse en: a) cambios en la morbi-mortalidad en relación con la temperatura; b) Efectos en salud relacionados con eventos meteorológicos extremos (tornados, tormentas, huracanes y precipitaciones extremas); c) Contaminación atmosférica y aumento de los efectos en salud asociados; d) Enfermedades transmitidas po alimentos y el agua y e) Enfermedades transmitidas por vectores infecciosos y por roedores (Patz *et al.* 2000).

La limitación en extensión del capítulo hace que lo que se expone a continuación se relacione con aquellos factores que pensamos pueden tener una repercusión más acusada en nuestro país.

Las temperaturas extremedamente elevadas registradas en Centroeuropa durante el verano de 2003 y en el norte y este de España han puesto de manifiesto la importancia que sobre la morbi-mortalidad presentan las altas temperturas. En este capítulo se analizan los principales impactos de las olas de calor, fundamentalmente, y de frío. Se contemplan los factores socioeconómicos que influyen en estos excesos de mortalidad y se plantean las medidas que deben tenerse en cuenta en los planes de prevención. Se hace hincapié en la necesidad de agilización de los registros de morbi-mortalidad en España y en las políticas necesarias para la minimización del impacto en salud de los eventos térmicos extremos.

La contaminación atmosférica representa un riesgo ambiental con consecuencias perjudiciales para la salud. Este riesgo es conocido desde hace años y es mejor comprendido con las investigaciones llevadas a cabo en los últimos años. Las emisiones a la atmósfera relacionadas con el cambio climático pueden agravar los efectos de la contaminación del aire sobre la salud de los ciudadanos, no solo directamente por el impacto en los fenómenos meteorológicos, sino, de manera inmediata, por los efectos directos de los contaminantes para la salud. Sin embargo, durante demasiados años los esfuerzos en la mayor parte del mundo se han dirigido a tratar estos dos problemas separadamente. De hecho, muy a menudo se considera que los beneficios de la protección del clima sobre la salud se obtendrían a largo plazo. Por el contrario, lo que se ha puesto de manifiesto en los últimos años es que las acciones para reducir las emisiones de gases contaminantes, redundarían en efectos beneficiosos a corto plazo debido a la reducción del impacto de los contaminantes atmosféricas sobre la salud de los ciudadanos. En el capítulo dedicado a la contaminación atmosférica se exponen sus fuentes y contaminantes principales, se revisan los resultados de estudios epidemiológicos y toxicológicos realizados en España y en el ámbito internacional y se presentan los posibles riesgos de los contaminantes más relacionados con los cambios climáticos, como el ozono o las partículas finas. Teniendo en cuenta las incertidumbres y desconocimientos actuales sobre el tema, se plantean las principales implicaciones para las políticas en España, así como las necesidades de investigación relacionadas con el posible impacto en salud del cambio climático. En este sentido, tanto desde el punto de vista de la vigilancia como de la investigación se considera necesario el establecimiento de un sistema de vigilancia epidemiológica de los efectos de la contaminación atmosférica.

Por la proximidad con el continente africano, siendo lugar de tránsito obligado de aves migratorias y personas, y por las condiciones climáticas, cercanas a las de zonas donde hay transmisión de enfermedades vectoriales, España es un país en el que este tipo de enfermedades podrían verse potenciadas por el cambio climático. El posible riesgo vendría por extensión geográfica de vectores ya establecidos o por la importación e instalación de vectores sub-tropicales adaptados a sobrevivir en climas menos cálidos y más secos. Hipotéticamente, las enfermedades vectoriales susceptibles de ser influidas por el cambio climático en España

serían aquellas transmitidas por dípteros como dengue, encefalitis del Nilo occidental, fiebre del valle del Rift, malaria y leishmaniosis; las transmitidas por garrapatas como la fiebre de Congo Crimea, encefalitis por garrapata, enfermedad de Lyme, fiebre botonosa y fiebre recurrente endémica; y las transmitidas por roedores. Pero la mayor y más factible amenaza sería la instauración del mosquito *Aedes albopictus*, que sería capaz de transmitir enfermedades virales como la del Nilo occidental o el dengue. Pero para el establecimiento de auténticas áreas de endemia se necesitaría la conjunción de otros factores, tales como el aflujo masivo y simultáneo de reservorios animales o humanos y el deterioro de las condiciones socio-sanitarias y de los servicios de Salud Pública.

16.1. INTRODUCCIÓN

16.1.1. Temperaturas extremas

16.1.1.1. Relación entre la temperatura y la morbi-mortalidad

Es conocido que la morbi-mortalidad presenta una dinámica estacional caracterizada por la aparición de un máximo invernal y un pico estival de menor amplitud, aunque a veces más intenso desde el punto de vista de sus efectos en salud que el propio exceso de morbi-mortalidad invernal (Mackenbach *et al.* 1992, Alderson 1985). El resultado de numerosas investigaciones indica que la relación entre la temperatura y la morbi-mortalidad suele tener forma de "U" o de "V" con una temperatura de mínima incidencia que varía de unos lugares a otros (Kunst *et al.* 1993, Sáez *et al.* 1995, Ballester *et al.* 1997, Alberdi *et al.* 1998) y que depende, probablemente, de la adaptación de la población al rango de temperaturas a las que se encuentra expuesta (Curreiro *et al.* 2002, García-Herrera *et al.* 2004). La sobremortalidad invernal se explica principalmente por las enfermedades respiratorias y circulatorias, mientras que son estas últimas las más relacionadas con el aumento de mortalidad estival (Alberdi y Díaz 1997). Los grupos de mas edad son los que más contribuyen a estos excesos de morbi-mortalidad (Alberdi *et al.* 1998, Ballester *et al.* 2003a). En cuanto a la distribución temporal, el efecto del calor ocurre a corto plazo (1-3 días), mientras que el del frío suele ocurrir entre una y dos semanas después del extremo térmico (Alberdi *et al.* 1998, Braga *et al.* 2001), lo que es coherente con los mecanismos biológicos que subyacen (Huynen *et al.* 2001, Havenit 2002). A modo de ejemplo indicar que la mortalidad media diaria por todas las causas excepto accidentes (CIE IX 1-799) registradas en la Comunidad de Madrid de 1986 a 1992, frente a la temperatura máxima diaria, presenta una relación en forma de "V" con una temperatura máxima diaria de mínima mortalidad en 30,8 ºC (Díaz y López 2003).

16.1.1.2. Definición de ola de calor y de frío

Desde el punto de vista de los efectos en salud, no existe un criterio uniforme para la definición de ola de calor (W.H.O 2004) y de frío. En el caso del calor algunos autores definen extremos mediante un umbral en función de la temperatura del aire tanto máxima como mínima o media diaria, de un día o varios, otros autores utilizan índices (temperatura aparente, etc.) que tienen en cuenta la humedad relativa del aire (Nakai *et al.* 1999, Smoyer 1998, Jendritzky *et al.* 2000) o las situaciones meteorológicas a escala sinóptica (Kalkstein 1991).

Diversos trabajos realizados recientemente en la Península Ibérica muestran la existencia de una temperatura máxima diaria a partir de la cual se observa un incremento acusado de la mortalidad. Para el caso de Madrid esta temperatura máxima diaria de "disparo de la mortalidad" es de 36,5 ºC (Díaz *et al.* 2002a), 41ºC para Sevilla (Díaz *et al.* 2002b), 33,5 ºC para Lisboa (García-Herrera *et al.* 2004) (figura 16.1) y 30,3 ºC para Barcelona. En todos estos lugares esta temperatura coincide con el percentil 95 de las series de temperaturas máximas diarias durante el periodo de verano (junio-septiembre) desde 1991 a 2002. Puesto que un solo día con temperatura superior a este valor de disparo ya tiene efecto significativo sobre la mortalidad, se propone definir como ola de calor aquel periodo en que la temperatura máxima diaria supere el percentil 95 de las series de temperaturas máximas diarias en el periodo junio-septiembre. La duración de la ola de calor vendrá marcada por el número de días consecutivos que se supere dicho umbral.

En el caso del frío se observa un comportamiento análogo al del calor pero agravado por el hecho de que el efecto del frío es mucho menos intenso y a más largo plazo, por lo que resulta más complicado establecer la relación causa-efecto (Braga *et al.* 2001). No obstante, existe una temperatura máxima diaria por debajo de la cual se dispara la mortalidad. Para el caso de Madrid, esta temperatura máxima diaria, próxima a los 6 ºC, coincide con el percentil 5 de las

series de temperaturas máximas diarias durante el periodo invernal (noviembre-marzo) (Díaz et al. 2004a).

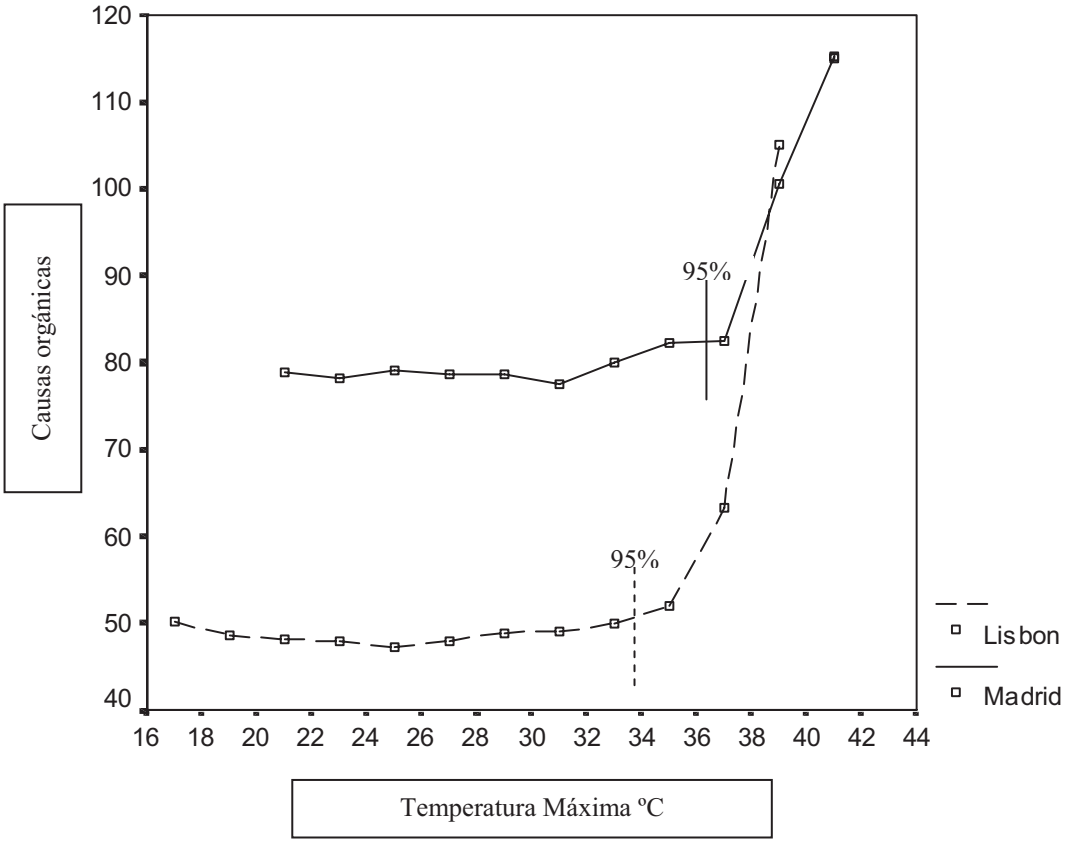


Fig. 16.1. *Temperatua de disparo de la mortalidad para las ciudades de Madrid y Lisboa. Se marca la temperatura umbral del 95 % de las series de temperaturas máximas diarias en el periodo junio-septiembre.*

Es decir, existe una asociación entre la mortalidad y la temperatura que se exacerba en los casos de extremos térmicos, olas de frío o de calor. De hecho cuando la temperatura máxima está por encima del percentil 95 o por debajo del percentil 5 la magnitud del impacto se hace mayor.

16.1.2. Contaminación atmosférica

16.1.2.1. Contaminación atmosférica y salud humana

Por *contaminación atmosférica* se entiende la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgos, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. En el campo de la salud pública la contaminación atmosférica es un fenómeno conocido y estudiado desde antiguo que en el mundo contemporáneo cobra una gran importancia a partir de una serie de episodios que tuvieron lugar en los países industrializados durante la primera mitad del siglo XX (Ware *et al.* 1981).

En los últimos años, un número importante de estudios realizados en distintas ciudades han encontrado que, aún por debajo de los niveles de calidad del aire considerados como seguros, los incrementos de los niveles de la contaminación atmosférica se asocian con efectos nocivos sobre la salud. Un estudio llevado a cabo en Francia, Suiza y Austria, indica que el 6% de la

mortalidad y un número muy importante de nuevos casos de enfermedades respiratorias en estos países puede ser atribuido a la contaminación atmosférica. La mitad de este impacto es debido a la contaminación emitida por los vehículos a motor (Künzli *et al.* 2000).

La Organización Mundial de la Salud considera la contaminación atmosférica como una de las más importantes prioridades mundiales en salud (OMS 2003). En un reciente informe se ha estimado que la contaminación atmosférica es responsable de 1,4% de todas las muertes en el mundo (Cohen *et al.* 2003). Por otro lado, aumenta la preocupación sobre los posibles riesgos de agentes para los que no existe una evaluación satisfactoria, como los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP). En definitiva, importantes sectores de la población se encuentran expuestos a contaminantes atmosféricos con posibles repercusiones negativas sobre su salud.

16.1.2.2. Contaminantes atmosféricos y sus fuentes

Los contaminantes atmosféricos, normalmente medidos en la atmósfera urbana, provienen de fuentes móviles (tráfico rodado) y de fuentes fijas de combustión (industrias, calefacción y procesos de eliminación de residuos). Se distingue entre contaminantes primarios y secundarios. Los primeros son los que proceden directamente de la fuente de emisión. Los contaminantes secundarios se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y físicas que sufren los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera, distinguiéndose sobre todo, la contaminación fotoquímica y la acidificación del medio. Las características de los principales contaminantes químicos y sus fuentes más importantes se resumen en la tabla 16.1.

Tabla 16.1. *Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos.*

Contaminante	Formación	Estado físico	Fuentes
Partículas en suspensión (PM): PM_{10}, Humos negros.	Primaria y secundaria	Sólido, líquido	Vehículos Procesos industriales Humo del tabaco
Dióxido de azufre (SO_2)	Primaria	Gas	Procesos industriales Vehículos
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	Primaria y secundaria	Gas	Vehículos Estufas y cocinas de gas
Monóxido de carbono (CO)	Primaria	Gas	Vehículos Humo de tabaco Combustiones en interiores
Compuestos orgánicos volátiles (VOCs)	Primaria, secundaria	Gas	Vehículos, industria, humo del tabaco Combustiones en interiores
Plomo (Pb)	Primaria	Sólido (partículas finas)	Vehículos, industria
Ozono (O_3)	Secundaria	Gas	Vehículos (secundario a foto-oxidación de NO_x y compuestos orgánicos volátiles)

PM10: partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 10 µm; NO_x: óxidos de nitrógeno

16.1.2.3. Estudios de los efectos en salud ocasionados por la contaminación atmosférica

La interpretación de las reacciones que produce la contaminación atmosférica en la salud humana se fundamenta en estudios de dos clases, toxicológicos y epidemiológicos que se consideran complementarios.

Uno de los diseños epidemiológicos más utilizados es el de *series temporales*. En estos estudios se analizan las variaciones en el tiempo de la exposición y el indicador de salud en una población (número de defunciones, ingresos hospitalarios, etc.). Al analizar a la misma población en diferentes periodos de tiempo (día a día, generalmente) muchas de aquellas

variables que pueden actuar como factores de confusión individualmente (hábito tabáquico, edad, género, ocupación, etc.) se mantienen estables en la misma población y pierden su potencial confusor (Schwartz *et al.* 1996).

En los últimos años se han llevado a cabo diversos proyectos multicéntricos utilizando criterios de análisis estandarizados para el estudio de diferentes aspectos de la relación contaminación atmosférica-salud. En Europa, el proyecto APHEA (Air Pollution and Health: an European Assessment) (Katsouyanni *et al.* 1996) y en Estados Unidos el estudio NMMAPS (Nacional Mortality and Morbidity Air Pollution Study) (Samet *et al.* 2000a; 2000b) se encuentran entre los que han aportado más al conocimiento del impacto agudo de la contaminación en la salud. En Francia (Quenel *et al.* 1999), Italia (Biggeri *et al.* 2001) se han llevado estudios multicéntricos nacionales que han valorado el impacto de la contaminación teniendo en cuanta las características ambientales, sanitarias y sociales. En España el proyecto EMECAS está llevando a cabo un estudio sobre el impacto de la contaminación atmosférica que incluye a 16 ciudades (EMECAM 1999, Sáez *et al.* 2002, Ballester *et al.* 2003b).

Aunque en menor número que los estudios de series temporales, existen varios *estudios de cohortes* sobre el impacto de la contaminación en la salud. El más importante es el realizado por Pope y colaboradores como parte del Estudio II para la Prevención del Cáncer. En total se recogieron datos sobre factores de riesgo y contaminación atmosférica para unos 500 000 adultos de 151 áreas metropolitanas de los Estados Unidos desde 1982. En marzo de 2002 se han publicado los resultados del seguimiento hasta el año 1998 de dicha cohorte (Pope *et al.* 2002). Las partículas finas (PM2.5) y los óxidos de azufre mostraron una asociación con la mortalidad por todas las causas, por causas del aparato circulatorio y por cáncer de pulmón. Cada aumento de 10 $\mu g/m^3$ en los niveles atmosféricos de partículas finas se asoció con aproximadamente un aumento de un 4%, 6%, y 8% del riesgo de morir por todas las causas, por causas del aparato circulatorio y por cáncer de pulmón, respectivamente.

16.1.2.4. Efectos de la contaminación tipo 'verano' ('summer smog'). Impacto del ozono sobre la salud

La contaminación tipo 'verano' se refiere principalmente a la contaminación fotoquímica procedente de las reacciones de los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno, estimuladas por la luz solar intensa. El *ozono* es considerado generalmente como el componente más tóxico de esta mezcla. El ozono se forma por la acción de la radiación de ultravioleta del sol sobre el NO_2. En presencia de compuestos orgánicos volátiles, CO y metano se favorece la formación de altas concentraciones de ozono.

Estudios recientes han descrito un número importante de efectos adversos del ozono, siendo los más importantes los relacionados con efectos en el sistema respiratorio, como disminución de la función pulmonar (Galizia y Kinney 1999, Gauderman *et al.* 2002), agravamiento del asma (Gauderman *et al.* 2002, McConell *et al.* 1999), aumento de riesgo de visitas a urgencias (Tenias *et al.* 2002) y de ingresos hospitalarios (Anderson *et al.* 1997, Sunyer *et al.* 1997), y, probablemente, un aumento de riesgo de morir. (Burnett *et al.* 2001, Goldberg *et al.* 2001) . Por otro lado, existen algunas evidencias de que los individuos, especialmente los jóvenes, con hiperreactividad de vías aereas, como los asmáticos constituyen un grupo más sensible a los efectos del ozono.

16.1.2.5. Aeroalergenos y salud respiratoria

Se ha descrito en un número importante de estudios que las altas concentraciones de polen y esporas se asocian con epidemias de asma y de otras enfermedades alérgicas como la rinitis o la fiebre del heno. En un estudio reciente en Madrid (Tobías *et al.* 2003) se ha determinado

una asociación significativa entre los incrementos de polen de Poacea y *Plantago* del percentil 95 al 99 con un incremento en el número de visitas a Urgencias hospitalarias por asma del 17% y del 16% respectivamente. También se ha encontrado una aasociación con el polen de urticáceas, con un 8,5% de incremento en el número de urgencias por asma. Sin embargo, no está claramente definido el papel de los aeroalergénos en el inicio del asma, e incluso en la exacerbación de esta enfermedad por lo que se requiere más investigación antes de poder establecer posibles impactos del cambio climático.

16.1.3. Enfermedades infecciosas

La emergencia o reemergencia de la mayor parte de enfermedades infecciosas está condicionada por cambios evolutivos y medioambientales que pueden afectar a una gran variedad de factores intrínsecos y extrínsecos. Entre los primeros se encuentra todo lo concerniente a la interacción entre el patógeno y su vector, su hospedador intermediario y su reservorio (infección, virulencia, inmunidad y transmisibilidad). Entre los segundos se agrupan todos los factores que modulan las relaciones del patógeno, vector y hospedador/es con las condiciones medioambientales (clima, condiciones meteorológicas, hábitats, ecosistemas, urbanización, contaminación).

Los cambios climáticos en concreto parecen influir sobre la distribución temporal y espacial así como sobre la dinámica estacional e interanual de patógenos, vectores, hospedadores y reservorios. El fenómeno de “El Niño/oscilación austral” (ENOA) es el ejemplo más conocido de variabilidad climática natural y se asocia a un aumento del riesgo epidemiológico de ciertas enfermedades transmitidas por mosquitos, sobre todo de la malaria. Se ha observado que durante el fenómeno de El Niño aumentan en un 30% los casos de malaria en Venezuela y Colombia, los casos se multiplican por cuatro en Sri Lanka y aparecen en el norte de Pakistán. Se han registrado incrementos de casos de dengue en las islas del Pacífico, sureste de Asia y Sudamérica. También aumentan los casos de encefalitis del valle de Murray y enfermedad por el virus del río Ross en Australia, así como los casos de fiebre del Valle del Rift en África del este (Kovats 2000; Kovats *et al.* 2003a). La incidencia de leishmaniosis visceral aumentó en un 39% y 33% en 1989 y 1995 respectivamente tras las oscilaciones climáticas de El Niño en el estado de Bahía (Brasil) (Franke *et al.* 2002).

Muy ilustrativo es lo que ocurrió en California durante el verano de 1984: coincidiendo con un exceso de lluvias y de un invierno más cálido durante los meses de enero-febrero, al que siguió una sequía y altas temperaturas (que alcanzaron los 30ºC) en julio se produjo un brote de encefalitis de San Luis asociado a una proliferación de mosquitos del género *Culex* (Monath y Tsai 1987) (este tipo de climas, con inviernos lluviosos y cálidos, seguidos de veranos calurosos y secos se asemejan a las predicciones de cambio en España). Y más recientemente, la introducción por aves migratorias de la encefalitis del Nilo Occidental (West Nile) en Nueva York y su posterior diseminación a gran parte de EE.UU. nos demuestra cómo enfermedades inesperadas pueden emerger.

16.2. SENSIBILIDAD AL CLIMA ACTUAL

16.2.1. Temperaturas extremas

16.2.1.1. Diferentes umbrales por capitales de provincia para las olas de calor y de frío

Comprobada la asociación entre la temperatura máxima diaria y los excesos de mortalidad por frío y calor descritos anteriormente, se puede calcular, a partir de los registros de temperaturas de las estaciones meteorológicas de cada lugar, las diferentes temperaturas umbrales a partir de las cuales se producen los excesos de mortalidad. En la figura 16.2 se muestra estos umbrales según diferentes capitales de provincia que permiten definir las olas de calor. En el

caso del calor estos valores oscilan entre los 26,2 ºC de A Coruña y los 41,2 ºC de temperatura máxima diaria para Córdoba y en el del frío entre los 2,7 ºC de máxima diaria en Ávila y los 15ºC de Alicante.

Estos diferentes umbrales fisiológicos de adaptación indican que la mínima mortalidad ocurre a temperaturas más elevadas en las regiones más templadas (Curriero et al. 2002) con un mayor impacto del calor en las latitudes frías y un menor impacto en las más templadas (Davids *et al.* 2002).

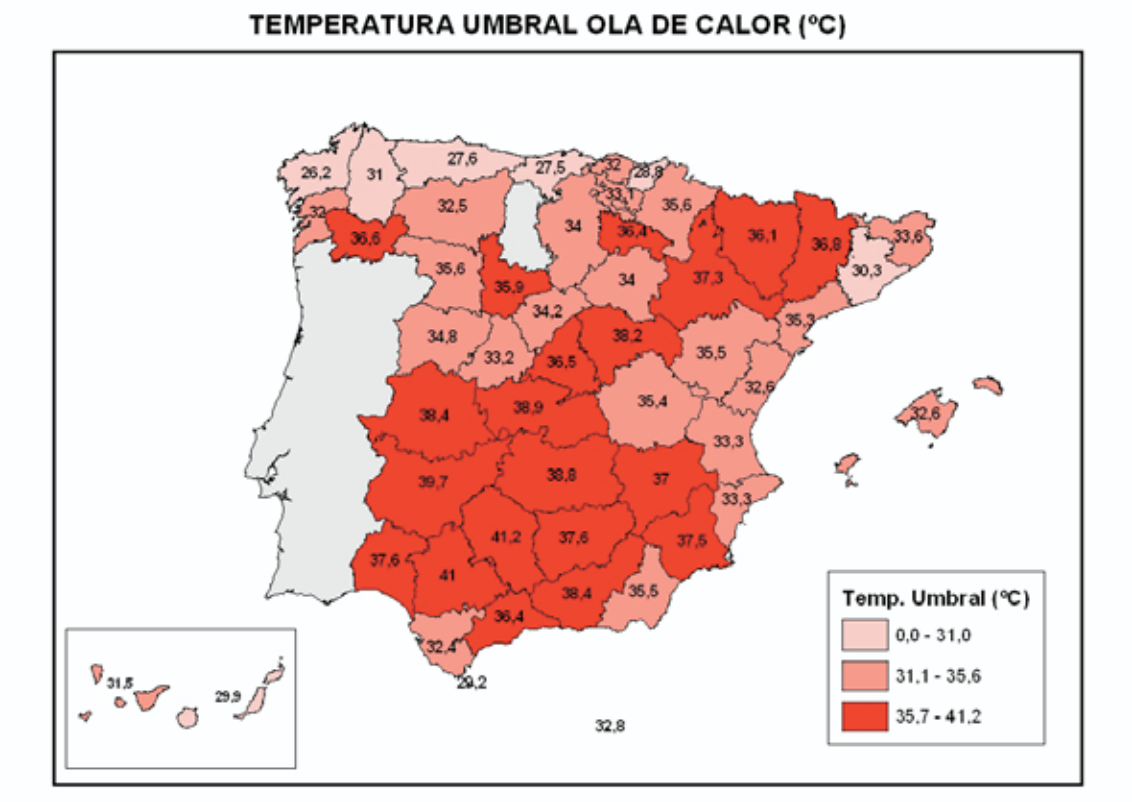


Fig. 16.2.*Temperaturas umbrales de definición de ola de calor en función del percentil 95 de las series de temperaturas máximas diarias en el periodo junio-septiembre.*

16.2.1.2. Definición de un índice para caracterizar la intensidad de las olas de calor y de frío

Atendiendo a los criterios de que es necesario conjugar no sólo los excesos (defectos) de temperatura máxima diaria respecto a los umbrales anteriormente establecidos, si no también los días de duración, se puede definir un índice para caracterizar la intensidad de las olas de calor (IOC) y de frío (IOF) como se indica a continuación:

Calor:

$$IOC = \left(T_{max} - T_{umbral}\right) \; si \;\; T_{max} > T_{umbral}$$

$$IOC = 0 \qquad\qquad si \;\; T_{max} < T_{umbral}$$

Frío:

$$IOF = \left(T_{umbral} - T_{max}\right) \; si \;\; T_{max} < T_{umbral}$$

$$IOF = 0 \qquad\qquad si \;\; T_{max} > T_{umbral}$$

En las expresiones anteriores el sumatorio se extiende al periodo de tiempo que quiera caracterizarse a través del índice.

16.2.2. Contaminación atmósferica

16.2.2.1. Sensibilidad a la contaminación atmosférica

Es necesario reconocer que existe aún incertidumbres acerca de la sensibilidad (es decir, la tasa de cambio en la variable resultado por unidad de cambio en la variable exposición) de la asociación entre contaminantes atmosféricos. Sin embargo se conoce bien que los efectos de la exposición a contaminación atmosférica son múltiples y de diferente severidad, siendo los sistemas respiratorio y cardiocirculatorio los más afectados. Estos efectos mantienen una gradación tanto en la gravedad de sus consecuencias como en la población a riesgo afectada (Figura 16.3). Las partículas han sido el grupo más ampliamente estudiado (Tabla 16.2).

Tabla 16.2. *Resumen de los efectos descritos para las exposiciones a partículas Cambio porcentual en indicador de salud por incremento en la concentración de partículas.*

	Exposición aguda	**Exposición crónica**
Efectos	**Incremento: 10μg/m^3 de PM_{10}**	**Incremento: 5μg/m^3 de $PM_{2.5}$**
Incremento Mortalidad*	*(Estudios ecológicos, series temporales)	*(Estudios de cohortes)
Causas		
- Todas excepto las externas	0,2[a] - 0,6[b,c] - 1,0	2[i] - 3
- Cardiovasculares	0,7[c,d] to 1,4	3[i] - 6
- Respiratorias	1,3[c] to 3,4	
- Cáncer de pulmón		4[i]
Incremento ingresos hospitalarios		
- Todas las respiratorias	0,8 to 2,4[e]	
- EPOC	1,0[f] to 2,5	
- Asma	1,1[f] to 1,9	
- Cardiovasculares	0,5[g] to 1,2[h]	
Enfermedad: bronquitis		7
Disminución función pulmonar (VEF_1)		
- Niños	0,15	1
- Adultos	0,08	1,5

Adaptado de Pope y Dockery (1999), con adición de resultados de estudios multicéntricos recientes: a: Dominici *et al.* (2002); b: Katsouyanni *et al.* (2001); c: Stieb *et al.* (2002); d: Samet *et al.* (2000a); e: Biggeri *et al.* (2001), f: Atkinson *et al.* (2001b), g: Le Tertre et al. (2002), h: Samet *et al.* (2000c), i: Pope *et al.* (2002).

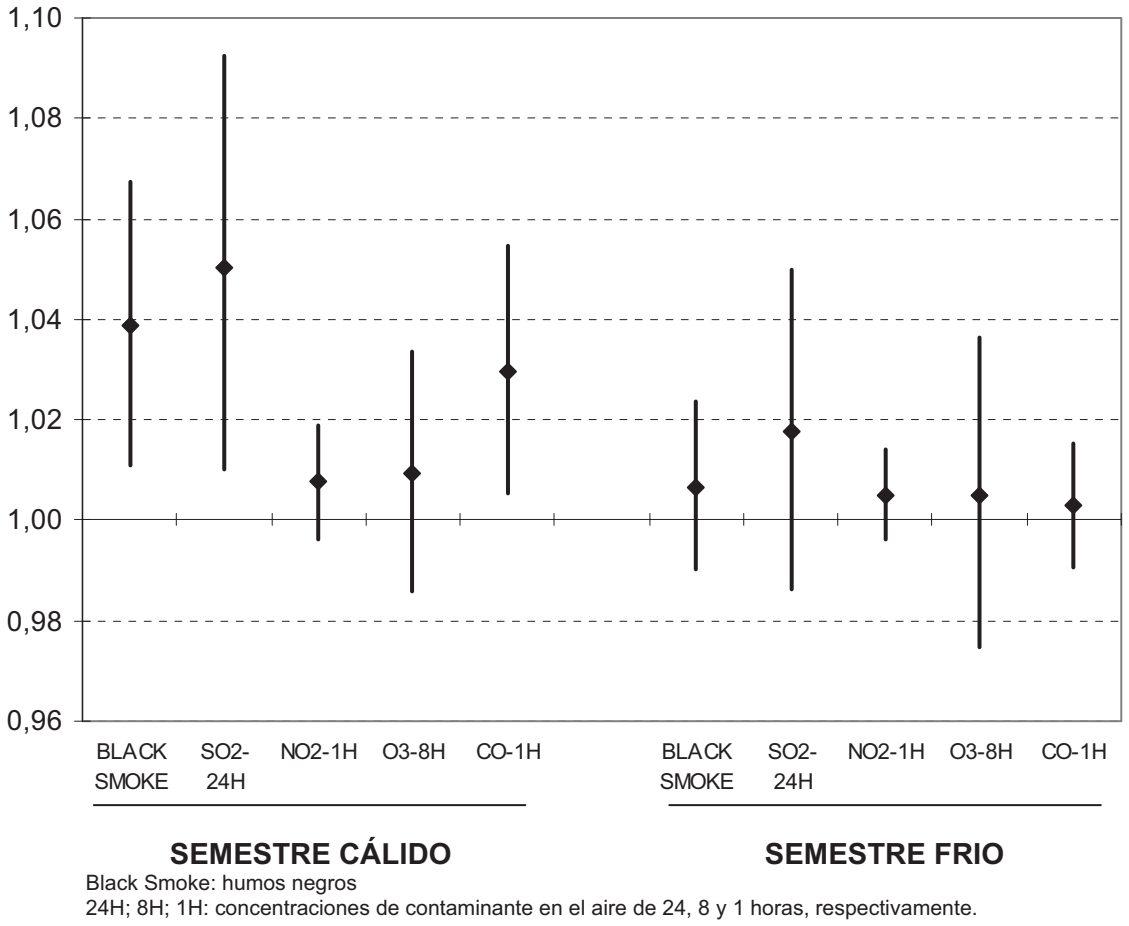


Fig. 16.3. *Asociación entre contaminación atmosférica e ingresos urgentes diarios por enfermedades cardiovasculares. Análisis por semestres. Valencia 1994-1996. Los resultados se expresan como el riesgo relativo (y su intervalo de confianza al 95%) por un incremento en 10 µg/m^3 (1 mg/m^3 para el CO) en los niveles diarios del contaminante correspondiente. Fuente: Ballester et al. 2001.*

En España los resultados del análisis conjunto con los datos disponibles en 13 ciudades del proyecto EMECAS indican que un incremento de 10 µg/m^3 en los niveles de humos negros se asociaron con un aumento de 0,8% en el número de defunciones diarias. También se ha encontrado una asociación significativa entre la mortalidad y el resto de contaminantes. Para los grupos de causas específicas la magnitud de la asociación fue mayor, especialmente para las enfermedades respiratorias (Ballester *et al.* 2003a). Con datos de 3 ciudades, el ozono únicamente mostró asociación con la mortalidad cardiovascular y en el semestre cálido (Sáez *et al.* 2002).

Por último, y desde el punto de vista de la salud pública, es importante destacar que, aunque la magnitud del impacto en salud es de pequeña magnitud, la proporción atribuible del impacto a la contaminación es importante dado que toda la población está expuesta. Además, junto a los anteriores efectos demostrados es importante considerar el impacto potencial de las exposiciones a la contaminación atmosférica durante la gestación y la primera infancia, como muestran algunos estudios. Una reciente revisión sobre el tema (Lacasaña *et al.* 2005) se muestra resultados que indican de una asociación entre entre la exposición a la contaminación atmosférica con el bajo peso al nacer y retraso en el crecimiento intrauterino, así como el impacto de las exposiciones tempranas sobre la salud infantil, incluyendo incremento de mortalidad. Coincidiendo con la Cumbre Interministerial de Budapest de junio de 2004 se ha presentado un Informe con la evaluación de la carga en salud infantil de determinadas exposiciones ambientales en Europa (Valent *et al.* 2004). Los resultados de dicho informe

indican que, entre los niños europeos de 0 a 4 años entre el 1.8% al 6.4% de todas las muertes serían atribuibles a la contaminación atmosférica en exteriores, y el 4,6% a la exposición a aire contaminado en el interior de los edificios. La persistencia de situaciones de mala calidad del aire, o su posible empeoramiento, puede representar un compromiso para la salud de los más pequeños y las generaciones futuras.

16.2.2.2. Factores modificadores de efecto del impacto de las variaciones del clima y la contaminación atmosférica

Al interpretar los estudios que examinan la relación entre contaminación atmosférica y salud hay tener en cuenta varios factores que pueden confundir el estudio de su asociacón con indicadores de salud. Estos factores son los siguientes: a) los determinados por los ciclos geofísicos, b) los meteorológicos y c) los socioculturales, como por ejemplo el patrón de vida determinado por la semana. Además, habría que considerar aquellas enfermedades con comportamiento estacional como la gripe.

Por otro lado, se ha observado un mayor efecto de algunos de los contaminantes atmosféricos durante los meses más cálidos. Así se ha descrito para la asociación del SO_2 (Ballester *et al.* 1996, Michelozzi *et al.* 1998) ; y las partículas (Biggeri *et al.* 2001, Ballester *et al.* 2001) sobre la mortalidad y la morbilidad cardiovascular (Figura 16.3). En el estudio APHEA 2 (Katsouyanni *et al.* 2001) se encontró que, tanto la temperatura media anual, como la ubicación de la ciudad en Europa (Norte, Sur, Este), es decir, componentes relacionados con el clima jugaban un papel modificador del efecto de la contaminación con la mortalidad.

El efecto de las partículas sobre la mortalidad fue mayor en las ciudades de clima más cálido.
Se han sugerido diversas hipótesis para explicar estos hallazgos. Por un lado, la medida de la contaminación atmosférica durante los meses cálidos podría ser un indicador más aproximado de la exposición total de la población, ya que la gente pasa más tiempo en la calle y las ventanas están más tiempo abiertas (Katsouyanni 1995). Por otro lado, en los meses cálidos podría aumentar la susceptibilidad individual a la contaminación, debido a procesos como el aumento del efecto de las partículas sobre el sistema de regulación de la viscosidad plasmática (Pekkanen *et al.* 2000). Otra razón adicional que también se ha sugerido es que podría haber una emigración selectiva de la población en las ciudades durante el periodo estival, con mayor permanencia de las personas de más edad en las ciudades (Biggeri *et al.* 2001).

Diversos estudios han descrito un efecto mayor del ozono durante los días de temperatura más alta (Sartor *et al.* 1995) o en los meses más calurosos, (Sunyer *et al.* 1996; Touloumi *et al.* 1997). En el estudio EMECAS se ha descrito un efecto del ozono sobre el número de ingresos de enfermedades circulatorias que es significativo en los meses cálidos pero no en el resto del año (proyecto EMECAS, en revisión).

16.2.3. Enfemedades infecciosas

Cambios de temperatura, precipitaciones o humedad afectan a la biología y ecología de los vectores, así como a la de los hospedadores intermediarios o la de los reservorios naturales (Githeko *et al.* 2000). Además, las formas de asentamiento humano también podrían influir: el dengue es una enfermedad básicamente urbana y tendrá mayor incidencia en las comunidades muy urbanizadas con un sistema deficiente de eliminación de aguas residuales y desechos sólidos.

Clásicamente, una de las expresiones matemáticas más utilizadas, inicialmente por los malariologos, para cuantificar la capacidad vectorial C de un artrópodo se ha definido como

sigue: C= $\frac{ma^2p^n}{-\log_e p}$, donde **m** es la densidad del artrópodo vector por humano, **a** la tasa diaria de picaduras sobre un hospedador vertebrado multiplicado por la probabilidad de que ese vertebrado sea un humano, **p** la tasa de supervivencia diaria de un vector y **n** el periodo latente del patógeno en el artrópodo vector (incubación extrínseca).

16.2.3.1. Efectos de la temperatura

La temperatura es un factor crítico del que depende tanto la densidad vectorial como la capacidad vectorial: aumenta o disminuye la supervivencia del vector, condiciona la tasa de crecimiento de la población de vectores, cambia la susceptibilidad del vector a los patógenos, modifica el período de incubación extrínseca del patógeno en el vector y cambia la actividad y el patrón de la transmisión estacional.

Al aumentar la temperatura del agua, las larvas de los mosquitos tardan menos tiempo en madurar y, en consecuencia, se aumenta el número de crías durante la estación de transmisión. Se acorta el período de metamorfosis huevo-adulto, reduciéndose el tamaño de las larvas y generándose adultos en un tiempo más corto, pero estos son más pequeños, por lo que las hembras tienen que tomar sangre con más frecuencia para llegar a poner huevos, lo que resulta en un aumento de la tasa de inoculación. El período de incubación extrínseco (tiempo que tarda el artrópodo desde que se infecta hasta que es infectante) guarda una relación directa con la temperatura: a mayor temperatura el tiempo es menor.

Muy probablemente, el efecto del cambio climático sobre las enfermedades transmitidas por artrópodos se observará al variarse los límites de temperatura de transmisibilidad: 14-18ºC como límite inferior y 35-40ºC como superior. Un mínimo aumento del límite inferior podría dar lugar a la transmisión de enfermedades, mientras que un incremento del superior podría suprimirlo (por encima de los 34ºC se acorta sustancialmente la vida del mosquito). Sin embargo, en torno a los 30-32ºC la capacidad vectorial puede modificarse sustancialmente, ya que pequeños incrementos de temperatura acortan el período de incubación extrínseca, aumentándose la transmisibilidad.

El clima influye de forma decisiva sobre la fenología de una gran parte de artrópodos que incluso entran en letargo (diapausa) en la estación desfavorable, comportamiento este muy generalizado en las especies de la región Paleártica. El periodo de actividad estacional de muchas especies puede ampliarse cuanto más se prolonguen las condiciones climáticas favorables.

16.2.3.2. Efectos de la pluviosidad

Un aumento de las precipitaciones podría aumentar el número y la calidad de los criaderos de vectores y la densidad de vegetación que proporcionaría ecosistemas donde posarse, donde mejor vivir al abrigo y con más alimento los roedores hospedadores intermediarios. Las inundaciones, por el contrario, eliminarían el hábitat de vectores y vertebrados, pero obligarían a los vertebrados a un contacto mas estrecho con los humanos. Las sequías en lugares húmedos enlentecerían los cursos de los ríos, creándose remansos que también aumentarían los sitios de cría y propiciarían a una mayor deshidratación del vector, lo que le obligaría a alimentarse más frecuentemente, en otras palabras, a aumentar el número de picaduras.

16.2.3.3. Otros factores

La urbanización incrementa la densidad de hospedadores humanos susceptibles, con peores condiciones de higiene en los países pobres, lo que aumenta la tasa de transmisibilidad para el mismo número de vectores. Además, el desarrollo urbano en los extrarradios cercanos a zonas rurales o boscosas puede dar lugar a un aumento de contacto entre el hombre, vectores y reservorios selváticos.

La deforestación permite la entrada de humanos en el bosque y reconvierte la superficie en terreno agrícola, lo que aumenta el número de posibles criaderos de vectores y el contacto del hombre con reservorios y vectores.

Los planes de irrigación y abastecimiento de aguas incrementan la superficie acuática y previenen inundaciones y sequías, lo que también aumenta los criaderos de vectores.

Los planes de intensificación agrícola aumentan la erosión del terreno, la superficie de agua y reducen la biodiversidad, con lo que se pueden reducir los predadores de vectores y aumentar los lugares de cría vectorial.

La contaminación química por fertilizantes, pesticidas, herbicidas y residuos industriales pueden disminuir el sistema inmune humano, haciéndolos más susceptibles a las infecciones.

El incremento del comercio internacional puede acarrear la importación de vectores desde lugares remotos.

Los movimientos de poblaciones por razones de turismo, trabajo o inmigración traen la importación de enfermedades desde zonas endémicas.

16.3. IMPACTOS PREVISIBLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

16.3.1. Temperaturas extremas

Es claro que los extremos térmicos asociados al cambio climático van a tener un efecto directo sobre la morbi-mortalidad. En el caso de las olas de calor este impacto se va a traducir en un aumento de la morbi-mortalidad asociada con estos eventos extremos (Díaz *et al.* 2002a, Smoyer 1998). Ya que las previsiones apuntan hacia un aumento en intensidad y en frecuencia de aparición de las olas de calor, especialmente en los primeros meses del verano (Hulme *et al.* 2002). A modo de ejemplo recordar que la ola de calor en Francia del 1 al 20 de agosto de 2003 provocó un exceso de mortalidad respecto al mismo periodo de años anteriores de 14800 personas. En Italia se estimó un incremento de 4175 defunciones en el grupo de mayores de 65 años entre el 15 de julio y el 15 de agosto. En Portugal ente el 31 de julio y el 12 de agosto se estimó un exceso de mortalidad respecto al año anterior de 1316 personas. En Gran Bretaña este incremento fue de 2045 personas entre el 4 y el 13 de agosto (Pirard 2003). En España, según datos no oficiales, se ha producido un exceso de mortalidad de más de 6000 personas respecto al mismo periodo del año anterior (W.H.O. 2004, Martínez *et al.* 2004).

16.3.1.1. Modelos predictivos para la mortalidad en función de la temperatura

Independientemente de los datos de este último verano, estudios realizados mediante análisis de series temporales de la mortalidad y su relación con la temperatura para el caso de diversas ciudades permiten cuantificar el impacto de los extremos térmicos por cada grado en el que la temperatura máxima diaria supera el umbral de cada una de ellas. Así se han realizado estudios para el caso de la mortalidad asociada a las olas de calor para las ciudades de Madrid

(Díaz *et al.* 2002a), Sevilla (Díaz *et al.* 2002b) y Lisboa (García-Herrera *et al.* 2004) A modo de ejemplo en la tabla 16.3 se muestra el incremento de la mortalidad en mayores de 65 años asociada a cada grado en el que la temperatura máxima supere la temperatura umbral para Madrid de 36,5 ºC.

Tabla 16.3. *Porcentaje de incremento de la mortalidad por diversas causas y grupos de edad y sexo en la Ciudad de Madrid, por cada grado que la temperatura máxima diaria supera los 36,5 ºC.*

Causas de mortalidad	Hombres 65-74	Mujeres 65-74	Hombres >75 años	Mujeres >75 años
Orgánicas (%)	14,7	16,2	12,6	28,4
Circulatorias (%)	9,4	11,7	6,3	34,1
Respiratorias (%)	17,2	23	26,1	17,6

Según estos modelos la ola de calor del verano de 2003 entre el 1 de julio y el 31 de agosto habría provocado un exceso de mortalidad en Madrid de 141 muertos aproximadamente IC 95%: (81 200) de los que el 96 % se habría dado en el de mayores de 65 años. Para el caso de Sevilla el exceso de mortalidad en mayores de 65 años habría sido de 43 muertos IC95%: (20, 66).

La anterior definición del índice de intensidad de la ola de calor permite identificar las provincias de nuestro país donde ha sido mayor el impacto del calor sobre la mortalidad en el año 2003. Por regla general, ha sido en los lugares donde el calor es menos frecuente donde se han alcanzado los valores más altos de este índice durante el verano. El comportamiento del índice de intensidad de la ola de calor frente a la tasa de mortalidad de las provincias españolas de mas de 750.000 habitantes muestra un carácter logarítmico (Díaz *et al.* 2004b) lo que viene a indicar que pequeños incrementos del índice tienen un gran impacto sobre la mortalidad y que debido en parte al efecto cosecha, existe un umbral a partir del cual el efecto se estabiliza.

Aunque a nivel global los diferentes patrones de mortalidad esperada basada en los futuros escenarios de cambio climático (McGeehin y Mirabelli 2001) hablan de un incremento de la mortalidad relacionada con olas de calor y un descenso de la relacionada con el frío, también es cierto que estudios realizados en Europa (Eurowinter Group 1997) indican que existe un impacto del frío sobre la mortalidad, superior en los lugares con inviernos más templados que en aquellos con inviernos más crudos. Esto es debido, por un lado a la adaptación fisiológica a las bajas temperaturas y, por otro, a la infraestructura de los hogares que hace que sean mejores las condiciones para luchar contra el frío en lugares habituados a las olas de frío, que en aquellos en los que son menos frecuentes (Eurowinter Group 1997). A modo de ejemplo se muestran en la tabla 16.4 los efectos que tienen sobre la mortalidad, en el grupo de mayores de 65 años, en la ciudad de Madrid, los días en los que la máxima diaria está por debajo del umbral anteriormente definido (Díaz *et al.* 2004a).

Tabla 16.4. *Porcentaje de incremento de la mortalidad en la Ciudad de Madrid por grupos de edad y causas específicas por cada grado en que la temperatura máxima diaria no llega a 6 ºC.*

Causas de Mortalidad	Edad de 65 a 74 años	Mayores de 75
Orgánicas (%)	5,1	2,7
Circulatorias (%)	6,1	2,8
Respiratorias (%)	9,1	9,6

16.3.1.2. Modelos de evolución de la tasa de mortalidad en el horizonte de los años 2020 y 2050

Un estudio recientemente realizado para la ciudad de Lisboa (Dessai 2003) evalúa, aunque con una incertidumbre importante, el posible incremento de la tasa bruta de mortalidad para los años 2020 y 2050. Para ello utiliza las predicciones de dos modelos climáticos regionales, así como diferentes hipótesis sobre aclimatación y evolución de la población. Según este trabajo el incremento de la tasa de mortalidad relacionada con calor habría sido de entre 5,4 y 6 por cada 100.000 habitantes en el periodo 1980-1998. Entre 5,8 y 15,1 para el horizonte de 2020 y de 7,3 a 35,6 para el de 2050.

16.3.2. Contaminación atmosférica

16.3.2.1. Tendencias anuales y variación estacional de los contaminantes atmosféricos

En el informe SESPAS 2000 se describió la tendencia descendente de los niveles de SO_2 y los humos negros, especialmente el primero, en los últimos 20 años (Fernández-Patier y Ballester 2000). Estos han sido los contaminantes tradicionalmente incluidos en los programas de monitoreo y control de la contaminación atmosférica.

En la actualidad se dispone en España de información adecuada para evaluar con cierta perspectiva la situación actual y la tendencia de otros contaminantes relevantes para la salud humana (figura 16.4).

Dado que la mayor parte de la población española vive en áreas urbanas, los datos correspondientes a PM10 y NO_2 se presentan para las estaciones de tipo urbano, distinguiendo, por un lado, aquellas influenciadas directamente por el tráfico de una calle cercana (estaciones de tráfico), por otro lado, las influenciadas principalmente por fuentes industriales (estaciones industriales) y, por último, aquellas que no están tan influenciadas de manera directa por el tráfico o la industria (estaciones de fondo urbano). Para estos dos contaminantes podemos observar como los valores registrados oscilan alrededor del valor límite contemplado en la normativa europea y española, es decir 40 $\mu g/m^3$ como valor medio anual, fijado para ser alcanzado en 2005 o 2010, respectivamente (European Union Council 1999). En ambos casos hemos de tener en cuenta que los valores que se muestran son los promedios de las medias anuales en cada uno de las más de 150 estaciones urbanas. Ello quiere decir que en un número importante de estas ciudades los valores anuales son superiores al valor límite establecido por la normativa española y europea.

En el caso de las *PM10* los valores obtenidos en los distintos tipos de estaciones nos muestran una tendencia estable, sin grandes cambios, en estos 5 años. Además, podemos observar, que en las áreas urbanas la contaminación por partículas no depende directamente de la cercanía a las fuentes emisoras, sino que se distribuye de manera bastante homogénea por las zonas urbanizadas. En términos de salud pública, este hecho es importante pues nos da una idea de que el porcentaje de personas expuestas a concentraciones medias superiores a 40 $\mu g/m^3$ de PM10 puede ser alto. Se ha de considerar sin embargo que la composición de las partículas puede variar sustancialmente de un lugar a otro, y que la toxicidad de las partículas parece estar relacionada, entre otros, con su composición y su tamaño. En este sentido sería necesario disponer de mayor información respecto a los valores de partículas finas (PM2,5) y de su composición para valorar más adecuadamente su origen y posible impacto en salud.

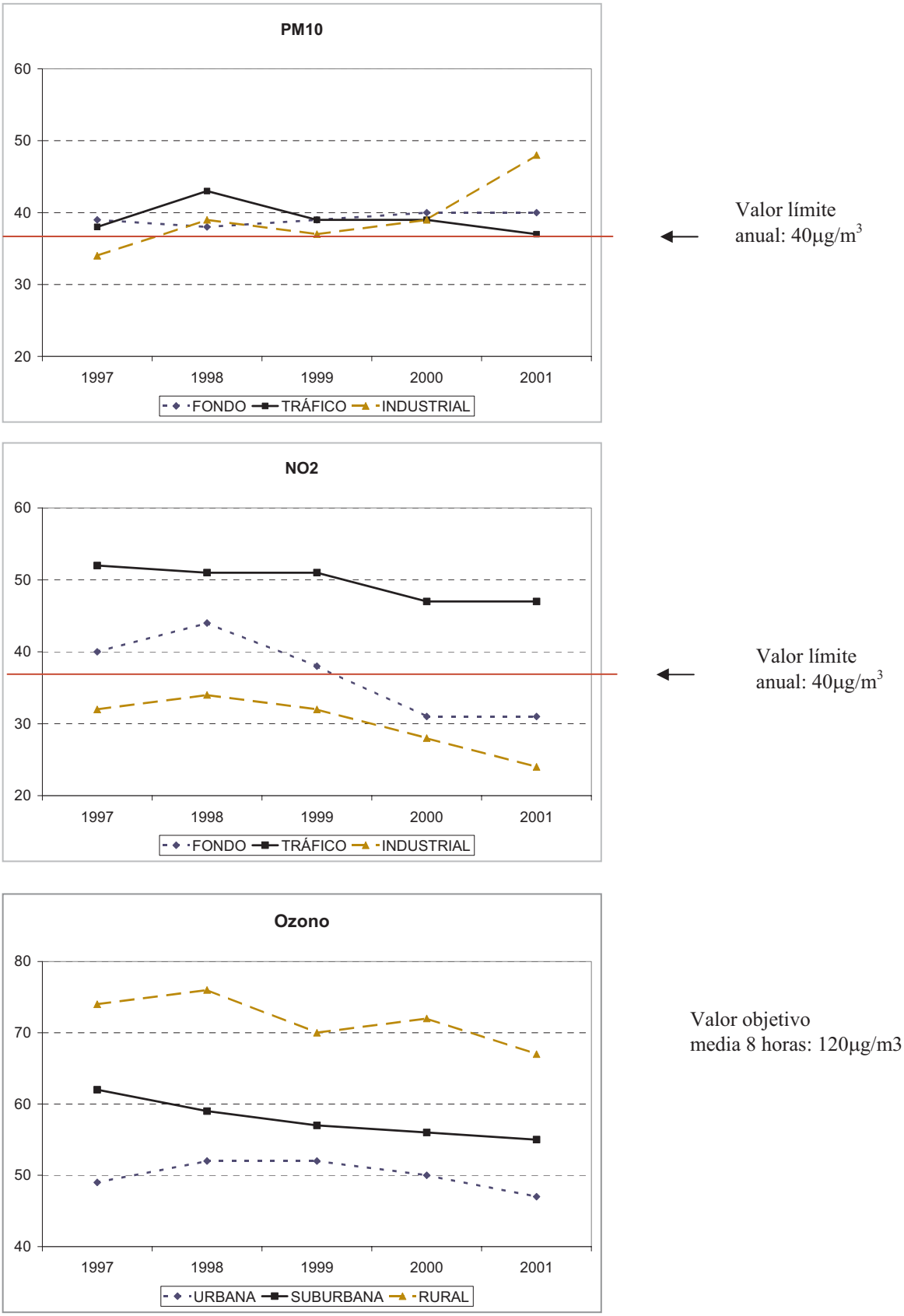


Fig. 16.4. *Promedio de las medias anuales de los niveles de PM10, NO2 y Ozono (en µg/m³). España 1997-2001. Fuente: Base de Datos de Calidad del Aire, Ministerio de Medio Ambiente 2003.*

Los valores de NO_2 indican un patrón distinto. En este caso los valores más altos se registran claramente en las estaciones de tráfico indicando que este contaminante puede ser un buen indicador de la contaminación debida a las emisiones generadas por vehículos a motor. Por otro lado, en las estaciones de fondo e industriales se observa cierta disminución, tendencia que no se observa tan claramente en las estaciones de tráfico.

Para el *ozono*, al tratarse de un contaminante secundario que suele alcanzar valores mayores en zonas alejadas de los focos emisores, se representan los valores medidos en estaciones de fondo, ubicadas tanto en zonas urbanas, como semiurbanas y rurales. En este caso, los valores medios más altos se sitúan en las zonas rurales. En las estaciones semiurbanas, que representan la exposición de un porcentaje importante de la población, las concentraciones medias anuales alcanzan los 60 $\mu g/m^3$. Dada la alta estacionalidad anual, con valores más altos en los meses cálidos, y el patrón diario del ozono, con picos importantes durante las horas de irradiación solar, es seguro que en un número importante de estaciones se excederá, en un buen número de días al año, el valor límite de 120 $\mu g/m^3$ para valores de la máxima diaria de 8 horas. En general, se observa una estabilidad o cierta tendencia a la disminución en las concentraciones medias; sin embargo, el periodo considerado es muy corto para poder identificar un patrón consistente.

16.3.2.2. Estacionalidad e Influencia de las condiciones meteorológicas en la emisión, transporte y formación de los contaminantes atmosféricos

La *estacionalidad* puede diferir entre las distintas localizaciones dependiendo, fundamentalmente, de las emisiones y los fenómenos meteorológicos. Sin embargo existe un patrón homogéneo en la mayor parte de ciudades de España, los contaminantes primarios procedentes de la combustión de combustibles fósiles presentan un patrón con valores más altos en invierno (por más emisiones junto a condiciones de estabilidad meteorológica) y valores más bajos los meses de verano. En cambio el ozono presenta el patrón inverso, sus valores son más altos en los meses de temperatura más alta debido a la interacción de los rayos ultravioleta con los gases precursores (NO_2, COV) procedentes del escape de los vehículos y otras fuentes. Este patrón podría ser diferente para contaminantes que son transportados a larga distancia. En España este es el caso de los episodios de contaminación por partículas que ocurren en las Islas Canarias y en parte de la península Ibérica como consecuencia del transporte de polvo del Sahara (Viana *et al.* 2002; Rodríguez *et al.* 2001). Este hecho debe ser tenido en cuenta a la hora de valorar los niveles de partículas en nuestro país, pues en determinadas circunstancias una parte importante procede del polvo del Sahara.

Las concentraciones de los contaminantes atmosféricos dependen de su producción y también, de manera determinante, de su dispersión. El cambio climático puede afectar cualquiera de los dos procesos anteriores. Por un lado, y relacionado con la meteorología, la posible mayor frecuencia de fenómenos anticiclónicos puede hacer disminuir la dispersión de los contaminantes. Otro fenómeno meteorológico que se ha anticipado como posible consecuencia del cambio climático sería el aumento en los episodios de tormenta seca con trasporte de polvo del Sahara y otros lugares. Por otro lado, como se comenta más adelante, el aumento de temperatura se correlaciona muy directamente con incremento en las concentraciones de ozono. Por último, y de manera indirecta, un aumento de la temperatura puede asociarse con un incremento de las emisiones de contaminantes por el consumo mayor de energía debido a los sistemas de acondicionamiento de aire, refrigeración y conservación de alimentos y otros productos.

Aunque sería necesario conocer las previsiones específicas para España (ver otros capítulos en este informe), dada la naturaleza de contaminante secundario del *ozono*, es previsible que el cambio climático se asocie con incrementos de los niveles de ozono.

Es incierto predecir como puede afectar el cambio climático a los niveles de otros contaminantes. Los contaminantes más relacionados con los sistemas de calefacción como el SO_2, posiblemente experimentaran un descenso en su uso y por ello en sus emisiones. Sin embargo para otros contaminantes como las partículas finas, el NO_2 o el CO muy relacionados con emisiones de los vehículos a motor no se puede asegurar cuales serán sus tendencias. En gran medida estas vendrán marcadas por las tendencias en el consumo de combustibles fósiles. A escala local pueden ocurrir situaciones episódicas de contaminación atmosférica asociadas a fenómenos meteorológicos de altas presiones y ausencia de lluvias prolongadas. Por último, el calentamiento de la tierra puede comportar un incremento en el número e intensidad de incendios forestales. El humo producido en estos incendios se ha visto relacionado con el incremento de procesos respiratorios entre la población afectada.

16.3.2.3. Influencia de las condiciones meteorológicas en la producción y liberación de polen y esporas

A pesar de que las concentraciones de polen y esporas dependen en gran medida de las especies cultivadas y silvestres existentes, las variaciones en dichas concentraciones dependen sensiblemente de los factores meteorológicos (McMichael y Githeko 2001). El cambio climático podría adelantar o alargar el periodo polínico para algunas especies con capacidad alergénica. Además el incremento en los niveles de CO_2 podría afectar la producción de polen.

16.3.3. Enfermedades infecciosas

16.3.3.1. Malaria

16.3.3.1.1. Transmisibilidad

La transmisión natural de esta enfermedad se realiza mediante la picadura de hembras de mosquitos del género *Anopheles*. De las más de 3.000 especies de mosquitos distribuidos por todo el mundo (sobre todo por zonas templadas y tropicales), 400 son anofelinos, 70 transmiten la malaria y sólo unas 40 son de importancia médica: *Anopheles gambiae* y *Anopheles funestus* son los principales vectores en África tropical. Estos insectos sufren una metamorfosis completa, pasando por cuatro estadios bien marcados: huevo, larva, pupa y adulto; los 3 primeros acuáticos y el último aéreo. La duración de esta metamorfosis varía según la temperatura ambiental, desde siete días a 31ºC hasta veinte días a 20ºC. Los machos viven tan sólo unos pocos días, y al no alimentarse de sangre no juegan ningún papel en la transmisión de la enfermedad, salvo la de fecundar a las hembras, que lo hacen inmediatamente después de que ellas eclosionen. Las hembras son fecundadas una sola vez, guardando el esperma en un reservorio interno para próximas fecundaciones. La primera puesta de huevos suele ocurrir al 4º-5º día de vida del mosquito y las puestas sucesivas serán cada 2-3 días y coincidiendo con la picadura en busca de sangre (que se denomina en entomología “concordancia gonotrófica”. Una vez que el mosquito es infectado, permanece infectante durante toda su vida, precisándose unos diez días para el desarrollo de *Plasmodium falciparum* en el mismo (período de incubación extrínseca), por lo que una hembra ha de sobrevivir al menos durante cuatro o cinco ciclos gonotróficos para poder transmitir el paludismo (es decir, al menos durante 10-12 días). La longevidad de la hembra del mosquito en condiciones favorables es de unas cuatro semanas en África, aunque algunas especies de zonas templadas sobreviven hasta seis meses, al entrar en letargo invernal. La mayoría pica al anochecer, sobre todo desde las 20 a las 03 horas y los más eficaces en la transmisión son aquellos que tienen hábitos antropofílicos (pican sólo a humanos), endofágicos y endofílicos (lo hacen dentro de las viviendas). Las picaduras disminuyen notablemente si la humedad relativa es inferior al 52%. La temperatura óptima para el desarrollo del mosquito es de 20-27ºC y de 22-30ºC para el parásito (22ºC para *Plasmodium malariae* 25ºC para *Plasmodium vivax* y 30ºC

para *P. falciparum*). No hay transmisión en altitudes superiores a los 3.000 metros ni en temperaturas mantenidas inferiores a 15ºC, ya que la esquizogonia se paraliza (para *P. vivax* si desciende por debajo de 16ºC y para *P. falciparum* por debajo de 19ºC). Tampoco hay transmisión si la temperatura supera de forma mantenida los 38ºC.

Se denomina "índice esporozoítico" a la proporción de anofelinos hembras infectados en una zona determinada (es decir, el porcentaje que tiene esporozoitos en sus glándulas salivares), y que en África tropical es del 2-5%, mientras que en otras áreas maláricas es del 0,2-2%.

En malariología, se denomina malaria indígena o autóctona cuando se adquiere por la picadura de un mosquito infectado en un país donde existe malaria. Se denomina malaria introducida cuando se adquiere en un país donde no hay malaria, por mosquitos locales que se han infectado desde un enfermo con malaria importada. Malaria inducida es la transmitida por sangre u órganos. Se denomina malaria de aeropuerto (o más generalmente de odisea) cuando se adquiere en un país donde no hay malaria, por mosquitos infectados transportados desde zonas endémicas en los equipajes o en aviones, barcos, autobuses, contenedores.., de la que se han descrito 75 casos en Europa en el período 1997-2000 (Mouchet 2000).

16.3.3.1.2. Malaria en Europa

En el pasado, la malaria se transmitía por toda Europa, llegando tan al norte como a Inglaterra, Escocia, Dinamarca, sur de Noruega, sur de Suecia, Finlandia y provincias Bálticas de Rusia. En estas latitudes los inviernos llegan a -20ºC, y la transmisión dependía de lo cálido que fueran los veranos (limitándose a la isoterma de 15ºC en julio). Pero a partir de mediados del siglo XIX la malaria desaparece del norte de Europa y declina en el centro (como ejemplo: los últimos brotes en Paris ocurrieron durante 1865, cuando la construcción de los grandes bulevares), para desaparecer después de la I Guerra Mundial. En el sur de Europa permaneció muy prevalerte (debido a la pobreza y falta de desarrollo) hasta pasada la II Guerra Mundial, cuando se instauró un programa eficaz de control vectorial (con el advenimiento revolucionario del DDT), hasta que en 1961 la erradicación se había producido en la mayoría de los países.

En los años 90 se produjeron brotes en nuevos estados del sur de la antigua Unión Soviética, con transmisión local a partir de casos importados por las tropas desde Afganistán. En la actualidad, sólo se transmite (exclusivamente *P.vivax*) de manera estacional y en focos muy concretos de Armenia, Azerbaiyán, Federación Rusa, Turkmenistán, Uzbekistán y en la zona asiática de Turquía.

Ocasionalmente, se describe algún caso autóctono en Europa, sin transmisión secundaria, pero preocupante como para la vecina Italia, donde se han registrado casos de transmisión local de *P.vivax* y donde la densidad anofelina ha crecido espectacularmente en zonas tales como Toscana y Calabria (Baldari *et al.* 1998).

16.3.3.1.3. Malaria en España

Las fiebres tercianas benignas por *P. vivax*, y en menor grado las tercianas malignas por *P. falciparum* y las cuartanas por *P. malariae*, eran endémicas en España hasta hace relativamente poco tiempo. El último caso de paludismo autóctono se registró en mayo de 1961 y en 1964 fue expedido el certificado oficial de erradicación. Desde entonces, todos los casos declarados han sido importados, a excepción de los inducidos por transfusiones o por intercambio de jeringuillas en adictos a drogas por vía parenteral o de los paludismos de aeropuerto, aunque recientemente se ha descrito un posible caso autóctono por *P. ovale* adquirido en Alcalá de Henares (Madrid), aunque no se puede descartar que sea de aeropuerto por la proximidad del aeródromo de Torrejón de Ardoz (Cuadros *et al.* 2002).

El único vector potencial aún presente en España es *Anopheles atroparvus cuyas poblaciones* permanecen ampliamente distribuidas por extensas áreas. Afortunadamente es refractario a las cepas tropicales de *P. falciparum*, lo que limita la transmisión autóctona a partir de casos adquiridos en África subsahariana (Ramsdale y Coluzzi 1975). *Anopheles labranchiae*, el otro vector implicado en la transmisión del paludismo, desapareció del sureste de la península en los años 70. Cada año se declaran en nuestro país más de 400 casos de malaria, sin que esto haya determinado, hasta la fecha, la reintroducción de la enfermedad a pesar del incremento de turistas e inmigrantes potencialmente infectados.

El potencial malariogénico de España es muy bajo y el restablecimiento de la enfermedad es muy improbable a no ser que las condiciones sociales y económicas se deterioraran drástica y rápidamente. La posible transmisión local quedaría circunscrita a un número muy reducido de personas y tendría un carácter esporádico. Además, los parásitos que con más probabilidad podrían producir estos casos serían las formas benignas por *P. vivax* / *P. ovale*, ya que puede desarrollarse a temperaturas más bajas y en los vectores peninsulares.

Las predicciones más cuidadosas para el año 2050 no reflejan a la Península Ibérica como escenario de transmisión palúdica, pero sí a lo largo de toda la costa marroquí (Rodgers y Randolph 2000). No obstante, cabría la posibilidad de que vectores africanos susceptibles a cepas de *Plasmodium* tropicales pudieran invadir la parte sur la península Ibérica (López-Vélez y García 1998), aunque también se reduciría la exposición al aumentar la vida bajo el aire acondicionado (Reiter 2001).

16.3.3.2. Virus transmitidos por mosquitos

Se han identificado más de 520 de estos virus, de los que un centenar son patógenos para el hombre. Los más importantes son los que producen fiebres hemorrágicas o encefalitis. Se denominan arbovirus (arthropod-borne-virus) a aquellos transmitidos por la picadura de artrópodos, fundamentalmente por mosquitos de los géneros *Aedes* y *Culex*.

Aedes aegypti, vector de la fiebre amarilla y del dengue en los trópicos, parece haber desaparecido de Europa y en la actualidad no se encuentra por encima de 35º latitud Norte. Por el contrario, ha irrumpido en este continente *Aedes albopictus*, vector del dengue (los 4 serotipos) y fiebre amarilla, originario del sudeste asiático y subcontinente indio (y vector potencial de otros virus como encefalitis japonesa, encefalitis equina del este, fiebre de Ross, La Crosse, Chikungunya, fiebre del valle del Rift y West Nile. También es un buen vector de *Dirofilaria immitis* y *Dirofilaria repens.* En teoría sobrevive hasta latitudes tan al norte como 42ºN (casi las 2/3 partes inferiores de la península Ibérica), pero como es capaz de entrar en diapausa, cuando las condiciones climáticas le son muy desfavorables, el factor limitante real sería la isoterma de -5ºC de enero lo que posibilitaría su establecimiento hasta el sur de Suecia. Por otro lado, se alimenta tanto en entornos urbanos como rurales, de sangre de mamíferos y aves como de humanos, lo que le convierte en un excelente vector puente entre ciclos selváticos y urbanos y entre animales y humanos. Una vez infectado por dengue puede pasar este virus verticalmente transováricamente a sus larvas. En los años 80 se introdujo en América con un cargamento de ruedas usadas desde Japón. En Europa se detectó por primera vez en 1979 en Albania al parecer procedente de China, llegó a Italia desde USA en 1990 y en la década del año 2000 apareció en Francia, Bélgica, Montenegro, Suiza y Hungría, y lo que se temía se ha hecho realidad pues se acaba de detectar su presencia en España (Aranda, comunicación personal).

16.3.3.2.1. Dengue

16.3.3.2.1.1.Transmisibilidad

El virus del dengue es un flavivirus, del que existen 4 serotipos, y que produce un abanico clínico que comprende desde infecciones asintomáticas hasta cuadros hemorrágicos potencialmente letales. Cada año se producen entre 250.000-500.000 casos de formas graves (dengue-hemorrágico y dengue-shock) que acarrean una mortalidad del 1-5% y que alcanza hasta el 40% sin tratamiento. No existe una vacuna eficaz contra esta enfermedad.

Es una enfermedad de ámbito urbano, con epidemias explosivas que alcanzan hasta el 70-80% de la población. La transmisión se realiza por la picadura del mosquito *A. aegypti* y en menor grado de *A. albopictus* y tiene lugar entre los paralelos 30ºN y 20ºS. Desde los años 50 se ha observando un resurgir evidente en el sureste de Asia, y desde los años 70 en el continente americano.

El período de incubación extrínseco en el mosquito es de 12 días a 30ºC, pero si la temperatura se eleva a 32-35ºC este período se reduce a tan solo 7 días. A 30ºC, un ser humano con dengue debe infectar a 6 mosquitos para que se produzca un caso secundario, mientras que a 32-35ºC tan solo necesita infectar a 2 mosquitos para que esto se produzca, es decir, se multiplica por 3 veces la capacidad vectorial del mosquito (Rogers y Packer 1993).

16.3.3.2.1.2. Dengue en Europa

En el pasado hubo dengue en Europa. La primera epidemia documentada serológicamente (de manera retrospectiva) fue en Grecia durante los años 1927-1928, con más de 1 millón de infectados y de los que más de 1000 fallecieron de dengue hemorrágico. Después de la segunda guerra mundial la transmisión de dengue cesó en Europa, probablemente como consecuencia de las campañas de erradicación de la malaria con DDT.

En la actualidad no hay transmisión documentada de dengue en Europa, pero se teme lo peor, ya que *A. albopictus* se encuentra bien implantado en Albania e Italia y, como se ha mencionado con anterioridad, se ha detectado su presencia en Bélgica, Francia, Montenegro, Suiza, Hungría y España.

16.3.3.2.1.3. Dengue en España

Desde el siglo XVII se han descrito epidemias que bien podrían haber sido de dengue, incluyendo la desatada en Cádiz y Sevilla desde 1784 hasta 1788 (Rigau 1998). A mediados del mes de junio de 1801 la reina de España sufrió un cuadro de presunto dengue hemorrágico, y durante el siglo XIX se produjeron epidemias en Canarias, Cádiz y otros puntos del Mediterráneo asociadas a casos importados por mar.

No hay casos documentados de transmisión local de dengue, pero el riesgo parece evidente, ya que en España se dan unas características apropiadas para la transmisión: temperaturas altas en verano y grandes núcleos urbanos en los que las ventanas se mantienen abiertas y el uso de aire acondicionado es infrecuente, con gran actividad en las calles y parques (ideal para el contacto con el vector). Aunque en la actualidad *A. aegypti*, uno de los vectores más importantes de esta enfermedad, parece haber desaparecido hace décadas de España, se acaba de confirmar la presencia de *A. albopictus*, el segundo vector en importancia, en Cataluña (Sant Cugat del Vallès) (Aranda, comunicación personal). Las condiciones climáticas idóneas para el desarrollo de este mosquito son: más de 500 mm^3 de precipitaciones anuales, más de 60 días de lluvia al año, temperatura media del mes frío superior a 0ºC, temperatura media del mes cálido superior a 20ºC y temperatura media anual superior a 11ºC. Las zonas

supuestamente más adecuadas climáticamente para el desarrollo de este vector en España serían Galicia, toda la cornisa del Cantábrico, región subpirenaica, Cataluña, delta del Ebro, cuenca del Tajo, cuenca del Guadiana y desembocadura del Guadalquivir (Eritja, comunicación personal).

16.3.3.2.2. Encefalitis virales. Virus del Nilo Occidental

16.3.3.2.2.1. Transmisibilidad

Representan un amplio grupo de enfermedades virales (encefalitis de San Luis, encefalitis equina del este y del oeste, encefalitis equina venezolana, del Nilo occidental…) que se transmiten por las picaduras de distintas especies de mosquitos, sobre todo del género *Culex* (*C. quinquefasciatus*, *C. pipiens*…) y de garrapatas, donde las aves constituyen el principal reservorio de la enfermedad. La transmisión no es posible en isotermas inferiores a 20ºC en verano. Producen un cuadro de meningitis o meningoencefalitis que puede dejar secuelas neurológicas permanentes. Aunque primordialmente circula entre aves, también pueden resultar infectadas muchas especies de mamíferos así como anfibios y reptiles.

Se han detectado brotes asociados a cambios climáticos de encefalitis de San Luis en California durante 1984 y de encefalitis equina venezolana en Venezuela y Colombia durante 1995. El virus del Nilo occidental es endémico en África y lo más llamativo ha sido el importante brote acontecido en Nueva York en 1999, con diseminación explosiva posterior a 44 Estados y a 6 provincias canadienses en tan solo cinco años, transmitido por mosquitos del género *Culex* a partir de aves migratorias infectadas.

16.3.3.2.2.2. Encefalitis virales en Europa

Se han registrado brotes epidémicos del Nilo occidental en el Mediterráneo oriental, en la Camarga francesa en los años 60 y en los alrededores de Bucarest (Rumania) en 1996. Durante los meses de agosto-septiembre de 2003 se detectó un pequeño brote en la comarca francesa del Var (donde hubo un brote de encéfalo-mielitis equina en el 2000) que afectó a dos humanos (que por cierto, estuvieron de vacaciones en el levante español) y a tres equinos. Durante este brote se estudiaron en España unos 80 líquidos cefalorraquídeos de pacientes con meningitis y más de 900 lotes de mosquitos sin encontrar ninguno positivo. También se han descrito otros brotes en Italia, República Checa, sur de Rusia y Georgia. En el verano de 2004 ha aparecido otro brote reducido en el Algarbe (Portugal) que parece haber afectado a dos turistas irlandeses, aunque este brote aún está pendiente de confirmación.

16.3.3.2.2.3. Encefalitis virales en España

La cuenca del Mediterráneo y el sur de la península ibérica en particular, que acogen a las aves migratorias procedentes de África, constituyen áreas de alto riesgo para la transmisión. Estudios de seroprevalencia realizados en España entre los años 1960-1980 demostraron la presencia de anticuerpos en la sangre de los habitantes de Valencia, Galicia, Coto de Doñana y delta del Ebro, lo que significa que el virus circuló en nuestro país por entonces (Lozano y Felipe 1998). El impacto actual que este virus pudiera tener en la salud de los españoles se desconoce, ya que no se investiga de forma rutinaria en los casos de meningitis virales. La asociación con el cambio climático no ha sido establecida, pero es de suponer que un aumento de la migratorias procedentes de África, constituyen áreas de alto riesgo para la transmisión. Estudios de seroprevalencia realizados en España entre los años 1960-1980 demostraron la presencia de anticuerpos en la sangre de los habitantes de Valencia, Galicia, Coto de Doñana y delta del Ebro, lo que significa que el virus circuló en nuestro país por entonces temperatura produciría un aumento vectorial y se incrementaría, por tanto, el riesgo de transmisión, lo que

desencadenaría casos de meningitis y encefalitis víricas en las poblaciones de áreas de riesgo del territorio español.

16.3.3.2.3. Fiebre amarilla

16.3.3.2.3.1. Transmisibilidad

Enfermedad encuadrada dentro de las fiebres virales hemorrágicas y que tiene una mortalidad >40%. Afortunadamente se dispone de una vacuna eficaz para prevenirla. Endémica en el continente africano y en la amazonía suramericana y transmitida por la picadura del mosquito *A. Aegypti*.

16.3.3.2.3.2. Fiebre amarilla en Europa y en España

España, con sus colonias de ultramar, era especialmente vulnerable a esta enfermedad, registrándose brotes epidémicos asociados a casos importados por mar: en 1856 se produjeron más de 50.000 muertes en Barcelona, Cádiz, Cartagena y Jerez (ese mismo año fallecieron 18.000 personas en Lisboa y se produjeron otros muchos casos en ciudades portuarias del norte de Italia y del sur de Francia) (Eager 1902). *Aedes aegypti* desapareció del Mediterráneo después de la II Guerra Mundial, muy probablemente a consecuencia indirecta de los programas de erradicación de la malaria, y desde entonces no existe riesgo de esta enfermedad.

16.3.3.2.4. Leishmaniosis

La leishmaniosis reemergió en Europa en la década de los 60, una vez finalizados los programas de control que culminaron con la erradicación del paludismo. Enfermedad parasitaria producida por Leishmania infantum en España, endémica en nuestro país y transmitida desde los perros a los humanos por dípteros del genero *Phlebotomus* (P. perniciosus y P. ariasi). Da lugar a formas clínicas cutáneas y a formas viscerales graves.

Aumentos de la temperatura podrían acortar la maduración parasitaria dentro del vector (incrementándose el riesgo de transmisión), reducir el periodo de letargo invernal de los vectores, con el consiguiente aumento en el número de generaciones anuales, y cambiar su distribución geográfica, desplazándose las especies más peligrosas hacia la zona norte de la península, actualmente libre de la enfermedad.

Es altamente probable que la distribución de la leishmaniosis en el continente europeo se amplíe hacia el norte, como consecuencia del calentamiento global del clima, a partir de los límites de distribución actuales de la enfermedad. Por otro lado, existe también un alto riesgo de que la leishmaniosis cutánea antroponótica causada por Leishmania tropica, en la actualidad solo presente en el norte de África y Oriente Medio, pueda emerger en cualquier momento por el sur de Europa.

16.3.3.3. Enfermedades transmitidas por garrapatas

16.3.3.3.1.Transmisibilidad

Las garrapatas sufren una metamorfosis desde la fase de huevo que incluye tres estadios de desarrollo que chupan sangre (larvas, ninfas y adultos). Sin embargo, son las ninfas las que contribuyen en mayor medida a la transmisión de enfermedades a los humanos desde los reservorios animales. Son muchas las enfermedades y de variada gravedad: borreliosis (fiebre recurrente endémica, enfermedad de Lyme), rickettsiosis (fiebre botonosa, fiebres maculadas),

babesiosis, anaplasmosis, ehrlichiosis, tularemia y viriasis (encefalitis por picadura de garrapata o centroeuropea, enfermedad de Congo-Crimea, fiebre de Kyasanur...).

En España, las enfermedades más importantes son la fiebre botonosa y la borreliosis de Lyme y las garrapatas mas difundidas son *Rhipicephalus sanguineus*, la "garrapata común del perro" implicada en la transmisión de la Fiebre Botonosa Mediterránea e *Ixodes ricinus* implicada en la transmisión de la enfermedad de Lyme.

La vida media de una garrapata puede exceder los 3 años, dependiendo de las condiciones climáticas. Los tres estadios del vector pueden estar infectados y lo más peligroso, pueden transmitir la infección a sus crías por vía transovárica.

Pueden sobrevivir a temperaturas de hasta -7ºC, recuperando la actividad vital a los 4-5ºC. Son muy sensibles a mínimos cambios de temperatura, como lo demuestra que tan sólo una isoterma de 2ºC condicione la transmisión en África del sur y este. La disminución de la humedad reduce notablemente la viabilidad de los huevos. Un leve cambio climático podría aumentar la población de garrapatas, extender el período estacional de transmisión y desplazarse la distribución hacia zonas más septentrionales (Randolph 2001). Afortunadamente, para ciertas enfermedades como la encefalitis trasmitida por garrapatas, el cambio climático proyectado mantendría aún más alejados los focos de de esta enfermedad en España.

Ixodes ricinus (en la Cornisa Cantábrica, la sierra de Cameros en La Rioja y algunas poblaciones aisladas en Guadarrama y norte de Cáceres) es muy sensible al calentamiento climático, y los modelos proyectan que la especie seguramente desaparecería del país aunque podrían quedar poblaciones relictas en las zonas más frías de Asturias y Cantabria. Rhipicephalus. sanguineus no depende directamente del clima, sino de la existencia de urbanizaciones y tipos de construcciones periurbanas-rurales que favorecen su desarrollo y colonización. Es de temer que las garrapatas africanas (*Hyalomma marginatum*, *Hyalomma anatolicum*) puedan invadirnos y podrían estar implicadas en la transmisión de la fiebre viral hemorrágica de Congo-Crimea.

16.3.3.3.2. Encefalitis. Enfermedad de Lyme. Rickettsiosis

La incidencia de encefalitis por garrapata en Suecia se ha incrementado sustancialmente desde mediados de 1980, y los límites de la extensión de las garrapatas *I. ricinus* se han extendido más al norte, debido a un aumento de la temperatura (Lindaren y Gustafson 2001).

El aumento de temperatura podría dar lugar a que garrapatas importadas se adaptaran al nuevo clima y transmitieran enfermedades. Desde los años 90 se han establecido garrapatas de la especie *R. sanguineus* en el sur de Suiza, habiéndose demostrado que están infectadas por rickettsias causantes de fiebre botonosa mediterránea y fiebre Q (Bernasconi *et al.* 2002).

16.3.3.4. Enfermedades transmitidas por roedores

16.3.3.4.1. Transmisibilidad

Los roedores pueden abrigar a otros vectores como garrapatas y pulgas (*Xenopsylla cheopis*, *Ctenocephalides felis.*) que transmiten la peste y el tifus murino. Además, pueden ser hospedadores intermediarios o reservorios de varias enfermedades como leptospirosis, fiebres virales hemorrágicas (Junin, Machupo, Guaranito, Sabia, Lassa), hantavirosis, himenolepiais….

Tanto la población de roedores silvestres como la posibilidad de contacto entre roedor- humano en las zonas urbanas están muy influenciados por los cambios ambientales. Tras años de sequía que podrían disminuir el número de predadores naturales de roedores, vendrían lluvias que aumentarían el alimento disponible (semillas, nueces, insectos) y terminaría en un aumento de la población de roedores.

16.3.3.4.2. Hantavirus

En el sur de EE.UU. se desató una epidemia muy grave de hantavirosis humana a principios de los años 90, asociada a un incremento inusual (de hasta 10 veces) de la población de roedores reservorio natural de hantavirus (*Peromyscus* sp). La causa fue el cambio climático antes descrito (Wenzel 2004).

En España se han detectado hantavirus en zorros y en roedores y en sueros de humanos.

16.4. ZONAS MÁS VULNERABLES

16.4.1. Temperaturas extremas

Las zonas más vulnerables a los extremos térmicos esperados deberán identificarse basándose en diferentes parámetros. Por un lado se deberán considerar los lugares donde, según los diferentes escenarios, se espera una mayor incidencia tanto en frecuencia como en intensidad de los extremos térmicos (ver capítulo 1). Se conoce, además, que el mayor impacto se produce en los grupos de edad más avanzada (W.H.O. 2004), por tanto, será en los lugares con mayor porcentaje de población mayor de 65 años donde el efecto será más importante, normalmente esta proporción es menor en las grandes ciudades. A modo de ejemplo indicar que en la provincia de Soria el 26,9 % son mayores de 65 años, mientras que en Madrid este porcentaje sólo alcanza el 14,2%. Por último habrá que tener en cuenta la adaptación al calor y los diferentes patrones socioeconómicos e infraestructuras disponibles en cada lugar (García-Herrera *et al.* 2004).

16.4.2. Contaminación atmosférica

Diferentes estudios han mostrado que los ancianos, las personas de salud comprometida que padecen de bronquitis crónica, asma, enfermedades cardiovasculares, diabetes (Bateson & Schwartz 2004) y los niños se encuentran entre los grupos más vulnerables (Tamburlini *et al.* 2002). En el caso de la contaminación atmosférica por ozono, el grupo de personas a riesgo serían los niños, los jóvenes y los adultos, por pasar más tiempo en el exterior de los edificios. Si además estas personas se encuentran realizando un ejercicio intenso (deporte, trabajo, juego) la frecuencia e intensidad respiratoria se incrementan y, por consiguiente, también el riesgo. Los niños constituyen un grupo de riesgo especial porque su sistema respiratorio no se encuentra desarrollado completamente, porque pasan más tiempo en el exterior y porque respiran más aire por unidad de peso que los adultos.

Por otro lado se ha relacionado el nivel socioeconómico con el grado del impacto de la contaminación atmosférica en la salud. Así se ha descrito recientemente un mayor número de defunciones por causas respiratorias en Sao Paulo, Brasil (Martins *et al.* 2004), y en Hamilton, Canadá (Jerret *et al.* 2004) entre las personas con peores condiciones socioeconómicas. Estas diferencias en el impacto en salud podrían deberse a diferencias en la exposición (las personas de clases menos favorecidas viven en lugares más contaminados), a diferencias en el estado de salud (la pobreza se asocia con enfermedad, bronquitis crónica por ejemplo), y a diferencias en la susceptibilidad o vulnerabilidad (peor alimentación, peores condiciones de la vivienda). Sin embargo los resultados anteriores se han relacionado más con contaminantes primarios

como el CO y el SO_2. En el caso del ozono al ser un contaminante secundario las zonas más expuestas pueden estar alejadas de los focos de emisión (Lipfert 2004).

16.4.3. Enfermedades infecciosas

Por la proximidad con el continente africano, siendo lugar de tránsito obligado de aves migratorias y personas, y por las condiciones climáticas, cercanas a las de zonas donde hay transmisión de enfermedades vectoriales, España es un país en el que estas enfermedades podrían verse potenciadas por el cambio climático. Pero para el establecimiento de auténticas áreas de endemia se necesitaría la conjunción de otros factores, tales como el aflujo masivo y simultáneo de reservorios animales o humanos y el deterioro de las condiciones socio-sanitarias y de los servicios de Salud Pública.
Hipotéticamente, las enfermedades vectoriales susceptibles de ser influidas por el cambio climático y emerger o reemerger en España se muestran en la tabla 16.5:

Tabla 16.5. *Enfermedades vectoriales susceptibles de ser influidas por el cambio climático.*

Enfermedad	**Agente**	**Vector**	**Clínica**
Dengue	Flavivirus	mosquito	Fiebre viral hemorrágica
Nilo Occidental (West Nile)	*Flavivirus*	mosquito	encefalitis
Fiebre de Congo Crimea	*Nairovirus*	garrapata	fiebre viral hemorrágica
Encefalitis por Garrapata	*Flavivirus*	garrapata	encefalitis
Fiebre del valle del Rift	*Phlebovirus*	mosquito	fiebre viral hemorrágica
Fiebre botonosa	*Rickettsia conorii*	garrapata	fiebre maculada
Tifus murino	*Rickettsia typhi*	pulga	fiebre tífica
Enfermedad de Lyme	*Borrelia burgdorferi*	garrapata	artritis,meningitis, carditis
Fiebre recurrente endémica	*Borrelia hispanica*	garrapata	fiebre recurrente
Malaria	*Plasmodium sp.*	mosquito	fiebres palúdicas
Leishmaniosis	*Leishmania sp*	flebotomo	kala-azar

Europa se ha recalentado unos 0,8ºC en los últimos 100 años, pero no de forma uniforme, ya que el mayor incremento se ha producido en los inviernos y en el norte del continente. De continuar esta tendencia es posible que la elevada mortalidad vectorial durante los inviernos disminuya. Respecto a las precipitaciones es más difícil la predicción, aunque probablemente los inviernos serán más húmedos y los veranos más secos. Si el sur fuera más seco, disminuirían los humedales y con ellos los criaderos de mosquitos; sin embrago, aparecerían otros lugares de cría, al aumentar las aguas estancadas que quedarían al secarse el lecho de las corrientes o los depósitos de agua utilizados por los horticultores para conservar el agua de lluvia.

Las predicciones de cambio en España apuntan hacia unos inviernos más lluviosos y calidos, seguidos de veranos calurosos y secos, condiciones climáticas favorables para el establecimiento y proliferación vectorial. El posible riesgo vendría por la importación e instalación de vectores tropicales y subtropicales adaptados a sobrevivir en climas menos cálidos y más secos (como es el ejemplo de *A. albopictus*).

16.5. PRINCIPALES OPCIONES ADAPTATIVAS

16.5.1. Temperaturas extremas

Son numerosos los factores que pueden influir en el impacto de los extremos térmicos sobre la población y, por tanto, en su adaptación a los eventos extremos. En primer lugar son de gran importancia los factores meteorológicos a escala local a la hora de predecir la ocurrencia de un determinado extremo térmico. Así, por ejemplo, las situaciones sinópticas que produjeron la ola de calor en Madrid y Lisboa durante el verano de 2003 fueron diferentes en uno y otro lugar (García-Herrera *et al.* 2004).

Puesto que parece que el grupo más afectado ante los extremos térmicos es el de mayores de 65 años, habrá que articular las medidas de adaptación en función de la población de cada lugar. Además influyen factores asociados al desarrollo económico y cultural que pueden condicionar el impacto de los extremos térmicos. Por ejemplo, y pese al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero asociados, ha quedado clara la influencia de los sistemas de calefacción en la mitigación de las olas de frío (Wilkinson *et al.* 2001) o de los aparatos de aire acondicionado en el caso de las olas de calor (Curriero *et al.* 2002).
Aunque la población envejecida es, sin lugar a dudas, el colectivo más afectado, existen otros grupos como personas con diversas patologías de base que pueden ver agravadas sus dolencias. La experiencia de 2003 nos ha enseñado que personas aparentemente sanas han fallecido por causa del calor al realizar prácticas tales como hacer deporte al aire libre en horas de gran calor.

A lo anterior habría que añadir la necesidad de información a la población sobre medidas básicas a seguir ante extremos térmicos y la correcta formación y adecuación de los servicios sanitarios ante posibles aumentos de las patologías relacionadas con las olas de calor y frío. Se trata de articular sistemas de alerta in situ ante posibles extremos térmicos. Cada ciudad necesita desarrollar un sistema diferente basado en sus condiciones meteorológicas específicas, en la respuesta de su propia pirámide de población, de su infraestructura, del entramado social y de sus recursos hospitalarios.

Al contrario de lo que ocurre en las ciudades de Norte América, las ciudades europeas no están aún preparadas para las olas de calor. En algunas ciudades de Europa el plan de alerta consiste en información meteorológica y no incluye más que información pasiva al público en general y a las agencias locales de salud pública. Únicamente Lisboa y Roma han implementado un verdadero sistema de alerta en el caso de olas de calor (Pirard 2003, W.H.O. 2004). Estos sistemas se basan en que la predicción meteorológica tiene una alta fiabilidad en 24-48 horas antes del extremo térmico y existe tiempo suficiente para una movilización de toda la red montada previamente. Así, por ejemplo, en el caso de Philadelphia esta actividad se basa en el anuncio de la situación de alerta a través de los medios, la puesta en marcha de una “línea caliente”, la implicación de los vecinos y las visitas de los servicios sociales, así como las medidas dirigidas a reforzar los servicios médicos de urgencias y facilitar a los ancianos el acceso a lugares con aire acondicionado. Estos sistemas han demostrado ser eficaces a corto plazo y que puede ser una medida adecuada de adaptación de la población a largo plazo (Keatinge 2003).

En esta línea aparece como una importante opción adaptativa la adecuada planificación urbana para mitigar los efectos de isla térmica y la existencia de construcciones bioclimáticas que aseguren el confort de sus habitantes con el mínimo consumo energético.

16.5.2. Contaminación atmosférica

Como establece la Comisión de Economía de Naciones Unidas para Europa (UNECE 2003) los científicos y los políticos no deberían seguir tratando la contaminación atmosférica y el cambio

climático como problemas distintos, dado que los dos están muy estrechamente relacionados y son, en gran parte debidos al incremento en el uso de combustibles fósiles.

Una de las primeras medidas a llevar a cabo debería ser el establecimiento de un sistema de monitoreo de calidad del aire (incluyendo información meteorológica y de polen y esporas) y de alerta del público ante situaciones de incremento de los niveles. Al mismo tiempo se deben llevar a cabo las medidas legislativas que establezcan unos estándares de calidad el aire y restricciones en las emisiones para proteger la salud de los ciudadanos. El marco europeo facilita la implementación de ambas medidas en nuestro país, pero son precisas políticas efectivas para conseguir un sistema integral e integrado por los diferentes sectores implicados: medio ambiente, salud pública, transporte, industria, etc.

La medida más importante es la disminución de las emisiones de gases contaminantes. Esto comporta la puesta en marcha de estrategias en el sector transporte, urbanístico, industrial con el uso eficiente de la energía y la utilización progresiva de energías renovables. Otra medida sería poner en marcha programas encaminados a reducir los riesgos producidos por los incendios forestales y la exposición a polen alergénico (Casimiro y Calheiros 2002).

Las medidas anteriores deberían se complementadas (McMichael y Githeko 2001) con actuaciones encaminadas a la educación de la salud y a la promoción de hábitos saludables, entre los que se incluirían el uso eficiente y responsable de la energía y los consejos para aumentar la protección de los ciudadanos (por ejemplo en los días con altos niveles de ozono).

Un último aspecto a destacar, es la necesidad de poner más énfasis en la participación ciudadana para la solución de muchos de estos problemas. Se debería fomentar el desarrollo de una conciencia en salud y medio ambiente entre la población y asegurar una participación comunitaria activa en la determinación de los problemas y necesidades, así como en los procesos de planificación y acción. Los problemas de salud ambiental están conectados con el patrón de desarrollo en nuestro país, al igual que en otros paises de nuestro entorno (como por ejemplo el uso de incontrolado de energía eléctrica, de agua potable, la urbanización de la población, el uso de coches privados como manera principal de transporte, etc.). Como consecuencia, su solución depende de cambios importantes de estilo de vida que afectan a grandes sectores de la población.

En definitiva, los cambios futuros deben venir por la contribución de todos los sectores, es decir las decisiones de los políticos, los cambios legislativos, la actuación de los técnicos, la educación e información, las decisiones de los consumidores, etc. que deben fomentar las tecnologías limpias, la reducción del consumo de combustibles fósiles y los productos que sean menos contaminantes.

16.5.3. Enfermedades infecciosas

El reconocimiento del riesgo a nivel oficial es fundamental. Hay que estar vigilantes al problema y no desdeñar el riesgo, aconsejándose la colección de datos climáticos y de estadísticas de enfermedades infecciosas, con el objeto de poder instaurar precozmente, en casos de alerta, campañas adecuadas de Salud Pública que disminuyan la vulnerabilidad de la población a las enfermedades infecciosas, mediante estrategias de vacunación, control de vectores y tratamiento de las aguas (McCarthy 2001, Hunter 2003).

16.6. REPERCUSIONES SOBRE OTROS SECTORES

16.6.1. Temperaturas extremas

Las opciones adaptativas mencionadas anteriormente implican de forma clara a varios sectores. En primer lugar la información meteorológica ha de ser lo suficientemente fiable a escala local para que los planes de intervención sean efectivos tanto en la detección de olas de calor y frío como en la determinación de su intensidad y duración. El sector seguros, sobre todo el relacionado con la sanidad y decesos, se va a ver afectado por un aumento en el número de ingresos hospitalarios y en los costes asociados al aumento de la mortalidad.

La demanda energética, clave en los sistemas de acondicionamiento, va a venir marcada por un incremento en las necesidades de la población y de los centros asistenciales, como ya se ha expuesto en otro capítulo.

Pese al coste económico imputable a los planes de actuación descritos, en el sentido estricto de coste-beneficio y siguiendo el ejemplo del Plan de Philadelphia estos son altamente rentables ya que a unos costes de 250000 dólares anuales se le imputan unos beneficios en mortalidad evitada de 117 millones de dólares por año (Kalkstein 2002).

16.6.2. Contaminación atmosférica

Las medidas de adaptación comentadas en el punto anterior tendrían una repercusión sobre diferentes sectores.

16.6.2.1. Sector clima

La reducción de emisiones de gases contaminantes, al tener un origen común al de los gases con efecto invernadero, tendría un efecto beneficioso sobre la emisión de CO_2 y otros gases a la atmósfera. Ello redundaría en una ralentización del calentamiento global.

16.6.2.2. Sector energía

El uso más eficiente de la energía y la introducción progresiva de energías limpias comportará una reducción en la utilización de combustibles fósiles y, por consiguiente, una reducción en la emisión de SO_2, CO y NO_2.

16.6.2.3. Sector agricultura

Se deberá valorar la introducción de especies con gran capacidad alergénica en la agricultura, así como el tratamiento de las mismas, especialmente en los campos de cultivo cercanos a la población. El posible uso de plaguicidas para la eliminación de especies con capacidad alergénica y su posible repercusión sobre la salud de las personas, por aplicación directa, exposición ambiental o vía alimentaria, deberá ser tenido en cuenta.

La hipótesis de que el consumo de alimentos antioxidantes, con contenido en vitamina C, vitamina E, beta-caroteno, como los cítricos, las zanahorias o los frutos secos, y, en general todas las frutas y verduras, tienen un efecto protector frente a los efectos de la contaminación fotoquímica (en especial el ozono) puede llevar a recomendar un aumento en su consumo. Esto tendría una influencia sobre las políticas agrícolas.

16.6.2.4. Sector forestal

La evidencia de riesgos para la salud por la emisión de partículas y gases por combustión, debe llevar a incrementar la protección de los bosques para evitar incendios forestales.

16.6.2.5. Sector turismo

Las intervenciones encaminadas a conseguir un aire más limpio y un ambiente más sano, junto con modelos de buena práctica ambiental, puede ser un atractivo para un turismo de calidad y ecológicamente sostenible.

16.6.2.6. Sector salud

Una cuestión importante es la de los efectos secundarios beneficiosos de las políticas de mitigación. Las acciones para reducir las emisiones gases con efecto invernadero pueden conducir muy probablemente a mejoras en la salud de la población (McMichael y Githeko 2001).

En un artículo que apareció en la revista Lancet durante las discusiones acerca del contenido del tratado de Kyoto (Working Group on Public Health and Fossil-Fuel Combustión 1997) se realizó una evaluación del impacto en salud que tendría la adopción de políticas de control de las emisiones sobre la salud de las poblaciones, en el corto plazo, es decir, sin esperar a ver las consecuencias de la mitigación del cambio climático. En dicho trabajo se comparaba lo que ocurriría, por lo que respecta a los efectos relacionados con la exposición a partículas en suspensión, si las políticas energéticas mundiales continuaban como hasta 1997 o cambiaban a un escenario de políticas de control de las emisiones para evitar el calentamiento mundial. Desde el año 2000 al 2020, el impacto relacionado con la diferencia de exposición a partículas podría ser de una reducción de 700.000 muertes anuales. Únicamente en lo que respecta a los Estados Unidos, el número de muertes evitables equivaldría en magnitud a las muertes asociadas al SIDA o a todas las causadas por las enfermedades hepáticas.

En otro estudio, una estimación de los beneficios que una reducción de la contaminación atmosférica tendría en cuatro ciudades americanas (Santiago de Chile, Sao Paulo, Méjico y Nueva York) indica que, si se adoptaran las tecnologías disponibles para reducir la contaminación atmosférica y el calentamiento global, se podrían reducir, en dichas, ciudades 65.000 defunciones y los correspondientes casos de bronquitis y actividad restringida. (Cifuentes *et al.* 2001).

Estos resultados ilustran los beneficios que a escala local y cercana en el tiempo tendrían las políticas de reducción de las emisiones de gases que provocan el calentamiento global. Estas cifras, sin embargo, deben ser valoradas con precaución y tomadas únicamente como indicativas, dadas las asunciones y dudas existentes a la hora de realizar las estimaciones. No obstante, queda demostrado que el uso de fuentes renovables de energía puede ayudar en el proceso de reducción de las emisiones al tiempo que pueden constituir una fuente asequible de energía para un número importante de población que ahora no tiene acceso a energías limpias (McMichael y Githeko 2001).

Las estrategias de transporte, medio ambiente y salud con la promoción del uso de la bicicleta y caminar como medio de trasporte comportará un incremento del ejercicio físico moderado en un gran segmento de la población con hábitos de vida sedentarios, que tendrá una repercusión favorable sobre su salud. (Haines *et al.* 2000).

16.6.3. Enfermedades infecciosas

La repercusión fundamental de la reintroducción o diseminación de las enfermedades transmitidas por vectores sería en el sector del Turismo. Un aumento de estas enfermedades en las zonas de turismo podría disuadir al viajero de elegir tales destinos, con las repercusiones que esto acarrearía. Los sectores Agricultura y Forestal se correlacionan muy estrechamente con el hábitat y ecosistema de cría de vectores.

16.7. PRINCIPALES INCERTIDUMBRES Y DESCONOCIMIENTOS

16.7.1. Temperaturas extremas

Quizá sea este sector de efectos en salud, y en particular el relacionado con los extremos térmicos uno de los que presentan mayores incertidumbres.

En primer lugar están las relacionadas con los propios modelos climáticos que se han expuesto en el correspondiente capítulo. A esto hay que añadir el carácter marcadamente local que tiene el comportamiento de las temperaturas extremas en la Península como ha quedado de manifiesto en estudios realizados recientemente (Prieto *et al.* 2004). Otro de los factores clave es la determinación de los posibles escenarios demográficos y, sobre todo, de la evolución de la pirámide de población en el grupo de mayores de 65 años, grupo diana de los efectos de las olas de calor y frío (W.H.O. 2004). Por otro lado, los posibles impactos tratados en este capítulo se ven modulados por la adaptación al clima que a su vez depende de factores sociales, económicos, tecnológicos, culturales, políticos y biofísicos de los que se desconoce su evolución. La puesta en marcha de planes de prevención como los descritos anteriormente, los recursos implicados y, en suma, su efectividad, van a ser decisivos en las repercusiones directas sobre la salud de la población.

El sector salud muestra además un inconveniente añadido motivado, fundamentalmente, por la escasez de datos en lo relativo a los efectos de los extremos térmicos en morbi-mortalidad. Los sistemas de registro actuales no permiten actuaciones en tiempo real y deben transcurrir varios meses (incluso años) hasta que estos datos están disponibles para los investigadores. Sin un sistema de registro e información ágil y fiable cualquier investigación se hace especialmente complicada y cualquier modelo dósis-respuesta elaborado a partir de esta información vendrá sesgado por este hecho.

La lectura de este apartado no debe servir para que los actores implicados se escuden en las incertidumbres a la hora de la adopción de medidas dirigidas a minimizar los efectos de los extremos térmicos. La lógica incertidumbre en los futuros escenarios climáticos y sus efectos en salud no cuestiona que estos efectos vayan a producirse, sirva el ejemplo de los efectos de la temperatura sobre el exceso de mortalidad registrada en Europa durante el verano 2003 y que se ha descrito someramente en el apartado 3 de ese capítulo.

16.7.2. Contaminación atmosférica

Existen una serie de incertidumbres generales a cerca del proceso de *cambio climático* y sus predicciones que han sido comentadas en otros lugares de este informe. Respecto a los efectos en salud de la contaminación atmosférica y su relación con el cambio climático existen una serie de incertidumbres específicas. Dos elementos importantes que pueden determinar dicho impacto en el futuro son:

- Los escenarios de *emisiones* para el futuro. Estas se podrían basar en las estimaciones del crecimiento económico o poblacional pero también en el de las restricciones establecidas por la legislación a los acuerdos. En ambos casos es muy complejo hacer estimaciones

pues la propia realidad, como la evolución de las emisiones de gases con efecto invernadero en España, en que se ha sobrepasado, de largo, lo acordado por el gobierno español en relación al cumplimiento del tratado de Kyoto.

- La *sensibilidad y vulnerabilidad de las poblaciones*. La tendencia en nuestro país es a un envejecimiento de la población lo que redundaría en un mayor impacto por la mayor susceptibilidad de las personas de edad avanzada y estado de salud comprometido. Por otro lado, aún existen muchas lagunas respecto a le estimación cuantitativa del riesgo relacionado con la mayoría de contaminantes. Para partículas se ha definido una relación concentración respuesta de forma lineal, pero se conoce menos la forma de la relación con otros contaminantes. Especialmente necesarias serán las evidencias sobre el impacto del ozono sobre la salud, dado el previsible aumento, al menos en forma episódica, de este contaminante con el cambio climático.

16.7.3. Enfermedades infecciosas

Aparte de las observaciones asociadas a las oscilaciones periódicas naturales, hasta ahora no se ha podido probar de manera fehaciente que el leve cambio climático experimentado en las últimas décadas haya aumentado el riesgo global de transmisión de las enfermedades transmitidas por artrópodos, pero sí que hay suficiente evidencia científica para sospecharlo. Las predicciones matemáticas realizadas auguran un aumento del riesgo siempre y cuando el cambio climático continúe produciéndose, algo que para casi todos parece evidente. Sin embargo, algunos expertos se han mostrado escépticos acerca de estas predicciones, ya que la historia natural de las enfermedades transmitidas por artrópodos es compleja, interfiriendo otros factores además del clima, lo que hace huir del análisis simplista.

Además del cambio climático muchos otros son los factores que pueden influenciar en la epidemiología de las enfermedades vectoriales: composición atmosférica, urbanización, desarrollo económico y social, comercio internacional, migraciones humanas, desarrollo industrial, uso de la tierra-regadíos-desarrollo agrícola (Suthers 2004). El resurgir reciente de muchas de estas enfermedades en el mundo podría más bien atribuirse a cambios políticos, económicos y de actividad humana más que a cambios climáticos.

Por tanto, el clima, por si solo no sería un requisito suficiente para la instauración de focos endémicos en España. Se necesitaría un número suficiente de individuos simultáneamente infectados para constituir un reservorio de la infección. Los inmigrantes semiinmunes pueden albergar parásitos durante muchos meses de forma paucisintomática, pudiendo ser reservorios eficaces de enfermedades. Aunque el incremento del turismo e inmigración de zonas endémicas puedan importar casos, éstos no serían lo suficiente en número como para iniciar una epidemia, pudiendo, a lo más, originar focos muy locales de transmisión autolimitada y casos de infecciones de aeropuerto (Hunter 2003).

16.8. DETECCIÓN DEL CAMBIO

16.8.1. Temperaturas extremas

Es esencial disponer de modelos de evolución de la morbi-mortalidad basados en series temporales lo suficientemente extensas en el tiempo que permitan detectar precozmente los posibles cambios en sus patrones de comportamiento. No se pueden detectar evoluciones anómalas de una serie temporal si no se conoce el comportamiento esperado y, lo que es más importante, si no se comparan esos datos esperados con los datos reales. Es preciso insistir en la necesidad de agilizar y aumentar la fiabilidad de los registros de morbi-mortalidad no sólo como indicador de sus posibles extremos sino también como base de cualquier posterior

investigación. Así estos registros podrían utilizarse incluso para detectar si la intervención realizada ante una previsión de ola de calor-frío ha sido eficaz.

16.8.2. Contaminación atmosférica, salud y cambio climático

La detección y atribución de los efectos del cambio climático sobre la salud requieren el establecimiento de un sistema de monitorización para detectar los efectos tempranos (Kovats et al. 2000). Este sistema debe proporcionar datos meteorológicos, ambientales, de salud y demográficos de buena calidad. Los datos de salud candidatos a formar parte de dichos sistemas deberían cumplir los siguientes principios (McMichael 2003):

- Evidencia de sensibilidad a los cambios climáticos
- Relevancia para la salud pública por la carga de enfermedad que representa
- Factibilidad en la recogida de la información

En nuestro país no existe un *sistema de vigilancia epidemiológica de los efectos de la contaminación atmosférica.* En la actualidad se dispone de diversos programas de monitorización de calidad del aire gestionados a nivel central y, mayoritariamente, en las comunidades autónomas por los departamentos encargados del medio ambiente. Dichos sistemas no están, en general, integrados con los sistemas de alerta y los servicios de salud pública. Esta debería ser una acción prioritaria para el futuro cercano en nuestro país, y no solo por la detección de efectos ligados al cambio climático. Dicho sistema de vigilancia debería incluir información diaria de los niveles de contaminación atmosférica, de las variables meteorológicas y de variables de salud como defunciones (total y por causa específica), el número de ingresos hospitalarios por causas cardiovasculares y respiratorias y si fuera posible información sobre las urgencias hospitalarias. Caso de no ser posible disponer de esta última información se podría seleccionar una serie de servicios de urgencias como centinela. Al mismo tiempo se debería obtener de la correspondiente información sobre estructura demográfica, nivel socioeconómico y calidad del hábitat y calidad de la atención sanitaria.

Para cumplir con los objetivos de un sistema de vigilancia este debería generar un registro mantenido y, muy especialmente, debería producir información oportuna y representativa que permitiera su uso en la planificación, desarrollo y la evaluación de las acciones de salud pública.

Una alternativa, que puede ser complementaria a la anterior, consiste en llevar a cabo *evaluaciones periódicas del impacto en salud* de la contaminación atmosférica y su posible relación con el cambio climático (W.H.O. 2000). En Europa, el programa APHEIS (2001 2002) ha realizado la evaluación de impacto en salud de la contaminación atmosférica en 26 ciudades de 12 países europeos. La población total cubierta por esta evaluación del impacto en salud incluye cerca de 39 millones de habitantes europeos. Para el conjunto de las 19 ciudades en las que se dispuso de información sobre PM10, una reducción de 5µg/m3 de los niveles de PM10 conllevaría una disminución en la mortalidad a largo plazo de 5000 muertes anuales, de las cuales 800 serían fallecimientos a corto plazo. Esta evaluación proporciona una estimación cuantitativa de los beneficios potenciales de la disminución de los niveles de los contaminantes.

16.8.3. Cambio climático y enfermedades infecciosas transmitidas por artrópodos y roedores

Como se ha mencionado, no existe una evidencia inequívoca de que el cambio climático acontecido hasta la fecha haya modificado sustancialmente la epidemiología de las enfermedades infecciosas transmitidas por vectores.

La colección de datos de forma prospectiva y la investigación de manera precoz en el triángulo de interacción “cambio climático-vectores-población” tendría el beneficio de la creación de un banco de datos que sería de extrema utilidad. Estos sistemas deberían incluir, además, variables como cambios demográficos, económicos y ambientales, pues los cambios en la epidemiología de las enfermedades infecciosas más puede deberse a estos últimos factores más que al cambio climático en sí.

Se deberían realizar estudios de prevalencia de ciertas enfermedades, como las flaviviriasis, mediante estudios de seroprevalencia en las poblaciones de riesgo. Además, se deberían estudiar las poblaciones de vectores para la detección precoz de nuevas especies y para la determinación de la dispersión geográfica de las poblaciones de especies foráneas recientemente detectadas (como es el caso de *A. albopictus*).

Estos estudios deberían ser lo suficientemente eficientes y exactos para detectar mínimos cambios en la salud. Desafortunadamente, los sistemas actuales de monitorización vectorial no responden a estas premisas.

En esencia, la detección del cambio pasa por la detección de microorganismos patógenos: -en los vectores (virus del dengue o de la encefalitis del Nilo Occidental en mosquitos); -en los reservorios naturales (roedores, aves o équidos) y; -en los humanos (tanto de habitantes asintomáticos de áreas de riesgo como de pacientes ingresados con patologías compatibles, mediante análisis de sangres, sueros, líquidos cefalorraquídeos…etc.).

16.9. IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS

16.9.1. Temperaturas extremas

Aunque a lo largo de este capítulo se ha insistido en el carácter local de los planes de prevención y actuación, éstos han de obedecer a políticas generales que sirvan de marco para el desarrollo de estas actividades.

Siguiendo el posicionamiento de la OMS frente al cambio climático (W.H.O. 2003) se considera necesario el desarrollo de las siguientes medidas de intervención a medio plazo:

1. Facilitar la organización de foros interdisciplinares entre políticos y técnicos para identificar las necesidades y los mecanismos de actuación.
2. Facilitar el desarrollo de equipos multidisciplinares que hagan llegar a la población los potenciales riesgos sobre la salud relacionados con los extremos térmicos y la puesta en marcha de medidas para mitigar sus efectos.
3. Facilitar el desarrollo de mecanismos que permitan la pronta evaluación de los planes de intervención con el objeto de su mejora y aumento de eficacia.

A corto plazo, en nuestro país, serían precisos planes de actuación en salud pública basados en sistemas de alerta temprana que permitan la identificación de las situaciones de riesgo antes de que se produzcan. En este sentido, es básica la información meteorológica. Se trata de predecir los excesos de morbi-mortalidad, en un plazo que haga posible articular una respuesta rápida. Los registros de morbi-mortalidad, como primer elemento en una cadena de actuaciones, han de ser ágiles y fiables. No se puede implementar ningún plan de alerta basado en incrementos reales de morbi-mortalidad si sólo se tiene acceso a esos datos semanas e incluso meses después de que se hayan producido estos excesos. Por otro lado, la puesta en marcha de actuaciones en gestión hospitalaria que permitan la adecuación de los servicios sanitarios cuando la situación lo requiera se muestra como otro elemento imprescindible en las políticas de actuación. Por último, es imprescindible una coordinación total con los servicios sociales, fundamentalmente los destinados a los estratos sociales

menos favorecidos, que haga posible la articulación de los planes de actuación descritos anteriormente.

En este sentido la Comunidad de Madrid, pretende instaurar para el verano de 2004 un "Plan de alerta y prevención de los efectos de olas de calor". Este Plan comprendería un sistema de alerta y vigilancia meteorológica para asegurar la alerta varios días antes de la ocurrencia del suceso, lo que permitirá alertar de manera precoz a la población y a los dispositivos sociosanitarios. Las actuaciones en sí comprenden un plan de atención a la población de especial riesgo, con vigilancia especial a la población anciana para asegurar su accesibilidad a los servicios sanitarios y un plan de apoyo social para las necesidades de alimentación, cuidado, movilidad y confort climático.

16.9.2. Contaminación atmosférica

1. Aplicación y seguimiento de las Directivas Europeas en Calidad del Aire, incluyendo la puesta en marcha de los procedimientos y las técnicas para la correcta medición y registro continuado de los contaminantes.
2. Coordinación entre los distintos Departamentos implicados (Medio Ambiente, Sanidad, Transporte, Urbanismo, Obras Públicas, Agricultura.).
3. Integración y coordinación interterritorial entre Gobierno Central y las Comunidades Autónomas.
4. Establecimiento de políticas integradas de vigilancia y protección de la salud pública, incluyendo la información sobre riesgos ambientales.
5. Acciones encaminadas a la reducción de emisiones relacionadas con los combustibles fósiles.
6. Puesta en marcha de actividades para aumentar la conciencia y participación ciudadana en las materias relacionadas con el cambio climático, esto conlleva una estrategia de comunicación encaminada a asegurar la información y a presentar la información de una manera entendible y con una orientación a como debe ser utilizada (McMichael 2003).
7. Por último es necesaria, la inversión en estudios e investigaciones para reducir las incertidumbres relevantes para la toma de decisiones (McMichael 2003).

16.9.3. Enfermedades infecciosas

En España no existe una legislación específica adaptada a las necesidades actuales para el control vectorial. Además de los programas de control de mosquitos en España han de aplicarse las regulaciones de inspección, certificación y cuarentena de los productos de comercio procedentes de zonas endémicas que puedan transportar vectores, tales como ruedas usadas o plantas exóticas como el bambú de la suerte.

Muy sucintamente, las implicaciones para las políticas las podríamos resumir en:-Fomentar y desarrollar los Programas de Vigilancia y Control de las Enfermedades de Transmisión Vectorial, con una financiación suficiente y estable. -Que estos programas estén a su vez coordinados con otros programas de vigilancia a nivel nacional. -Aunar la investigación entre los distintos grupos de investigación que trabajen en campos diferentes pertenezcan a las distintas áreas, tales como veterinaria, epidemiología, entomología, zoología y medicina. -Dotar de forma adecuada a los laboratorios de referencia y a los laboratorios asistenciales de los hospitales para el diagnóstico seguro de las enfermedades vectoriales. -Difundir el conocimiento existente mediante cursos de formación específicos en las Universidades españolas.

16.10. PRINCIPALES NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN

16.10.1. Temperaturas extremas

Las principales necesidades de investigación deberán dirigirse fundamentalmente a eliminar en lo posible las incertidumbres anteriormente descritas.

Así será necesario el análisis de las condiciones atmosféricas a la menor escala meteorológica posible que permitan establecer con la suficiente antelación la producción, intensidad y duración de un evento térmico extremo, al menos en cada provincia.

Se debería profundizar en el estudio de los mecanismos de adaptación fisiológica y el papel que juegan las variables socioeconómicas en los procesos adaptativos. Los estudios de evolución temporal, según distintos periodos de tiempo, del comportamiento de la morbi-mortalidad en los últimos años en función de los extremos térmicos se perfilan como adecuados para inferir este tipo de tendencias.

Por otro lado, es esencial la investigación a escala local del comportamiento de la morbi-mortalidad asociada a las temperaturas extremas, con especial atención a la incidencia de estos extremos en los ingresos hospitalarios según causas específicas y grupos de edad que permita discernir, si es posible, el comportamiento de cada grupo de población frente a la temperatura. Por último, se debería evaluar la efectividad y funcionamiento de los planes de actuación ante extremos térmicos en aquellos lugares donde se hayan instaurado y utilizar estas experiencias en los de nueva implementación. Todas estas iniciativas deberían estar encuadradas en un marco Europeo, de tal forma que sus objetivos, calidad y efectividad puedan ser comparados con unas referencias comunes para todos los países del mismo entorno.

16.10.21. Contaminación atmosférica

Hay un acuerdo general en que la investigación sobre los posibles impactos en salud del cambio climático debería ser llevada a cabo desde una perspectiva internacional mediante una red internacional de científicos. Por un lado, se trata de situaciones a escala mundial, que no conocen fronteras, y, por otro, se debe garantizar al máximo el intercambio de información que permita valorar las diferencias en las situaciones ambientales, sociodemográficas y de salud entre las distintas localizaciones geográficas y poblaciones. En general se trata de valorar los posibles impactos en salud asociados a cada uno de los fenómenos que constituyen el cambio climático. En el campo concreto de los *posibles efectos de la contaminación atmosférica relacionados con el campo climático* las necesidades fundamentales son:

- Establecer sistemas de vigilancia y monitoreo que incluyan información meteorológica, ambiental, de salud y sociodemográfica adecuadas con el fin de detectar cambios tempranos y poder obtener datos para otros estudios.

- Llevar a cabo estudios epidemiológicos para valorar el impacto del ozono, partículas finas y otros contaminantes relacionados con la variabilidad climática y sus tendencias sobre la salud. Dichos estudios deberían aportar pruebas sobre los efectos de dichos contaminantes incluyendo la relación dosis-respuesta y los factores que pueden modificar su efecto (mayor susceptibilidad en unos grupos de personas-, factores protectores, como por ejemplo el aumento de la capacidad antioxidante por medio de la dieta).

- También sería necesario llevar a cabo estudios epidemiológicos que valoraran los posibles beneficios de las acciones para mitigar el cambio climático.

- Desarrollar modelos para la predicción de los posibles efectos en salud de los cambios previstos en cuanto al clima y la calidad del aire. Dichos modelos deberían incluir previsiones en cuanto a las tendencias futuras en contaminación atmosférica, cambios en las características de la población y variaciones en los fenómenos meteorológicos y climáticos. Estas predicciones deberían ser validadas de manera continuada, mediante su confrontación con los datos del sistema de vigilancia.

16.10.3. Enfermedades infecciosas

Las principales líneas de investigación deberían centrarse en: -Diseño de modelos que correlacionen los parámetros climáticos con la incidencia de enfermedades infecciosas (más que modelos basados en áreas y poblaciones de riesgo). -Diseño de modelos de validación entre los datos climáticos pasados y los presentes con la frecuencia de enfermedades infecciosas transmitidas por vectores. –Realización de muestreos de poblaciones, vectores y reservorios. –Estudios de cambios en la distribución o alteración en la frecuencia de transmisión de las enfermedades más susceptibles de ser influenciadas: dengue y otros flavivirus, malaria, leishmaniosis, risckettsiosis….-Desarrollo de nuevas pruebas de diagnóstico rápido.

En relación con esto una primera iniciativa europea está empezando a dar sus primeros pasos. El Sexto Programa Marco, auspiciado por la Unión Europea, incluye entre sus temas de investigación prioritarios las enfermedades emergentes y en particular con sus relaciones con el “Cambio Global y Ecosistemas”. Tras el llamamiento realizado por la Comisión Europea de Investigación en este sentido, en el que se solicitaban expresiones de interés, se ha aceptado en 2004 una propuesta sobre Enfermedades Emergentes en un Medioambiente Europeo Cambiante (red EDEN). Esta red de excelencia está integrada por un consorcio de investigadores europeos pertenecientes a 33 países, entre los que se encuentra España, cuya finalidad es anticiparse a los efectos que los cambios medioambientales puedan ejercer sobre la salud pública en Europa, coordinando las investigaciones pertinentes en un marco científico común agrupado en estas 5 áreas principales: Paisajes, Biotopos y Hábitats; Bionómica de Vectores y Parásitos y competencia; Salud Pública y actividades Humanas; Reservorios Animales; e Integración y manejo de bases de datos. El espíritu de esta red en los próximos 5 años será identificar, evaluar y catalogar los ecosistemas y condiciones medioambientales europeos ligados al cambio global que puedan influir en la distribución espacial y temporal así como en las dinámicas de los agentes patógenos. Para ello se desarrollarán modelos predictivos de emergencia y dispersión que incluyan prevención global y regional, sistemas de alerta temprana, vigilancia, monitorización de herramientas y descripción de escenarios. Las enfermedades seleccionadas para estas investigaciones son encefalitis del Nilo occidental, enfermedad de Lyme, encefalitis transmitidas por garrapatas, fiebre del valle del Rift, Dengue, Malaria y leishmaniosis.

10.4. En resumen

Tras lo expuesto en este capítulo los autores implicados en su elaboración recomendamos encarecidamente la realización de *evaluación del posible impacto en salud del cambio climático en España,* al igual que se ha realizado en otros países como Estados Unidos (Bernard *et al.* 2001) el Reino Unido (Anderson *et al.* 2001) o Portugal (Casimiro y Calheiros 2002). Esta evaluación debería incluir la estimación cuantitativa del impacto en salud teniendo en cuenta los distintos escenarios de cambio climático y las predicciones en la estructura demográfica en nuestro país. En este sentido la Organización Mundial de la Salud ha desarrollado una metodología para la valoración de la vulnerabilidad en salud humana y la adaptación en salud pública al cambio climático (Kovats *et al.* 2003b).

Esta evaluación cumpliría los siguientes *requisitos:*

- Dar respuesta a un mandato explícito de los decisores de las políticas de salud pública y/o medio ambiente. De hecho los gobiernos nacionales tienen la responsabilidad de llevarlos a cabo, según los acuerdos de Naciones Unidas en la Cumbre del Cambio Climático.
- Perspectiva multidisciplinar, con utilización de nuevas técnicas de análisis e interpretación. Estas deberían incluir no solo las disciplinas directamente relacionadas con el tema (salud ambiental, epidemiología, climatología, medicina clínica, toxicología) sino también considerar otras disciplinas como sociología, psicología y economía.
- Prioridad a los problemas específicos en las diferentes regiones españolas, con especial atención a problemas locales concretos (por ejemplo, incremento de temperatura en ciertas áreas de la península, tormentas de polvo del Sahara en Canarias, etc.)
- El propósito de la evaluación de impacto en salud debería estar orientado a la prevención de la enfermedad y a la evaluación de las consecuencias de las medidas tomadas, incluyendo las acciones de salud pública.

La evaluación debería identificar las áreas con mayor incertidumbre, plantear necesidades de investigación y estar vinculada al sistema de vigilancia y monitoreo que se establezca (McMichael 2003).

16.11. BIBLIOGRAFÍA

Alberdi JC y Díaz J. 1997. Modelización de la mortalidad diaria en la Comunidad de Madrid 1986-1991. Gaceta Sanitaria 11:9-15.

Alberdi JC, Díaz J, Montero JC y Mirón IJ. 1998. Daily mortality in Madrid community 1986-1992: Relationship with meteorological variables. European Journal of Epidemiology 14:571-578.

Alderson MR. 1985. Season and mortality. Health Trends 17: 87-96.

Anderson HR, Derwent RG y Stedman J. 2001. Air pollution and climate change, En: Health effects of climate change in the UK. Report of the Institute for Environmental and Health, London, UK, 219-249. disponible en http://www.doh.gov.uk/airpollution/climatechange02 consultado 5 de enero de 2004.

Anderson HR, Spix C, Medina S, Schouten JP, Castellsague J, Rossi G et al. 1997. Air pollution and daily admissions for chronic obstructive pulmonary disease in 6 European cities: results from the APHEA project. European Respiratory Journal 10: 1064-1071.

APHEIS. Air Pollution and Health: a European Information System. 2001. Monitoring the Effects of Air Pollution on Public Health in Europe. Scientific report 1999-2000. Institut de Veille Sanitaire, Saint Maurice; disponible en http://airnet.org.

APHEIS. Air Pollution and Health: a European Information System. 2002. Health Impact Assessment of Air Pollution in 26 European Cities. Second year report 2000-2001. Institut de Veille Sanitaire, Saint Maurice; disponible en http://airnet.org.

Atkinson, R. W., Ross, A. H., Sunyer, J., Ayres, J., Baccini, M., Vonk, et al. 2001. Acute Effects of Particulate Air Pollution on Respiratory Admissions. Results from APHEA2 project, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 164 1860-1866.

Ballester F, Corella D, Pérez-Hoyos S y Hervás A. 1996. Air Pollution and Mortality in Valencia, Spain: a Study using the APHEA Methodology. Journal of Epidemiology and Community Health 50:527-533.

Ballester F, Corella D, Pérez-Hoyos S, Sáez M y Hervás A. 1997. Mortality as a function of temperature. A Study in Valencia, Spain 1991-1993. International Journal of Epidemiology. 26:551-561.

Ballester F, Tenías JM y Perez-Hoyos S. 2001. Air pollution and emergency hospital admissions for cardiovascular diseases in Valencia, Spain. Journal of Epidemiology and Community Health 55:57-65.

Ballester F, Michelozzi P e Iñiguez C. 2003a. Weather, climate and public health. Journal Epidemiology Community Health 57:759-760.

Ballester F, Iñíguez C, Saez M, Pérez-Hoyos S, Daponte A, Ordóñez JM. et al. 2003b. Relación a corto plazo de la contaminación atmosférica y la mortalidad en trece ciudades españolas. Med Clin. 121:684-9.

Bateson TF y Schwartz J. 2004. W.H.O. is sensitive to the Effects of Particulate Air Pollution on Mortality? A case-crossover analysisi of the effect modifiers. Epidemiology 15: 143-149.

Bernard SM, Samet JM, Grambsch A, Ebi KL y Romieu I. 2001. The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related effects in the United States. Envorinmental Health Perspectives 109(suppl 2): 177-184.

Bernasconi MV, Casati S, Péter O y Piffaretti JV. 2002. Rhipicephalus ticks infected with Rickettsia and Coxiella in Southern Switzerland (Canton Ticino). Infection, Genetis and Evolution 2: 111-120.

Biggeri, A., Bellini, P. y Terracini, B. (eds.). 2001. Meta-analysis of the Italian Studies on Short-term Effects of Air Pollution. Epidemiologia & Prevenzione 25(2).

Baldari M, Tamburro A, Sabatinelli G, Romi R, Severini C, Cuccagna G, Fiorilli G, Allegri MP, Buriani C y Toti M. 1998. Malaria in Maremma, Italy. Lancet 351(9111): 1246-7.

Braga AL, Zanobetti A y Schwartz J. 2001. The time course of weather-related deaths. Epidemiology 12: 662-667.

Burnett RT, Smith-Doiron M, Stieb D, Raizenne ME, Brook JR, Dales RE et al. 2001. Association between ozone and hospitalization for acute respiratory diseases in children less than 2 years of age. American Journal of Epidemiology 153:444-452.

Casimiro E y Calheiros JM. 2002. Human health. En: Santos FD, Forbes K y Moita R. (eds.). Climate change in Portugal: scenarios, impacts, and adaptation measures – SIAM project. Lisboa, Gradiva. Pgs. 241–300.

Cifuentes L, Borja-Aburto VH, Gouveia N, Thurston G y Davis DL. 2001, Assessing the health benefits of urban air pollution reductions associated with climate change mitigation (2000-2020): Santiago, Sao Paulo, Mexico city, and New York city. Environmetal Health Perspectives, vol. 109 Suppl 3. pgs. 419-425.

Cohen AJ, Anderson HR, Ostro B, Pandey KD, Kryzanowsky M, Kuenzly N. et al. 2003. Mortality impacts of Urban Air Pollution. En: Ezzat M, Lopez AD, Rodgers A y Murray CJL (eds.). Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors. Organización Mundial de la Salud. Ginebra.

Cuadros J, Calvente MJ, Benito A, Arevalo J, Calero MA, Segura J, y Rubio JM. 2002. *Plasmodium ovale* malaria acquired in central Spain. Emerging Infectious Diseases 8: 1506-8.

Curreiro FC, Heiner KS, Samet JM, Zeger SL, Strug L y Patz JA. 2002. Temperature and mortality in 11 cities of the Eastern of the United States. American Journal of Epidemiology 155: 80-87.

Davids RE, Knappenberg PC, Novicoff MM y Michaels PJ. 2002. Decadal changes in heat-related human mortality in the Eastern United States. Climate Research 22:175-184.

Dessai S. 2003. Heat stress and mortality in Lisbon. Part II: an assessment of the potential impacts of climate change. International Journal of Biometeorology. 48:37-44.

Díaz J, Jordán A, García R, López C, Alberdi JC, Hernández E y Otero A. 2002a. Heat waves in Madrid 1986-1997: effects on the health of the elderly. International Archives of Occupational and Environmental Health 75: 163-170.

Díaz J, García R, Velázquez de Castro F, Hernández E, López C y Otero A. 2002b. Effects of extremely hot days on people older than 65 years in Seville (Spain) from 1986 to 1997. International Journal of Biometeorology 46:145-149.

Díaz J, López C. 2003. Health impact of thermal extremes in Iberia: analysis and trends. cCASh Workshop on Vulnerability to Thermal Stresses, 5-7 May. Freiburg. Germany.

Díaz J, García R, Prieto L, López C y Linares C. 2004a. Mortality impact of extreme winter temperatures. International Journal of Biometeorology (enviado)

Díaz J, García R, Trigo R, Linares C, Valente A y Hernández E. 2004b. The impact of summer 2003 heat wave in Iberia: how should we measure it?. Climate Research (enviado).

Eager JM. 1902. Yellow fever in France, Italy, Great Briatain and Austria and bibliography of yellow fever in Europe. Yellow Fever Institute Bulletin 8:25-35.

Dominici F, Zeger SL, Zanobetti A, Schwartz J y Samet JM. 2002. Health effects of particulate matter in 10 U.S. cities: a combined analysis of morbidity and mortality outcomes. Biostatistics 1:1-17.

EMECAM. 1999. El proyecto EMECAM: Estudio español sobre la relación entre la contaminación atmosférica y la mortalidad. Revista Española de Salud Pública; 73: 165-314.

European Union Council. 1999. Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limite values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. Official Journal of the European Communities L163, 41-60. 29-6-

Eurowinter Group. 1997. Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe. Lancet 349: 1341-1346.

Fernández-Patier, R. Y Ballester, F. 2000. Objetivo 21. Mejorar la calidad del aire. En: DOYMA (ed.). Informe SESPAS 2000. Barcelona. pgs. 279-289.

Franke CR, Ziller M, Staubach C y Latif M. 2002. Impact of the Niño/Southern oscilation on visceral leishmaiasis, Brazil. Emerg Infect Dis. 8: 914-917.

García-Herrera R, Díaz J, Trigo RM, Hernández E y Dessai S. 2004. Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions. International Journal of Climatology (enviado).

Galizia A y Kinney PL. 1999. Long-term residence in areas of high ozone: associations with respiratory health in a nationwide sample of nonsmoking young adults [dsee comments]. Environmental Health Perspectives 107(8): 675-679.

Gauderman WJ, Gilliland GF, Vora H, Avol E, Stram D, McConnell R. et al. 2002. Association between air pollution and lung function growth in southern California children: results from a second cohort. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 166(1): 76-84.

Githeko AK, Lindsay SW, Confalonieri UE y Patz JA. 2000. Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis. Bulletin of the World Health Organization 78: 1136-1147.

Goldberg MS, Burnett RT, Brook J, Bailar JC, Valois MF y Vincent R. 2001. Associations between daily cause-specific mortality and concentrations of ground-level ozone in Montreal, Quebec. American Journal of Epidemiology 154(9): 817-826.

Haines A, McMichael T, Anderson R y Houghton J. 2000 Fossil fuels, transport, and public health. Policy goals for physical activity and emission controls point the same way. British Medical Journal 321: 1168-1169.

Havenit G. 2002. Interaction of clothing and thermoregulation (review). Exog Dermatology 1:221-268.

Hulme M et al. 2002. Climate change scenarios for the United Kindom: the UKCIPO2 scientific report. Norwich, Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia.

Hunter PR. 2003. Climate change and waterborne and vector-borne disease. Journal of Applied Microbiology 94(Suppl): 37S-46S.

Huynen MM, Martens P, Scram D et al. 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in Dutch population. Environmental Health Perspectives 109: 463-470.

Jerrett M, Burnett RT, Brook J, Kanaroglou P, Giovis C, Finkelstein N, et al. 2004 Do socioeconomic characteristics modify the short term association between air pollution and mortality? Evidence from a zonal time series in Hamilton, Canada. Journal of Epidemiology and Community Health 58(1): 31-40.

Jendritzky G, Staiger H, Bucher K, Graetz A y Laschewski G. 2000. The Percived Temperature. Internet workshorp on windchill. April 3-7, 2000.

Kalkstein LS. 1991. A New approach to evaluate the impact of climate on human health. Environmental Health Perspectives 96:145-150.

Kalkstein LS. 2002. Description of our Heat Health Watch-Warning Systems: their nature and extend required resources. cCASh Workshop on Vulnerability to Thermal Stresses, 5-7 May. Freiburg. Germany.

Katsouyanni K. 1995. Health effects of air pollution in southern Europe: are there interacting factors?, Environmental Health Perspectives 103 Suppl 2: 23-27.

Katsouyanni K, Schwartz J, Spix C, Touloumi G, Zmirou D, Zanobetti A et al. 1996. Short term effects of air pollution on health: a European approach using epidemiologic time series data: the APHEA protocol. Journal of Epidemiology and Community Health 50 Suppl 1: S12-8.

Katsouyanni K, Touloumi G, Samoli E, Gryparis A, Le Tertre A, Monopolis Y. et al. 2001. Confounding and Effect Modification in the Short-Term Effects of Ambient Particles on Total Mortality: Results from 29 European Cities within the APHEA2 Project. Epidemiology 12: 521-531.

Keatinge WR. 2003. Death in heat waves. British Medical Journal 327: 512-513.

Kovats S, Menne B, McMichael A, Berollini R y Soskolne C. (eds.). 2000. Climate change and stratospheric ozone depletion. Early effects on our health in Europe. W.H.O. Copenhaguen:

Kovats RS. 2000. El Niño and human health. Bulletin of the World Health Organization 78:1127-35.

Kovats RS, Bouma MJ, Hajat S, Worrall E y Haines A. 2003a. El Nino and health. Lancet 362: 1481-9.

Kovats S, Ebi KL y Menne B. 2003b. Methods of assessing human health vulnerability and public health adaptation to climate change. W.H.O. Copenhagen.

Kunst AE, Looman CWN y Mackenbach JP. 1993. Outdoor air temperature and mortality in The Netherlands: a time series analyisis. American Journal of Epidemiology 137: 331-341.

Künzli N, Kaiser J, Medina S, Studnicka M, Chanel O, Filliger P, et al. 2000. Public Health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. Lancet 356: 795-801.

Lacasaña M, Esplugues A y Ballester F. 2005. Exposure to ambient air pollution and prenatal and early childhood health effects. European Journal of Epidemiology (en prensa).

Le Tertre A, Medina S, Samoli E, Forsberg B, Michelozzi P, Boumghar A. et al. 2002 Short-term effects of particulate air pollution on cardiovascular diseases in eight European cities, Journal of Epidemiology and Community Health 56: 773-779.

Lindaren E y Gustafson R. 2001. Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change. Lancet 358: 16-18.

Lipfert FW. 2004. Air pollution and poverty: does the sword cut both ways? Journal of Epidemiology and Community Health 58(1): 2-3.

López-Vélez R y García Camacho A. 1998. Malaria, África y viajes: un triángulo de riesgo. Rev Clin Esp 198: 494-5.

Lozano A y Filipe AR. 1998. Anticuerpos a virus West Nile y otros flavivirus transmitidos por artrópodos en la población del Delta del Ebro. Rev Esp Salud Publica 72: 245-250.

Mackenbach JP, Kunst AE y Looman CWN. 1992. Seasonal variation in mortality in The Netherlands. Journal of Epidemiology and Community Health 46: 261-265.

Martínez F, Simón-Soria F y López-Abente G. 2004. Valoración del impacto de la ola de calor del verano de 2003 sobre la mortalidad. Gaceta Sanitaria 18: 250-258.

Martins MC, Fatigati FL, Vespoli TC, Martins LC, Pereira LA, Martins MA. et al. 2004. Influence of socioeconomic conditions on air pollution adverse health effects in elderly people: an analysis of six regions in Sao Paulo, Brazil. Journal of Epidemiology and Community Health 58:41-6.

McConnell R, Berhane K, Gilliland F, London SJ, Vora H, Avol E. et al. 1999. Air pollution and bronchitic symptoms in Southern California children with asthma. Environmenatl Health Perspectives 107: 757-760.

McGeehin MA y Mirabelli M. 2001. The potencial impacts of climate variability and change on temperature related morbidity and mortality in the United States. Environmental Health Perspectives 109 (suppl 2): 185-189.

McCarthy M. 2001. Uncertain impact of global warming on disease. Lancet 357:1183.

McMichael AJ y Githeko AK. 2001. Human health. En: McCarthy JJ et al. (eds.). Climate change.

McMichael AJ (ed.). 2003. Climate change and health: risks and responses. W.H.O., Geneva.
Michelozzi P, Forastiere F, Fusco D, Perucci CA, Ostro B, Ancona C. et al. 1998. Air pollution and daily mortality in Rome, Italy. Occupational and Environmental Medicine 55: 605-610.
Monath TP y Tsai TF. 1987. St. Louis encephalitis: lessons from the last decade. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene 1.37(Suppl): 40S-59S.
Mouchet J. 2000. Airport malaria: a rare disease still poorly understood. Euro Surveill 5: 75-76.
Nakai S, Itoh T y Morimoto T. 1999. Deaths from heat-stroke in Japan 1968-1994. International Journal of Biometeorology 43: 124-127.
OMS. 2003. Estado de la salud en el mundo 2002. Accesible en http://www.W.H.O..int/whr/2002/chapter4/en/index7.html
Patz JA, McGeehin MA, Bernard SM, Ebi KL y Epstein PR. 2000. The potential health impacts of climate variability and change for the United States: Executive summary of the Report Report of the Health Sector of the U.S. National Assessment. Environmental Health Perspectives 108: 367-376.
Pekkanen J, Brunner EJ, Anderson HR, Tiittanen P y Atkinson RW. 2000 Daily concentrations of air pollution and plasma fibrinogen in London. Occupational and Environmental Medicine 57: 818-822.
Pirard P. 2003. Heat wave: a climatic deadly phenomena that can be prevented. Enfermedades Emergentes 5:145-146.
Pope CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K. et al. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. Journal of the American Medical Association 287: 1132-1141.
Pope CA y Dockery DW. 1999. Epidemilogy of Particles Effects. En: Holgate ST, Samet JM, Koren H y Maynard RL. (ed.). Air Pollution and Health. Academic Press, San Diego, California. Pgs. 673-705.
Prieto L, García R, Díaz J, Hernández E y Teso MT. 2004. Minimum extreme temperatures over Peninsular Spain. Journal of Planetary Climate (En prensa).
Quenel P, Cassadou S, Declerq C, Eilstein D, Filleu L, Le Goaster C. et al. 1999. Rapport Surveillance épidémiologique 'Air & Santé'. Surveillance des effets sur la santé liés à la pollution atmosphérique en milieu urbain. Paris.
Ramsdale CD y Coluzzi M. 1975. Studies on the infectivity of tropical African strains of Plasmodium falciparum to some southern European vectors of malaria. Parassitologia 17: 39-48.
Randolph S. 2001. Tick-borne encephalitis in Europe. Lancet 358:1731-2.
Reiter P. 2001. Climate change and mosquito-borne disease. Environmenatl Health Pespectives 109(suppl 1): 141-161.
Rigau Perez JG. 1998 The early use of break-bone fever (quebranta Huesos, 1771) and dengue (1801) in Spanish. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene 59: 272-274.
Rogers DJ y Packer MJ. 1993. Vector-borne diseases, models and global climate change. Lancet 342: 1282-1284.
Rodgers DJ y Randolph SE 2000. The global spread of malaria in a future, warmer world. Science 289: 1763-1765.
Rodriguez S, Querol X, Alastuey A, Kallos G y Kakaliagou O. 2001 Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain. Atmospheric Environment 35: 2433-2447.
Sáez M, Sunyer J, Castellsagué J, Murillo C y Antó JM. 1995. Relationship between weather temperature and mortality: a time series analysis aproach in Barcelona. International Journal of Epidemiology 24:576-582.
Saez M, Ballester F, Barceló MA, Perez-Hoyos S, Tenías JM, Bellido J. et al. 2002. A combined analysis of the short-term effects of photochemical air pollutants on mortality within the EMECAM project. Environmental Health Perspectives 110: 221-228.
Samet JM, Dominici F, Zeger S, Schwartz J y Dockery DW. 2000a. The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part I: Methods and Methodologic Issues. Health Effects Institute 94, Part I.

Samet JM, Zeger SL, Dominici F, Curriero F, Coursac I, Dockery DW. et al. 2000b. The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States. Res Rep Health Eff Inst; 94(Pt 2): 5-70.

Samet JM, Dominici F, Curriero FC, Coursac I y Zeger S. 2000c. Fine Particulate Air Pollution and Mortality in 20 U.S. Cities, 1987-1994. New England Journal of Medicine 343(24): 1742-1749.

Sartor F, Snacken R, Demuth C y Walckiers D. 1995 Temperature, ambient ozone levels, and mortality during summer 1994, in Belgium, Environmental Research 70: 105-113.

Schwartz J, Spix C, Touloumi G, Bacharova L, Barumandzadeh T, Le Tertre A. et al. 1996. Methodological issues in studies of air pollution and daily counts of deaths or hospital admissions. Journal of Epidemiology and Community Health 50(Suppl 1): S3-S11.

Smoyer KE 1998. A comparative analysis of heat-wave associated mortality in St. Louis, Missouri – 1980 and 1995. International Journal of Biometeorology 42: 44-50.

Stieb DM, Judek S y Burnett RT. 2002. Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season. Journal of the Air and Waste Management Association 52(4):470-484.

Sunyer J, Castellsague J, Sáez M, Tobías A y Antó JM. 1996. Air pollution and mortality in Barcelona. J Epidemiol Community Health 50 Suppl 1:s76-s80.

Sunyer J, Spix C, Quenel P, Ponce A, Barumandzadeh T, Touloumi G. et al. 1997. Urban air pollution and emergency admissions for asthma in four European cities: the APHEA Project. Thorax 52:760-765.

Sutherst RW. 2004. Global change and human vulnerability to vector-borbe diseases. Clinical Microbiology Reviews 17:136-173.

Tamburlini G., von Ehrenstein S y Bertollini R. 2002. Children´s health and environment: A review of evidence. Environmental issue report Nº29 EEA-W.H.O. Copenhagen.

Tobias A, Galan I, Banegas JR, Aranguez E. 2003. Short term effects of airborne pollen concentrations on asthma epidemic. Thorax 58(8): 708-10.

Touloumi G, Katsouyanni K, Zmirou D, Schwartz J, Spix C, Ponce A et al. 1997. Short-term Effects of Ambient Oxidant Exposure on Mortality: A Combined Analysis within the APHEA Project. American Journal of Epidemiology 146(2): 177-185.

UNECE (Comisión de Economia de Naciones Unidas para Europa) 2003 Air pollution and climate change – tackling both problems in tandem, Ginebra: nota de prensa, 31 de enero de 2003.

Valent F, Little D, Bertollini R, Nemer LE, Barbone F y Tamburlini G. 2004. Burden of disease attributable to selected environmental factors and injury among children and adolescents in Europe. Lancet 363 (9426): 2032-9.

Viana M, Querol X, Alastuey A, Cuevas E y Rodríguez S. 2002. Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network. Atmospheric Environment 36: 5861–5875.

Ware JH, Thibodeau LA, Speizer FE, Colome S y Ferris BGJ. 1981. Assessment of the health effects of atmospheric sulphur oxides and particulate matter: evidence from observational studies. Environmental Health Perspectives 41: 255-276.

Wenzel RP. 1994. A new hantavirus infection in North America. New England Journal of Medicine 330:1004-1005.

W.H.O. 2000 Evaluation and use of epidemiological evidence for environmental health risk assessment. European Centre for Environment and Health, Bilthoven.

W.H.O. 2003. Methods of assessing human health vulnerability and public health adaptation to climate change. Health and Global Environmental Change. Series No.1.

W.H.O. 2004. Heat-Waves: risks and responses. Health and Global Environmental Change. Series No.2.

Wilkinson P, Landon M, Armstrong B et al. 2001. Cold comfort: the social and environmental determinants of excess winter mortality in England, 1986-1996. London: The Policy Press.

Working Group on Public Health and Fossil-Fuel Combustion. 1997. Short-term improvements in public health on fossil-fuel combustion: an interim report. Lancet 350: 1341-49.

ANEXO I

Listado de autores, revisores y miembros del comité de seguimiento del convenio

Autores principales

APELLIDOS Y NOMBRE	INSTITUCIÓN
Moreno Rodríguez, José Manuel (Coordinador)	Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de CC. del Medio Ambiente, Toledo. España
Aguiló Pérez, Eugeni	Universidad de las Islas Baleares, Dept. Economía Aplicada, Palma de Mallorca. España
Alonso Oroza, Sergio	Universidad de las Islas Baleares, Dept. Física, Palma de Mallorca.
Álvarez Cobelas, Miguel	Centro de Ciencias Medioambientales (CSIC), Madrid. España
Anadón Álvarez, Ricardo	Universidad de Oviedo, Dept. de Biología de Organismos y Sistemas, Oviedo. España
Ballester Díez, Ferrán	Escuela Valenciana de Estudios para la Salud (EVES), Consellería de Sanidad, Generalitat Valenciana, Valencia. España
Benito Ferrández, Gerardo	Centro de Ciencias Medioambientales (CSIC), Madrid. España
Castro Muñoz de Lucas, Manuel de	Universidad de Castilla-La Mancha, Depto. CC. Ambientales, Física de la Tierra, Facultad de CC. del Medioambiente, Toledo. España
Catalán Aguilá, Jordi	Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC), Barcelona. España
Cendrero Uceda, Antonio	Universidad de Cantabria, DCITIMAC, Facultad de Ciencias, Santander. España
Corominas Dulcet, Jordi	Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. España
Díaz Jiménez, Julio	Centro Universitario de Salud Pública, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid. España
Díaz-Fierros Viqueira, Francisco	Universidad de Santiago de Compostela; Facultad de Farmacia, A Coruña. España
Duarte Quesada, Carlos Manuel	Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, CSIC-UIB), Palma de Mallorca. España
Esteban Talaya, Águeda	Universidad de Castilla- La Mancha, Toledo. España
Estrada Peña, Agustín	Universidad de Zaragoza, Facultad de Veterinaria, Depto. de Parasitología, Zaragoza. España
Estrela Monreal, Teodoro	Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia. España
Fariña Pérez, A. Celso	Instituto Español de Oceanografía (IEO), A Coruña. España
Fernández González, Federico	Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de CC. del Medio Ambiente, Toledo. España
Galante Patiño, Eduardo	Universidad de Alicante, Centro Iberoamericano de la Biodiversidad (CIBIO), Alicante. España
Gallart Gallego, Francesc	Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaime Almera”, CSIC, Barcelona. España

García de Jalón Lastra, Diego	Universidad Politécnica de Madrid (UPM), ETSI Montes, Madrid. España
Gil Sánchez, Luis	Universidad Politécnica de Madrid, U.D. Anatomía, Fisiología y Genética Vegetal, Esc. Técnica Superior de Ingen. De Montes, Madrid.
Gracia Alonso, Carlos	Universidad de Barcelona y CREAF, Dpto. de Ecología, Barcelona. España
Iglesias López, Alfredo	Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Área de Tecnologías y Sistemas de la Información, Madrid. España
Lapieza Alustiza, Roberto	Munich-RE, Sucursal España y Portugal, Madrid. España
Loidi Arregui, Javier José	Universidad del País Vasco, Dpto. de Biología Vegetal y Ecología, Bilbao. España
López Palomeque, Francisco	Universidad de Barcelona, Barcelona.
López Vélez, Rogelio	Hospital Ramón y Cajal, Medicina Tropical y Parasitología Clínica, Servicio de Enfermedades Infecciosas, Madrid. España
López Zafra, Juan Manuel	Universidad Complutense de Madrid, Dpto. de Estadística e Investigación Operativa II, Facultad de CC.EE., Madrid. España
Luis Calabuig, Estanislao	Universidad de León, León. España
Martín Vide, Javier	Universidad de Barcelona, Depto. Geografía Física y AGR, Facultad de Geografía e Historia, Barcelona. España
Meneu Ferrer, Vicente	Universidad de Valencia, Dept. Economía Financiera, Valencia. España
Mínguez Tudela, Mª Inés	Universidad Politécnica de Madrid, Dpto. de Producción Vegetal: Fitotecnia, ETSIA, Madrid. España
Montero González, Gregorio	CIFOR- INIA, Dpto. de Selvicultura, Madrid. España
Moreno Klemming, Juan	Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Dpto. de Ecología Evolutiva, Madrid. España
Moreno Saiz, Juan Carlos	Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Biología (Botánica), Madrid. España
Nájera Ibáñez, Alfonso	Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid. España
Peñuelas Reixach, Josep	CREAF, CSIC, Unidad de Ecofisiología, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona. España
Piserra de Castro, Mª Teresa	MAPFRE. España
Ramos Sánchez, Mª Ángeles	Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Proyecto Fauna Ibérica, Madrid. España
Rosa Acosta, Diego de la	Instituto de Recusos Naturales y Agrobiología (IRNASE-CSIC), Sevilla. España
Ruiz Mantecón, Ángel	CSIC, Estación Agrícola Experimental (EAE), León. España

Sánchez-Arcilla Conejo, Agustín	Universidad Politécnica de Barcelona, CIIRC; Lab. Ingen. Marítima (LIM), Escuela de Caminos, Barcelona. España
Sánchez-Tembleque y Sánchez-Castro, Luis Jesús	Comisión Nacional de Energía (CNE), Madrid. España
Valladares Ros, Fernando	Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, Madrid. España
Vallejo Calzada, V. Ramón	Fundación CEAM; Depto. de Biología Vegetal, Unidad de Fisiología Vegetal, Facultad de Biología, Universidad de Barcelona, Barcelona. España
Zazo Cardeña, Caridad	Museo Nacional de Ciencias Naturales; Dpto. Geología, Madrid. España

Autores contribuyentes

APELLIDOS Y NOMBRE	INSTITUCIÓN
Abaurrea, J.	Universidad de Zaragoza, España
Alloza Millán, José Antonio	Fundación CEAM, Paterna, España
Alonso, Miguel	URS-Limnos, Barcelona, España
Amores, Victoria	Instituto del Agua- Univ. Granada, Granada, España
Andreu Álvarez, Joaquín	Universidad Politécnica de Valencia.Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia, España
Araujo, Rafael	Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid, España
Arco, del Marcelino	Univ. de la Laguna, Tenerife, España
Ardines Tomá, Elena	Comisión Nacional de la Energía, Madrid, España
Armengol, Joan	Univ. Barcelona- Dpto. Ecología, Barcelona, España
Artigas, Joan	Univ. Barcelona- Dpto. Ecología, Barcelona, España
Asín, J.	Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España
Ayala Carcedo, Francisco	Instituto Geológico y Minero Español, Madrid, España
Baixeras, Joaquín	Facultad de CC. Biológicas, Universidad de Valencia, Valencia, España
Bardají Azcárate, Teresa	Departamento de Geología, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid, España
Barquín, José	INR-Ecology, Massey University, Nueva Zelanda
Barral Silva, María Teresa	Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España
Barriendos, Mariano	Departamento de Astronomía y Meteorología, Universidad de Barcelona, España
Bayo, María Del Mar	Univ. Almería- Dpto. Biología Vegetal y Ecología, Almería, España

Bernal, Sussana	Univ. Barcelona- Dpto. Ecología, Barcelona, España
Boix, Daniel	Instituto de Ecología Lacustre- Univ. Girona, Girona, España
Brunet, Manola	Universidad Rovira i Virgili
Butturini, Andrea	Univ. Barcelona- Dpto. Ecología,Barcelona, España
Camacho, Antonio	Instituto Cavanilles de Biodiversidad- Univ. Valencia, Valencia, España
Camarero, Jesús Julio	CITA Zaragoza Zaragoza, España
Carranza, Juan	Universidad de Extremadura, Cáceres, España
Carrillo, Presentación	Instituto del Agua- Univ. Granada, Granada
Casas, Jesús	Univ. Almería- Dpto. Biología Vegetal y Ecología, Almería, España
Cendrero Uceda, Antonio	Universidad de Cantabria, DCITIMAC, Facultad de Ciencias, Santander. España
Chuvieco Salinero, Emilio	Universidad de Alcalá de Henares, Alcalá de Henares, España
Cirujano, Santos	Real Jardín Botánico de Madrid- CSIC, Madrid, España
Comín Sebastián, Francisco A.	Instituto Pirenaico de Ecología – CSIC, Zaragoza, España
Creus, José	Instituto Pirenaico de Ecología. CSIC, Huesca, España
Cruz Pizarro, Luis	Instituto del Agua- Univ. Granada, Granada, España
Cruz Treviño, Alberto	Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España
Chacón, José	Universida de Granada, Granada, España
Dabrio González, Cristino.J.	Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, España
Daufresne, Martin	Cemagref, Lyon, Francia
de Paz Cobo, Sonia	Universidad Pontificia de Salamanca, Madrid, España
Delibes, Miguel	Estación Biológica de Doñana, CSIC Sevilla España
Díaz de Terán, José Ramón	Universidad de Cantabria, Santander, España
Enghoff, Henrik	Museum of Natural History of Denmark, Dinamarca
Estiarte, Marc	CREAF, Barcelona, España
Ezquerra, J.	Junta de Castilla y León, León, España
Fernández, José	Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid, España
Fernández Cancio, Angel	INIA, Madrid, España
Filella, Iolanda	CREAF – UAB, Barcelona, España
Gaertner Ruiz Valdepeñas, Miguel Ángel	Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España
Galán, Encarnación	Universidad Autónoma de Madrid,Madrid, España
Galán, Carmen	Univ. Córdoba - Red Española de Aerobiología, Córdoba, España
Gallardo Andrés, Clemente	Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España
García Mozo, Herminia	Univ. Córdoba - Red Española de Aerobiología, Córdoba, España
García Díez, Eulogio	Universidad de Salamanca, Salamanca, España

Gaudes, Ainhoa	Univ. Barcelona - Dpto. Ecología, Barcelona, España
Gil Sostres, Fernando	Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España
Gimeno Nogués, Ricardo	Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España
Gómez, Crisanto	Estación Biológica de Doñana, CSIC, Sevilla, España
Gómez Martín, Belén	Universidad de Barcelona, Barcelona, España
González, Alberto	Universidad de Cantabria, Santander, España
González-Hidalgo, José Carlos	Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España
Goy, J.L.	Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Salamanca, España
Gracia, Carles	CREAF – UAB, Barcelona, España
Guijarro, José A.	Instituto Nacional de Meteorología, Centro Meteorológico en Illes Balears, España
Guttierrez Merino, Emilia	Univ. Barcelona, Barcelona, España
Hernández Barrios, Leonardo	Universidad Politécnica de Valencia.Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia, España
Hernández Díaz-Ambrona, Carlos	ETSIA- UPM, Madrid, España
Jiménez, A.	Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
Lavín González, Mª Paz	EAE-CSIC, España
Leiros de la Peña, María Carmen	Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España
Lloret, Francisco	CREAF – UAB, Barcelona, España
Loster, T.	Munich Reinsurance Company
Lucena, Juan	Univ. Málaga- Dpto. Ecología, Málaga, España
Luis Calabuig, Estanislao	Universidad de León, León, España
Luna, M. Yolanda	Instituto Nacional de Meteorología, España
Llasat Botija, Carmen	Universidad de Barcelona, Barcelona, España
Machado, María	Madrid, España
Marco, Adolfo	Estación Biológica de Doñana, CSIC, Sevilla, España
Mateos de Cabo, Ruth	Universidad San Pablo CEU, Madrid, España
Menéndez, Margarita	Univ. Barcelona- Dpto. Ecología, España
Morales, Domingo	Universidad de la Laguna, Tenerife, España
Moreno, Enrique	Instituto del Agua- Univ. Granada, España
Moreno, Félix	CSIC-IRNAS, Sevilla, España
Mösso Aranda, César	Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España
Moya, José	Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España
Muñoz, Isabel	Univ. Barcelona- Dpto. Ecología, España
Nicieza, Alfredo G.	Universidad de Oviedo, Oviedo, España
Nogales, Manuel	Instituto de Productos Naturales, CSIC, Madrid, España
Ogaya, Roma	CREAF, Barcelona, España
Papes, Mónica	University of Kansas, Lawrence, KS USA
Pardo Tornero, Angel	Universidad de Valencia, Valencia, España
Pérez Martínez, Carmen	Instituto del Agua- Univ. Granada, España
Pérez Badia, Rosa	Univ. de Castilla-La Mancha, Toledo, España
Pérez Martín, Miguel Ángel	Universidad Politécnica de Valencia.Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Valencia, España

Pérez Ramos, Beatriz	Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España
Pérez-Obiol, Ramón	Univ. Autónoma de Barcelona, Barcelona, España
Pla, E.	CREAF – UAB, Barcelona, España
Pozo Vázquez, Antonio David	Universidad de Jaén, Depto. de Física, España
Pozo, Jesús	Univ. País Vasco- Dpto. Ecología, España
Quemada Sainz-Badillos, Miguel	ETSIA- UPM , Madrid, España
Quereda, José	Universidad Jaume I, Lab. Climatología, Valencia, España
Quintana, Xavier	Instituto de Ecología Lacustre- Univ. Girona, España
Reche, Isabel	Instituto del Agua- Univ. Granada, España
Rivas-Martínez, Salvador	Centro de Investigaciones Fitosociológicas Collado-Villalba, Madrid, España
Rivas, Victoria.	Universidad de Cantabria, E.T.S.I. Caminos. Santander, España
Rodrigo, María A.	Instituto Cavanilles de Biodiversidad- Univ. Valencia, Valencia, España
Rodríguez Silva, Francisco	Universidad de Córdoba, Córdoba, España
Rodríguez-Puebla, Concepción	Universidad de Salamanca, Salamanca, España
Romaní, Anna	Instituto de Ecología Lacustre- Univ. Girona, Gerona, España
Romanyà Socoró, Joan	Universidad de Barcelona, Barcelona, España
Rosell-Melé, A.	ICREA e Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, Universidad Autonoma de Barcelona
Roura, Nuria	Universidad de Gerona, Gerona, España
Rovira Castellà, Pere	Universidad de Barcelona, Barcelona, España
Ruiz-Ramos, Margarita	ETSIA- UPM, Madrid, España
Sabaté, Santi	CREAF – UAB, Barcelona , España
Sabater, Sergi	Instituto de Ecología Lacustre- Univ. Gerona, Gerona, España
Sabater, Francesc	Univ. Barcelona- Dpto. Ecología, Barcelona, España
Sáez, J.	MAPFRE Agropecuaria
Salas Gómez, Luis	Universidad de Cantabria, Santander. España
San Miguel Ayanz, Jesús	Instituto de Medio Ambiente y Desarrollo-Sostenible, JRC, Ispra, Italia
Sánchez, A.	CREAF – UAB, Barcelona, España
Sánchez Castillo, Pedro	Univ. Granada, Dpto. Biología Vegetal, Granada, España
Sánchez-Peña, Gerardo	DGB-MMA, Madrid, España
Sanz, Juan José	MNCN – CSIC, Madrid, España
Sardinero, Santiago	Univ. de Castilla-La Mancha, Toledo, España
Sarto i Monteys, Víctor	Generalitat de Catalunya, Barcelona, España
Sau Sau, Federico	EPS-Universidad de Santiago de Compostela, La Coruña, España
Sebastiá, M. Teresa	CTFC, Lérida, España
Seco Fernández, Mª Victoria	Universidad de León, León, España
Sierra, J.P.	Universidad de Cantabria, Santander, España
Soria, Juan	Confederación Hidrográfica del Júcar, España
Soriano, Óscar	Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid, España
Soriano, B.	Consorcio de Compensaciónde Seguros, España

Stafanescu, Constantí	Museo de Granollers de CC. Naturales, Barcelona, España
Suárez, María Luisa	Univ. Murcia- Dpto. Ecología, Murcia, España
Thorndycraft, Varyl Robert	Departamento de Suelos, Instt. CC. Ambientales, CSIC, Madrid, España
Toja, Julia	Univ. Sevilla- Dpto. Ecología, Sevilla, España
Valdemoro García, Herminia	Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
Vallejo, Ramón	Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo CEAM) Valencia, España
Valor i Mico, Enric	Universidad de Valencia, Valencia, España
Vayreda, Jordi	CREAF, Barcelona, España
Vega, José Carlos	Instituto del Agua- Univ. Granada,Granada, España
Vélez Muñoz, Ricardo	Lab. Limnología, Parque Natural del Lago de Sanabria y Alrededores, Zamora, España
De Vicente, Inmaculada	Madrid, España
Vidal Abarca María, Rosario	Univ. Murcia- Dpto. Ecología, Murcia, España
Vilaplana, J.M.	Universidad de Barcelona, Barcelona, España
Villar, Luis	Centro Pirenaico de Ecología – CSIC, Jaca, Huesca, España
Wirtz, A.	Munich Reinsurance Company, Munich, Alemania
Zavala Espiñeira, Gonzalo	Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España

Revisores

APELLIDOS Y NOMBRE	INSTITUCIÓN
Acuña Fernández, José Luis	Univ. de Oviedo, Oviedo, España
Alcaraz Medrano, Miquel	Inst. Ciencias del Mar – CSIC, Barcelona España
Alcaraz, Francisco	Universidad de Murcia, Murcia, España
Almarza Mata, Carlos	Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, España
Alonso, Isabel	English Nature, Peterborough, Reino Unido
Alonso, Eva	Departamento de Sanidad, Gobierno Vasco, España
Alonso Pelegrín, Emiliano	Alonso & Asociados, Asesores Comunitarios, Bruselas, Bélgica
Álvarez Salgado, Xose Anton	Inst. Investigaciones Marinas – CSIC, Vigo, España
Álvarez Cobelas, Miguel	Centro de Ciencias Medioambientales – CSIC, Madrid, España
Arévalo, T.	ITSEMAP STM
Arrontes Junquera, Julio Marcial	Univ. de Oviedo, Oviedo, España
Ayala Carcedo, Francisco	Instituto Geológico y Minero Español, Madrid, España
Benito, M.	Periodista autónomo
Bermejo, Elena	TRAGSA, España
Berz, Gerhard	Munich Reinsurance Company, Munich, Alemania
Blasi, Carlo	Università de Roma
Bode Riestra, Antonio	Inst. Español de Oceanografía, La Coruña España
Bonnard, C.	EPFL, Lausanne, Suiza

Borja Yerro, Angel	Fundación AZTI, Pasajes, España
Brander, Keith	ICES, Copenague, Dinamarca
Burgaz, F.	ENESA
Bustamante, Javier	Estación Biológica de Doñana, CSIC, Sevilla España
Canadell, Pep	Global Carbon Project, Earth Observation Centre, CSIRO Division of Atmospheric Research, GPO Box 3023, Canberra, ACT 2601, Australia
Carballas Fernández, Tarsy	CSIC, Santiago Compostela, España
Carrión, José S.	Universidad de Murcia, Murcia, España
Casal, Mercedes	Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España
Castro, Pilar	Universidad de Alcalá de Henares Alcalá de Henares España
Connor, David John	Universidad de Córdoba, Córdoba, España
Cortina Segarra, Jordi	Universidad de Alicante, Alicante, España
Custodio Gimena, Emilio	Instituto Geológico y Minero Español, Madrid, España
Chao, Mónica	División de Medio Ambiente ITSEMAP STM, Madrid, España
Díez Herrero, Andrés	Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España
Dlugolecki, Andrew	Earlybank, Perth, Australia
Elorrieta Pérez de Diego, José Ignacio	Gobierno de Navarra, España
Elvira, Benigno	Universidad Complutense, Madrid, España
Enzel, Yehouda	Institute of Earth Sciences, Hebrew University of Jerusalem, Givat Ram, Jerusalem, Israel
Escorza Muñoz, Fernando	Comunidad autónoma de La Rioja, España
Escudero, Adrián	Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España
Estrada Millares, Marta	Inst. Ciencias del Mar- CSIC, Barcelona, España
Estrada Peña, Agustin	Universidad de Zaragoza, Facultad de Veterinaria, Depto. de Parasitología, Zaragoza. España
Estrela Monreal, Teodoro	Confederación Hidrográfica del Júcar, Comunidad Valenciana, Valencia. España
Fabregat Ventura, Vicente	Instituto Geológico y Minero Español, Madrid, España
Fernández González, Consolación	Univ. de Oviedo, Oviedo, España
Fernández Suárez, Emilio Manuel	Univ. de Vigo, Vigo, España
Fernández, Montserrat	Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España
Fons Esteve, Jaume	European Topic Centre on Terrestrial Ecosystems, EEA Bellaterra, España
Fraga Rivas, Santiago	Inst. Español de Oceanografía, Vigo, España
Fuertes, G.	Consorcio de Compensación de Seguros
Galán, Iñaki	Instituto de Salud Pública, Comunidad de Madrid, España
García Barona, Ana	Consorcio de Compensación de Seguros, Madrid, España
García García, José Frutos	Instituto de Salud Pública. Comunidad de Madrid
García, Herrera, Ricardo	Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

García Murillo, Pablo	Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla, España
García Pausas, Juli	CEAM, Valencia, España
Garcisánchez, M.	AGROSEGURO
Génova, Mar	UPM Madrid, Madrid, España
Gil Rodríguez, Maria Candelaria	Univ. de la Laguna, Tenerife, España
Gil Sostres, Fernando	Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España
Gómez, Crisanto	Universidad de Gerona, Gerona, España
Gómez Figueiras, Francisco	Inst. Investigaciones Marinas – CSIC, Vigo, España
Gómez Campoy, María Elisa	Consejería de Sanidad, Murcia, España
Gomís Bosch, Damiá	IMEDEA - Univ. Illes Balears, Palma de Mallorca, España
González, B.	MAPFRE
González Pérez, José Antonio	CSIC-IRNAS, Sevilla, España
González Vila, Francisco Javier	CSIC-IRNAS, Sevilla, España
Guerra Sierra, Angel	Inst. Investigaciones Marinas – CSIC, Vigo, España
Hernando Lara, Carmen	INIA, Madrid, España
Huescar Martínez, Augusto	Organización Mundial del Turismo, Madrid, España
Iglesias García, Ricardo	Sociedad Española de Sanidad Ambiental
Iglesias Picazo, Ana	Depto de Economía, ETS Ingenieros Agrónomos, Madrid, España
Íñiguez, Carmen	Escuela Valenciana de Salud Pública, España
Izco, Jesús	Univ. de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España
Jiménez Álvarez, Antonio	INIA, Madrid, España
Jiménez García-Herrera, José	Parque Nacional de Cabañeros - OAPN, España
Labandeira, Xabier	Universidad de Vigo, Vigo, España
Labarta Fernández, Uxio	Inst. Investigaciones Marinas – CSIC, Vigo, España
Lacasaña, Marina	Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, México.
Lavín Montero, Alicia	Inst. Español de Oceanografía, Santander, España
Lens Lourido, Santiago	Inst. Español de Oceanografía, Vigo, España
Llorens García, Pilar	CSIC, Barcelona, España
López Casares, Rosa	Sanidad Ambiental, Murcia, España
López-Abente Ortega, Gonzalo	Instituto de Salud Carlos III, Madrid, España
Loriente, M.	MAPFRE
Losada Rodríguez, Íñigo	Universidad de Cantabria, Santander, España
Loveland, Peter	European Journal of Soil Science, Rothamsted, Harpenden, UK
Lucas Fernández, Rosario	Secretaría General de Turismo Madrid, España
Lumaret, J.P.	Université Paul Valery, Montpellier III, Francia
Machado Trigo, Ricardo	Universidad de Lisboa, Portugal
Madeira, Manuel	Universidade Técnica de Lisboa, Dep. de Ciências do Ambiente, Lisboa, Protugal
Maestre, Fernando	Universidad de Duke, EE.UU.
Maganto, Gabriel	Dirección General de Política Energética y Minas, Madrid, España

Márquez, Rafael	Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid, España
Martí Boscà, José Vicente	Sociedad Española de Sanidad Ambiental, España
Martín Herrero, Javier	Consejería de Medio Ambiente- JCCM, España
Martín, Aurelio	Universidad de La Laguna, Tenerife, España
Martínez Chamorro, Jorge	Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España
Mayoral Arenas, Mercedes	Junta de Castilla-La Mancha, España
Medina Santamaría, Raúl	Universidad de Cantabria, Santander, España
Mérida Fimia, Juan Carlos	Dirección General de la Biodiversidad, Madrid, España
Millán Muñoz, Millán	Fundación CEAM, Valencia, España
Minelli, Alessandro	Università di Padova, Padova, Italia
Mingo, L. De	MAPFRE
Mira, Filomeno	MAPFRE Mutualidad Majadahonda, Madrid, España
Mirón Pérez, Isidro J.	Centro de salud Pública de Madrid, Madrid, España
Molero, Joaquín	Univ. de Granada, Granada, España
Molina Moreno, R.	Instituto de Salud Carlos III, Madrid, España
Montero, Esperanza	Univ. Complutense de Madrid, Madrid, España
Montero Rubio, Juan Carlos	Centro de Salud Pública de Madrid, Madrid, España
Morales, Rafael	Instituto del Agua- Univ. Granada, España
Moreno Delgado, José Antonio	Abengoa Madrid, España
Morillo, Cosme	Dirección General para la Biodiversidad, MMA, España
Muñoz, Jesús	Real Jardín Botánico de Madrid – CSIC, Madrid, España
Mutke Regneri, Sven	Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España
Ojeda, Fernando	Universidad de Cádiz, España
Ordóñez, José María	Instituto de Salud Pública, Comunidad de Madrid, España
Palomera Laforga, Maria Isabel	Inst. Ciencias del Mar – CSIC, Barcelona, España
Pantoja, Javier	Dirección General para la Biodiversidad, MMA, Madrid, España
Pape Möller, A.	Université Pierre et Marie Curie – CNRS, Francia
Parrilla Barrera, Gregorio	Inst. Español de Oceanografía, Madrid, España
Peco, Begoña	Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España
Pedrós Alió, Carlos	Inst. Ciencias del Mar – CSIC, Barcelona, España
Pelegrí Llopart, José Luis	Inst. Ciencias del Mar – CSIC, Barcelona, España
Penas, Ángel	Univ. de León, León, España
Peña, Carlos	Dirección General de Costas, MMA, España
Pereira, Joao S.	Universidade Tecnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomía, Lisboa, Portugal
Pérez Arriaga, Ignacio	Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España
Pérez-Morales, M.	ENESA
Perrelli del Álamo, Oscar	Exceltur, Madrid, España
Perry, Allen	University of Wales Swansea, Swansea, UK
Picatoste, José Ramón	Dirección General para la Biodiversidad, MMA, Madrid, España
Piñol, Josep	Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, España

Porta, Mikel	IMIM, Barcelona, España
Psenner, R.	Institut für Zoologie und Limnologie, Universität Innsbruck
Prats Palazuelo, Fernando	AUIA, Madrid, España
Pugnaire, Francisco	EEZA, CSIC, Almería, España
Pulido, Fernando	Universidad de Extremadura, Plasencia, Cáceres, España
Raventós Bonvehi, Josep	Universidad de Alicante, Alicante,España
Rey-Benayas, José María	Universidad de Alcalá, Madrid, España
Rincón, Pedro A.	Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid, España
Rivas-Martínez, Salvador	Centro de Investigaciones Fitosociológicas Collado-Villalba, Madrid, España
Rodá, Ferrán	CREAF - UAB Barcelona, España
Rodríguez Murillo, Juan Carlos	Centro de Ciencias Medioambientales - CSIC
Rodríguez Martínez, Jaime	Univ. de Málaga Málaga España
Rodríguez-Murillo, Juan Carlos	CCMA –CSIC, Madrid, España
Rodríguez-Vidal, Joaquín	Universidad de Huelva, Huelva, España
Rojo, Carmen	Inst. Cavanilles de Biodiversidad, Univ. Valencia, Valencia, España
Rojo Serrano, Leopoldo	Dirección General para la Biodiversidad, MMA, Madrid, España
Sáez, Marc	Universidad de Gerona, Gerona, España
Saiz Sendrós, Enric	Inst. Ciencias del Mar – CSIC, Barcelona, España
Salat Umbert, Jordi	Inst. Ciencias del Mar – CSIC, Barcelona, España
Sánchez, Benjamín	CIEMAT, Madrid, España
Sánchez, J.C.	AGROSEGURO
Sánchez Delgado, Francisco	Inst. Español de Oceanografía, Santander, España
Sánchez Sudón, Fernando	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, España
Sanz, Juan José	MNCN – CSIC, Madrid, España
Sánchez Rodrigo, Fernando	Universidad de Almería, Almería, España
Sanz Sánchez, María José	Fundación CEAM, Valencia, España
Sardá Amills, Francesc	Inst. Ciencias del Mar – CSIC, Barcelona, España
Satrústegui, J.	MAPFRE
Segur, Miguel	UNDP, Ecuador
Sousa, Arturo	Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla, sevilla, España
Tellería, Jose Luis	Universidad Complutense, Madrid, España
Tellería, Marite	Real Jardín Botánico de Madrid – CSIC, Madrid
Terradas, Jaume	CREAF – UAB, Barcelona , España
Tobías Garcés, Aurelio	Instituto Madrileño de Salud Pública, Madrid, España
Trouve, Thierry	Ministere de l'Ecologie et du Développment Durable, Paris, Francia
Valdés Santurio, Luís	Inst. Español de Oceanografía, Gijón, Oviedo, España
Valero Garcés, Blas Lorenzo	Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Zaragoza, España
Valiela, Iván	Boston University, Massachusetts, USA
Valladares, Fernando	Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, Madrid, España

Varela Rodriguez, Manuel	Inst. Español de Oceanografía, La Coruña, España
Varela Benvenuto, Ramiro	Univ. de Vigo, Vigo, Pontevedra, España
Vargas Marcos, Francisco	Ministerio de Sanidad , Madrid, España
Vega García, Cristina	Universidad de Lleida, Lérida, España
Vera Rebollo, José Fernando	Universidad de Alicante, Alicante, España
Viegas, Domingo Xavier	Universidad de Coimbra, Coimbra, Portugal
Vila, Monserrat	CREAF – UAB, Barcelona, España
Vilas Martín, Federico	Universidad de Vigo, Vigo, España
Villamarín, A.	Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, España-Portugal
Vivar, Angel Luis	Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA) Madrid, España
Zamora, Regino	Universidad de Granada, Granada, España
Zavala, Miguel Ángel	Universidad de Alcalá, Madrid, España
Zedler, Paul, H.	University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA
Zurita García, Elvira	Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

Comité de seguimiento del convenio para el proyecto ECCE

APELLIDOS Y NOMBRE	INSTITUCIÓN
Moreno Rodríguez, José Manuel (***Director/Coordinador del proyecto***)	Universidad de Castilla-La Mancha
Fernández González, Federico	Universidad de Castilla-La Mancha
Cruz Treviño, Alberto	Universidad de Castilla-La Mancha
Martínez Lope, Concepción	Oficina Española de Cambio Climático
Mora Alonso-Muñoyerro, Justo	Dirección General del Agua
Picatoste Ruggeroni, José Ramón	Dirección General para la Biodiversidad

ANEXO II

Glosario de términos científicos

Término científico	*Definición.*
Acolchado	Aplicación de una capa de residuos orgánicos sobre el suelo. Empajado. Con frecuencia se utiliza el anglicismo *mulching*.
Acreción	Acumulación y compactación de sedimentos.
Acuífero	Formación geológica subterránea con capacidad de almacenamiento y circulación de agua.
Aeroalérgeno	Sustancia capaz de provocar una reacción alérgica que se transporta a través del aire.
Aerobiología	Disciplina que trata de los elementos biológicos, en su mayoría de origen vegetal, que flotan o son arrastrados por el aire, como el polen o las esporas.
Aerosoles	Conjunto de partículas sólidas o líquidas con un tamaño típico entre 0.01 y 10 µm que pueden mantenerse en suspensión en el aire varias horas o días. Estas partículas pueden tener origen natural o antropogénico. Pueden influir sobre el clima directamente, dispersando y absorbiendo radiación, o indirectamente, actuando como núcleos de condensación sobre los que se forman las nubes o modificando las propiedades ópticas y la persistencia de las nubes.
Aforestación	Plantación de árboles y arbustos en un lugar en el que previamente no existía este tipo de vegetación.
Agente etiológico	Organismo causante de un enfermedad.
Agroseguro	Entidad que, en forma de "*pool*" de coaseguro, gestiona el llamado "seguro agrario combinado".
Albardinar	Vegetación dominada por el albardín o *Lygeum spartum*.
Albedo	Cantidad de radiación reflejada por una superficie.
Alcalinidad	Capacidad de un agua para neutralizar la acidez. Es la suma de todos los compuestos alcalinos disueltos, constituidos fundamentalmente por bicarbonato en la mayor parte de las aguas dulces.
Alóctono	Especie, sistema o formación que no es natural o propia de la zona. Exótico.
Anadromas	Especies de peces que se reproducen en los ríos pero crecen y pasan la mayor parte de su vida en el mar (ej: salmones).
Anemócora	Dícese de la planta cuyos frutos son dispersados por el viento.
Anoxia	Carencia de oxígeno.
Antracología	Disciplina paleobotánica que estudia el material carbonizado (madera) existente en depósitos arqueológicos o en capas fósiles en contexto natural (incendios naturales o provocados) con el objetivo de llevar a cabo reconstrucciones paleoambientales.
Antropogénico	Que resulta o se produce por actividades humanas.
Aportación	Volumen total de agua que fluye durante un año, usualmente referido a las salidas de un área de drenaje o cuenca fluvial.

Término científico	*Definición.*
Arqueología	Ciencia que estudia las sociedades que han existido históricamente, a través sus restos materiales.
Artrópodo	Ser vivo con apéndices articulados como los insectos. Su interés en este estudio radica en que muchos de ellos son parásitos, como las garrapatas, las pulgas o las moscas.
Arvense	Dícese de la planta que invade cultivos como mala hierba. También se aplica a las comunidades vegetales infestantes.
Asimetría fluctuante	Asimetría en caracteres presentes en ambos lados del cuerpo de organismos bilaterales que puede aparecer en ambos sentidos indistintamente en distintos individuos (lado izquierdo o derecho más desarrollado) y que puede deberse a problemas durante el desarrollo. Es un indicador posible del estado de conservación de poblaciones, mayores niveles indicarían un peor estado de conservación.
Autóctono	Especie, sistema o formación que es natural o propia de la zona.
Avenida	Elevación, generalmente, rápida en el nivel de las aguas de un curso, hasta un máximo a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor.
Backshore	Playa alta, trasplaya, zona de playa por encima del nivel medio de la pleamar.
Bahía	Entrante abierto y curvo hecho por un mar o un lago en su línea de costa.
Balance de carbono	Resultado neto de las pérdidas (principalmente por respiración) y ganancias (generalmente por fotosíntesis) de carbono en un sistema.
Balance hídrico	Cuantificación de entradas y salidas de agua en un ecosistema. Las entradas proceden de la lluvia y de los aportes desde otros ambientes próximos y desde el acuífero subterráneo. Las salidas tienen lugar por evaporación, transpiración de la vegetación e infiltración en el suelo o en el sedimento. La diferencia entre entradas y salidas es el almacenamiento de agua en el ecosistema.
Ballicar	Vegetación dominada por el ballico o *Agrostis castellana*.
Bentónico	Se aplica al organismo que vive en los fondos marinos.
Berceal	Vegetación dominada por el berceo o *Stipa gigantea*.
Biocarburante	Carburante líquido que se obtiene a partir de la biomasa.
Biodiesel	Ester que se obtiene por la reacción de un alcohol, metílico o etílico, con los ácidos grasos procedentes de la hidrólisis de los triglicéridos, de los aceites vegetales o de grasas animales, y en presencia de un catalizador.
Biodiversidad	Termino que hace referencia a la variabilidad de organismos (comúnmente especies, pero también variedades dentro de las especies) que habitan un territorio.
Bioetanol	Alcohol etílico deshidratado, que se produce por la fermentación de biomasa rica hidratos de carbono.

Término científico	*Definición.*
Biogás	Mezcla de metano y dióxido de carbono junto con trazas de otros gases, que se produce durante la digestión anaerobia la materia orgánica.
Biomasa	Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, que se puede emplear como fuente directa o indirecta de energía.
Biosfera	La parte del sistema terrestre que comprende todos los ecosistemas y organismos vivientes en la atmósfera, sobre el suelo (terrestre) o en los océanos (marino).
Biotopo	Espacio o lugar ocupado por un organismo o por una comunidad de ellos.
"*Bloom*" de algas	Crecimiento súbito, rápido y masivo de las algas microscópicas del plancton.
Caducifolio	Se aplica a los árboles o arbustos de hojas caducas, o que permanecen verdes menos de un año y caen todas a la vez al comienzo de la estación desfavorable, dejando las ramas desnudas mientras ésta dura.
Cambio global	Conjunto de las alteraciones producidas en los ecosistemas por las actividades humanas. Incluye procesos como la contaminación atmosférica, la extracción de recursos - pesca, caza - , la alteración de la biodiversidad, la desaparición y fragmentación de los hábitat, etc.
Caméfito	Planta de pequeño tamaño cuyas yemas están próximas al nivel del suelo (5-25 cm), mientras que la parte aérea es leñosa.
Capacidad de campo	Cantidad de agua retenida en un suelo después de drenar el agua de gravedad.
Carbono alóctono	Carbono de origen externo al ecosistema en donde se mide.
Carga de fondo	Cantidad de material sólido de tamaño grueso transportado a lo largo del cauce de un río por rodamiento, arrastre o saltación.
Carga de nutriente	Es el resultado de multiplicar el caudal fluvial por la concentración de un nutriente determinado.
Carpetano	Según la división fitogeográfica de la Península Ibérica, relativo a la Submeseta Norte.
Cárstico	Paisaje producido predominantemente por disolución de la roca por el agua. Los paisajes cársticos más abundantes son los calizos, pero también puede haberlos yesíferos.
Catadromas	Especies de peces que se reproducen en el mar pero crecen y pasan la mayor parte de su vida en los ríos (ej: anguila).
Caudal de base	Es el caudal fluvial aportado por el acuífero subyacente al río.
Cerveral	Vegetación dominada por la cervera o *Brachypodium ramosum*.
Cervunal	Vegetación dominada por el cervuno o *Nardus stricta*.

Término científico	*Definición.*
Chironómido	Insectos pertenecientes al grupo de los Dípteros. Sus larvas son acuáticas. Si muere la larva, su caparazón cefálico puede resistir durante muchos miles de años en el sedimento sin destruirse.
Ciclo biogeoquímico	Serie secuencial de fases por las que atraviesa la materia en un ecosistema. Se aplica con mas frecuencia a los ciclos del agua, de los nutrientes y de elementos clave como el C, N, P, O, etc.
Ciclo del carbono	Término que se usa para describir el flujo de carbono (en varias formas, como por ejemplo CO_2) a través de la atmósfera, el océano, la biosfera terrestre y la litosfera.
Ciclo Rankine	Ciclo termodinámico cerrado en el que una bomba inyecta agua a presión en una caldera donde se produce vapor, a presión constante, que se expansiona en una turbina de vapor, realiza trabajo, se condensa en un condensador y vuelve a bombear nuevamente a la caldera, con lo que se cierra el ciclo. Ciclo típico de la centrales térmicas.
Ciprínido	Grupo de peces que constituye la mayor parte de la fauna piscícola española. Lo integran las carpas, los barbos, etc.
Circulación termohalina	Circulación a gran escala de las aguas oceánicas por los contrastes espaciales en su densidad debidos a diferencias en la temperatura y la salinidad. En el Atlántico norte esta circulación consiste en un flujo de agua cálida hacia el norte en las capas oceánicas más superficiales y de agua fría hacia el sur en las capas profundas, dando lugar a un flujo neto de calor hacia el polo. El agua más superficial se hunde en determinadas regiones de latitudes altas.
Clima	Se suele considerar como el tiempo meteorológico promedio, aunque de forma algo más rigurosa se define como la descripción estadística mediante el promedio y la variabilidad de cantidades relevantes a lo largo de un periodo temporal que puede ser de meses o de miles de años. El periodo clásico es de 30 años, como establece la Organización Meteorológica Mundial. Estas cantidades relevantes son en su mayoría variables atmosféricas cerca de la superficie, como la temperatura, la precipitación y el viento. El clima en un sentido amplio es el estado del sistema climático descrito de forma estadística.
Cogeneración	Producción de electricidad y calor en un proceso combinado a partir de determinadas fuentes de energía, que resulta de eficiencia energética muy superior a los sistemas tradicionales.
Colada de tierra	Corriente de barro que contiene gran cantidad de agua.
Colmatación	Ocupación paulatina de un ecosistema acuático por los sedimentos.
Coluvión	Detritos de roca alterados que se han desplazado pendiente abajo por procesos gravitacionales o de erosión.
Conductancia estomática	Capacidad de los estomas de las hojas de dejar pasar gases (principalmente agua y dióxido de carbono) y líquidos. Inversa de la resistencia estomática.

Término científico	*Definición.*
Contaminación atmosférica	Presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgos, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza.
Contaminación difusa	Es la contaminación que no llega a un ecosistema por lugares bien localizados. Suele estar producida por las actividades agrícolas.
Copépodos	Grupo de crustáceos muy abundantes en el zooplancton marino.
Cortejo florístico	Conjunto de plantas que viven en un tipo de vegetación determinado.
Cresta de playa	Cordón paralelo a la orilla que debe su formación al oleaje.
Criófilo	Organismo adaptado a vivir a baja temperatura.
Crioromediterráneo	Subtipo térmico de clima mediterráneo correspondiente a una temperatura media anual inferior a 4ºC.
Criorotemplado	Subtipo térmico de clima templado correspondiente a una temperatura media anual inferior a 4ºC.
Criosfera	El componente del sistema climático que comprende toda la nieve y el hielo sobre existente sobre el suelo o la superficie del océano, así como el agua que se mantiene congelada en el subsuelo (permafrost).
Crioturbación	Alteración del suelo por causa de la acción continuada de hielo y deshielo del mismo.
Criptógama	Plantas sin reproducción sexual aparente. Incluye musgos, algas y helechos.
Cuenca hidrográfica	Área que tiene una salida única para su escorrentía superficial.
Culminícola	Dícese de la planta o comunidad que vive con preferencia en las cumbres de las montañas.
Datación radiométrica	Procedimiento de cálculo de la edad absoluta de las rocas y de los minerales que contienen ciertos isótopos radiactivos cuya velocidad de desintegración se conoce.
Datos proxy	Valores que sirven para estimar de manera indirecta una determinada magnitud.
Delta	Depósito aluvial con forma de abanico que se encuentra en la desembocadura de un río.
Demanda	Cantidad real de agua necesaria para diversos usos durante un período dado, condicionada por factores económicos, sociales y otros.
Demersal	Organismos que habitan próximos al fondo del mar y utilizan la fauna bentónica como recurso.
Dendrocronología	Método de datación mediante el estudio de los anillos de crecimiento de los árboles.
Deposición atmosférica	Entrada de sustancias a un ecosistema desde la atmósfera.

Término científico	*Definición.*
Deriva genética	Proceso genético por el cual tiene lugar la variación casual de determinadas frecuencias de genes. Esta variación, en ocasiones, puede causar la extinción de una especie, lo cual es un simple producto del azar.
Deriva litoral	Componente neta de transporte a lo largo de la costa cuando hay una dirección de oleaje dominante.
Desalación	Proceso de tratamiento de aguas de alta salinidad hasta hacerlas servibles para un uso concreto.
Desertificación	Degradación de la tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas.
Deslizamiento	Tipo de movimiento de ladera que se refiere a material que se desplaza pendiente abajo como una unidad a lo largo de una superficie definida.
Deslizamiento rotacional	Variedad de deslizamiento sobre una superficie cóncava, originando una depresión.
Desplazamiento traslacional	Tipo de movimiento de ladera a cada lado de un plano.
Desprendimiento	Tipo de movimiento de ladera que se refiere a la caída libre de fragmentos sueltos de cualquier tamaño.
Día extremadamente cálido (DEC)	Día en el que la temperatura máxima diaria supera la temperatura umbral para el calor.
Día extremadamente frío (DEF)	Día en el que la temperatura máxima diaria se encuentra por debajo de la temperatura umbral para el frío.
Diagrama polínico	Distribución del polen de las distintas especies en una muestra de aire o de sedimento.
Diapausa	Proceso por el cual una fase vital de un insecto permanece en un estado quiescente, con una disminución notable del metabolismo, antes de transformarse en la fase vital sucesiva. La diapausa más importante suele tener lugar antes de la transformación en adulto.
Diatomea	Alga unicelular recubierta de sílice. Sus restos permanecen durante muchos millones de años en los sedimentos lacustres y marinos.
Ecotono	Zona de transición o contacto entre dos o más ecosistemas.
Ectotérmicos y endotérmicos	Organismos que requieren de factores ambientales para modificar su temperatura corporal o que solo requieren de procesos endógenos.

Término científico	*Definición.*
Efecto invernadero	Los gases de efecto invernadero en la atmósfera absorben de forma muy eficiente la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, el mismo aire que los contiene y las nubes. La radiación atmosférica se emite hacia todas direcciones, y por tanto también hacia la superficie. Por tanto, estos gases atrapan calor en el sistema atmósfera-superficie. A esto se llama efecto invernadero natural. Un incremento en la concentración de los gases de efecto invernadero daría lugar a un incremento en la opacidad de la atmósfera a la radiación infrarroja que dicho sistema emite hacia el espacio. Esto provoca que llegue menos radiación infrarroja a las capas altas de la atmósfera, mientras que a la superficie y la troposfera llega más. Estos desequilibrios en el balance de energía sólo pueden ser compensado por un incremento en la temperatura media de la superficie y la troposfera y una disminución térmica en la alta atmósfera.
Eficiencia en el uso del agua	Cociente entre la cantidad de dióxido de carbono asimilado y la cantidad de agua transpirada por las plantas.
Eficiencia energética	Conjunto de programas y estrategias para reducir la energía que emplean determinados dispositivos sin que se vea afectada la calidad de los servicios suministrados.
El Niño	Originalmente se definía como una corriente de agua cálida que periódicamente fluye a lo largo de la costa del Ecuador y el Perú, capaz de perturbar la producción en los bancos de pesca locales. En la actualidad se considera el evento que origina una elevación de la temperatura superficial en la parte oriental del océano Pacífico ecuatorial del hemisferio sur, debida a que las aguas cálidas del área de Indonesia fluyen hacia el este, superponiéndose a las más frías de la corriente del Perú. Este fenómeno oceánico está acoplado a una anomalía en la distribución de presiones atmosféricas que debilita los vientos predominantes del oeste a lo largo del Pacífico ecuatorial y tropical, que se conoce por el nombre de Oscilación del Sur. Al fenómeno opuesto a El Niño se llama La Niña.
Endémico	Propio y exclusivo de una zona o región concreta. Se aplica con mas frecuencia a las especies biológicas.
Endemismo	Especie de distribución geográfica restringida o poco extensa, con frecuencia confinada a un país o a un accidente geográfico concreto, como una isla o archipiélago, una península, una montaña o cordillera, etc.
Endorreico	Ecosistema acuático sin salidas superficiales de agua líquida.
Energía eólica	Energía eléctrica producida por el viento.
Energía final	Energía de que dispone el consumidor para convertirla en energía útil.
Energía minihidráulica	Energía hidráulica de potencia máxima de 10 megavatios.
Energía primaria	Energía que no se ha sometido a ningún proceso de conversión.

Término científico	*Definición.*
Energía producible	Cantidad máxima de energía eléctrica que permitiría producir el conjunto de aportaciones en las condiciones más favorables.
Energía renovable	Energía que se presenta en la naturaleza de modo continuo y prácticamente inagotable.
Energía solar fotovoltaica	Energía producida por la luz solar para generar electricidad.
Energía solar térmica	Energía producida por la luz solar para usos térmicos.
ENSO	Siglas inglesas para referirse al fenómeno de acoplamiento entre El Niño y a la Oscilación del Sur en la región del Pacífico ecuatorial. Se suele producir con cierta periodicidad e induce notables anomalías en el clima de dicha región, así como de otras partes del planeta.
Entomológico	Relacionado con el estudio de los insectos.
Epidemiología	Estudio de la distribución y los determinantes de los estados o acontecimientos relacionados con la salud de determinadas poblaciones; aplicación de este estudio al control de los problemas sanitarios.
Epilimnion	Capa superior de agua, menos densa, de un lago de cierta profundidad (en España, más de 4 metros), presente durante parte de la primavera, el verano y comienzos del otoño y producida en el proceso de estratificación térmica.
Epipedión ócrico	Horizonte superficial del suelo pobre en materia orgánica y de color claro, según la Taxonomía de Suelos USA.
Erosionabilidad	Susceptibilidad del suelo a la erosión.
Erosividad	Agresividad erosiva de la lluvia, relacionada con su intensidad.
Escalas espacial y temporal	El clima puede variar en un vasto intervalo de escalas espaciales y temporales. Las escalas espaciales abracan desde la escala local (menos de 100000 km^2), la regional (de 100000 a 10 millones de km^2) y la continental (de 10 a 100 millones de km^2). Las escalas temporales van desde la mensual, la estacional o la anual, hasta la geológica (centenares de millones de años).
Escenario	En un contexto no artístico, conjunto de factores que condicionan un posible estado futuro de un sistema determinado. Esta acepción es un anglicismo ya muy extendido en castellano, que aún no recoge el Diccionario de la Real Academia de la Lengua.
Escenario climático	Una representación aceptable, y a menudo simplificada, del clima futuro basada en un conjunto consistente de relaciones climatológicas, que se construye para utilizarla explícitamente en la investigación de las consecuencias potenciales derivadas del cambio climático antropogénico. Un escenario de cambio climático es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual.

Término científico	*Definición*
Escenario de emisiones	Una representación admisible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que afecten al efecto invernadero atmosférico, basada en una serie coherente y consistente de suposiciones sobre el potencial desarrollo socio-económico o tecnológico futuro. Los escenarios de concentraciones se derivan de los de emisiones y se utilizan en los modelos climáticos para realizar proyecciones de cambio climático.
Esciófilas	Especie que tiene preferencia pro zonas oscuras o sombreadas.
Esclerofilo	Dícese de las plantas cuyas hojas son duras y coriáceas.
Escorrentía	Movimiento del agua sobre la superficie del suelo por efecto de la gravedad.
Esfagno	Grupo de musgos.
Espartal	Vegetación dominada por el esparto o *Stipa tenacissima*.
Especiación	Proceso evolutivo por el cual surge una especie biológica nueva.
Especie oportunista	Especie adaptada a un amplio rango de condiciones ambientales. Suele ser de crecimiento rápido.
Espeleotemas	Formaciones minerales que se producen en las cuevas como estalactitas, estalagmitas, columnas y cortinas. Su estructura y composición química revelan rasgos ambientales como la temperatura durante su formación.
Esporozoito	Forma de transmisión de *Plasmodium,* causante de la malaria, a través de la saliva del mosquito vector.
Esquizogonia	Fisión múltiple asexual de las células.
Estadio isotópico del oxígeno marino 3	Uno de los cinco estadios del último ciclo glacial (último millón de años) determinado por la composición isotópica del oxígeno de las conchas de foraminíferos en el mar. La proporción de ^{18}O informa sobre la cantidad de hielo en el mar y la temperatura del agua profunda.
Estadío sucesional	Fase de la sucesión ecológica.
Estancia media	Número medio de pernoctaciones en cada viaje.
Estenócora	Especie de distribución geográfica restringida.
Estenoterma	Especie que sólo puede vivir en un rango limitado de temperatura.
Estequiometría	En ecología, estudio cuantitativo de las relaciones entre elementos químicos, tanto en la composición de los organismos como en forma de nutrientes inorgánicos asimilables en el medio.
Estivación	Paralización o ralentización de los procesos fisiológicos y conductuales durante el verano.
Estomas	Abertura microscópica en la epidermis de las partes verdes de los vegetales que permite el intercambio de gases y líquidos con el exterior.

Término científico	*Definición.*
Estratificación	Situación en el que la columna de agua presenta diferencias de densidad que provoca que sean inmiscibles para un nivel natural de agitación. Se produce por cambios de salinidad y temperatura, sobre todo en las capas superiores de los océanos. Impide el flujo de nutrientes entre las capas inferiores y las superiores limitando la producción del fitoplancton.
Estratificación térmica	En un ecosistema acuático estancado, proceso físico por el cual el aumento de la radiación solar en primavera y el viento producen capas de agua de densidad creciente desde la superficie hasta el fondo.
Estrés hídrico	Estado de los organismos sometidos a insuficiente suministro de agua.
Estuario	Zona de la desembocadura de un río en el mar en la que se mezclan las aguas dulces y saladas.
Eurosiberiano	Perteneciente o relativo a la región corionómica Eurosiberiana, que abarca la mayor parte de la Europa de clima templado y boreal.
Eutrófico	Dícese del ecosistema acuático con mucha materia orgánica.
Eutrofización	Proceso bioquímico por el cual un ecosistema acuático aumenta paulatinamente la cantidad de materia orgánica que alberga como resultado de la entrada de gran cantidad de sustancias nutritivas que son usadas por las plantas para crecer desmesuradamente. Los procesos de eutrofización tienen lugar poco a poco durante varios años, pero luego son difíciles de revertir.
Evapotranspiración	Cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración vegetal.
Evapotranspiración potencial	Cantidad total de vapor de agua que potencialmente se transferiría a la atmósfera por evapotranspiración si hubiera disponibilidad ilimitada de agua.
Evapotranspiración real	Suma de las cantidades de agua evaporadas del suelo y de las plantas cuando el terreno se encuentra con su contenido natural de humedad.
Exposición	Proximidad o contacto –o ambos- con una fuente de un agente causante de enfermedad, de tal manera que pueda tener lugar la transmisión efectiva de dicho agente o sus consecuencias perjudiciales.
Extremo climático	Un promedio de las situaciones meteorológicas extremas que se producen a lo largo de un cierto periodo de tiempo. Una situación meteorológica extrema es un acontecimiento raro dentro de la distribución estadística de referencia en un determinado lugar, como por ejemplo el percentil 10 o el percentil 90 de dicha distribución.
Facies sedimentaria	Tipo de sedimentos, caracterizado por los minerales que lo componen.
Facilitación	Se aplica al efecto beneficioso de una especie sobre otra particularmente durante la fase de establecimiento.

Término científico	*Definición.*
Fenalar	Vegetación dominada por *Brachypodium phoenicoides*.
Fenología	Ciencia que estudia los ciclos biológicos de las especies y ecosistemas en relación con los ciclos climáticos y estacionales. Los principales eventos fenológicos que se registran son el momento de la producción de flores, hojas y frutos por las plantas, la aparición de aves migradoras y la aparición de adultos de insectos como mariposas o escarabajos.
Finícola	Se aplica a plantas o comunidades que viven próximas al borde de su área de distribución.
Fitófago	Animal que se alimenta de vegetales.
Fitoplancton	Organismos microscópicos vegetales que viven suspendidos en el agua en los ecosistemas acuáticos.
Flecha litoral	Acumulación elongada de arena o grava que se proyecta desde la costa hacia una masa de agua.
Flora	Conjunto de los taxones vegetales de un territorio cualquiera o de un hábitat o ecosistema determinado.
Flora vascular	Conjunto de especies de plantas de un territorio dotadas de vasos conductores.
Flysch	Nombre que se da a las formaciones sedimentarias masivas potentes, mayoritariamente turbidíticas, depositadas en regiones orogénicas antes de su deformación.
Foreshore	Playa baja, anteplaya, zona de la playa situada entre los niveles de pleamar y bajamar.
Forma cuadrática	Ecuación de segundo grado.
Forzamiento radiativo	Es el cambio neto en la irradiancia vertical (expresada en vatios por metro cuadrado, $W \cdot m^{-2}$) en la tropopausa a causa de una alteración interna o un cambio en el forzamiento externo del sistema climático, como por ejemplo una variación en la concentración de CO_2 o de la emisión de radiación solar.
Fotoinhibición	Proceso por el cual la luz solar excesiva inhibe parcialmente un proceso metabólico, como la fotosíntesis por ejemplo.
Fotooxidación	Proceso por el cual la luz solar oxida determinadas sustancias.
Garantía	Relación entre el número de periodos en que han quedado cubiertas las necesidades hídricas y el número de periodos en los que el agua ha sido demandada.
Gases de efecto invernadero	Son aquellos constituyentes gaseosos de la atmósfera, naturales o antropogénicos, que absorben y emiten radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad origina el efecto invernadero. El vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3) son , por ese orden, los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre.

Término científico	*Definición.*
Gasoducto	Conducción que permite el transporte, a alta presión y a gran distancia, de un gas combustible.
Geliturbación	Conjunto de fenómenos edáficos que implican movimientos de materiales particulados causados por la congelación y descongelación reiteradas del agua del suelo. Este término incluye la *crioturbación* y la *gelifluxión* o *solifluxión*.
Geotopo	Unidad de paisaje de escala inferior a 1:1000.
Germinadora	Se aplica a una planta cuya estrategia principal de establecimiento es mediante germinación de sus semillas, en oposición a las rebrotadoras. Se emplea habitualmente para el establecimiento tras una perturbación como el fuego.
Gestión del sistema	Utilización controlada de un sistema de recursos de acuerdo con objetivos predeterminados.
Gigavatio-hora	Medida de energía igual a un millón de kilovatios-hora. GWh.
Gota fría	Embolsamiento aislado de aire relativamente frío que provoca una gran inestabilidad vertical capaz de generar cuantiosas y torrenciales precipitaciones si permanece durante suficiente tiempo sobre la misma región geográfica y existe un importante aporte o flujo de vapor de agua en la baja atmósfera. Técnicamente se conoce por el nombre de "depresión aislada en altura", o por el acrónimo DANA.
Gramal	Vegetación dominada por la grama o *Cynodon dactylon*.
Hábitat	Es el ambiente físico o conjunto de factores mesológicos (luz, clima, suelo, etc.) en los que vive una especie o una comunidad biótica.
Heliófilas	Especie que tiene preferencia por lugares bien soleados o muy expuestos al sol.
Helminto	Gusano, normalmente de vida libre y tamaño generalmente microscópico. Algunas especies son parásitos internos de los animales domésticos del hombre, algunos de ellos de varios centímetros de longitud.
Helófito	Planta anfibia cuyas hojas salen del agua, pero conservando porciones del tallo sumergidas en ella durante parte o todo el año.
Hibernación	Paralización o ralentización de los procesos fisiológicos y conductuales durante el invierno.
Hidrograma	Expresión gráfica de la variación del caudal a lo largo del tiempo.
Hidroperiodo	Duración del año en que una parte de un humedal está encharcado.
Hidrosfera	El componente del sistema climático que comprende el agua líquida superficial o subterránea, como los océanos, ríos, lagos, acuíferos, etc.
Higrófilo	Se aplica a las plantas o comunidades que apetecen y viven en medios muy húmedos.

Término científico	*Definición.*
Higroturboso	Zona de turbera muy encharcadiza.
Hinterland	Entorno, área de influencia.
Hipertrófico	Dícese del ecosistema acuático con muchísima materia orgánica.
Hipolimnion	Es la capa más profunda y densa de un ecosistema acuático estancado durante la estratificación térmica.
Histéresis	Dependencia de un proceso de los valores precedentes, es decir, de su historia pasada.
Holoceno	Periodo geológico que abarca los pasados 10.000 años.
Homeotermos y heterótermos	Organismos que mantienen una temperatura corporal constante o que muestran una temperatura corporal variable.
Hospedador	Organismo en el que habita un parásito.
Incertidumbre	Una expresión del grado de desconocimiento de un valor, como por ejemplo el futuro estado del sistema climático. La incertidumbre puede ser el resultado de una falta de información o de un desacuerdo sobre lo que se conoce o puede conocerse. Puede haber muchos tipos de fuentes de incertidumbre, desde los errores cuantificables en los datos observados a los conceptos ambiguamente definidos o incertidumbres en las proyecciones del comportamiento humano. La incertidumbre puede por tanto representarse por medidas cuantitativas, como por ejemplo un intervalo de valores calculados por varios modelos, o por consideraciones cualitativas como el análisis de un grupo de expertos.
Indicador isotópico	Isótopo estable de carbono, nitrógeno u oxígeno que, en combinación con otros, sirve para datar una masa de agua o sugerir procesos que han tenido lugar en ella en épocas pasadas más o menos lejanas.
Índice canadiense FWI	Índice de peligro desarrollado en Canadá y puesto a punto en 1970, utilizado ampliamente en numerosos países. Se basa en datos meteorológicos recogidos diariamente.
Índice de peligro de incendio	Es un número que refleja anticipadamente la posibilidad de que se produzca un incendio, así como la facilidad de que se propague, de acuerdo con las condiciones de la vegetación. Los índices de peligro dependen de varios factores, pero normalmente se establecen a partir de las condiciones meteorológicas.
Infiltración	Flujo de agua que penetra en un medio poroso a través de la superficie del suelo.
Inframediterráneo	Subtipo térmico de clima mediterráneo correspondiente a una temperatura media anual superior a 19ºC.
Intensidad del fuego	Término que, en general, hace referencia a la energía calorífica liberada por el fuego. Comúnmente, se usa para referirse a la intensidad lineal del frente de avance del fuego, en cuyo caso representa la intensidad calorífica liberada por unidad de frente de avance y de tiempo, y se expresa en kW/m.

Término científico	*Definición.*
Intensidad energética	Relación entre el consumo final de energía y el Producto Interior Bruto.
Intercepción foliar	Proceso por el cual la precipitación es atrapada y retenida por la vegetación (capa de humus y follaje) y puede luego perderse por evaporación sin alcanzar el suelo.
Intrusión salina	Penetración de agua de mar en los acuíferos costeros causando una salinización del agua subterránea.
Isótopos estables	Formas de un elemento que tienen el mismo número de protones y distinto número de neutrones. Los isótopos estables son los que permanecen en los sistemas naturales durante periodos de tiempo largos y dan información sobre procesos dinámicos, ciclos biogeoquímicos, etc. Los mas habituales en investigaciones ecológicas son los del C, N, O y H.
Keuper	Facies sedimentaria correspondiente al período Triásico, representada por depósitos de yesos y margas.
Kilovatio	Unidad de potencia eléctrica que equivale a mil vatios. kW.
Kilovatio-hora	Medida de energía igual a mil vatios-hora. kWh.
Lastonar	Vegetación dominada por lastones o gramíneas vivaces cespitosas xerófilas de hojas largas y rígidas, generalmente de los géneros *Brachypodium, Avenula, Helictotrichon, Elymus*, etc.
Lauroide	Se aplica a las plantas cuyas hojas son similares a las del laurel, es decir, son perennes, anchas, lampiñas y un tanto lustrosas.
Lenítico	De aguas estancadas.
Limnético	Propio de las aguas dulces.
Litosfera	La capa más externa de la Tierra sólida, tanto continental como oceánica.
Llanura aluvial	Fondo plano de los valles originados por los depósitos del material arrastrado por los ríos.
Lótico	De aguas corrientes.
Macroescala	Escala que comprende los fenómenos meteorológicos con una dimensión horizontal mayor de centenares de kilómetros y cuya duración típica es del orden de días a meses.
Macrófito sumergido	Planta acuática que reside durante todo su ciclo vital por debajo de la superficie del agua.
Malacofilo	Se aplica a plantas cuyas hojas son finas y ligeras y se renuevan con frecuencia.
Manchas solares	Zonas oscuras y frías de la superficie del sol cuya cantidad varia periódicamente. Se relacionan con la aparición de alteraciones eléctricas y magnéticas en la Tierra así como con variaciones climáticas. Un aumento del número de manchas se traduce en una mayor intensidad de actividad solar.
Marcescente	Se aplica a las hojas (o a las plantas que las poseen) que se secan sin desprenderse de la planta inmediatamente.

Término científico	*Definición.*
Marea astronómica	Movimiento periódico de ascenso y descenso de las grandes masas de agua como resultado de la atracción gravitatoria que el Sol y la Luna ejercen sobre la Tierra. Es más aparente en la costa donde sus efectos aparecen normalmente amplificados.
Marea meteorológica	Diferencia (positiva) entre el nivel de una marea y el correspondiente a la marea astronómica en ese mismo momento. Este ascenso se produce por efecto de las condiciones meteorológicas, principalmente el viento y las bajas presiones atmosféricas.
Marea roja	Aumento de la concentración de ciertos organismos del plancton (particularmente dinoflagelados) causantes de cambios en la coloración del agua debido a que poseen pigmentos rojos con los que captan la luz. En algunos casos están formados por organismos productores de toxinas que se pueden acumular en organismos marinos filtradores (p.e. mejillones) y por consumo de estos afectar al hombre.
Marjal	En el entorno de los estuarios o desembocaduras de los ríos en el mar, el marjal es el tramo alto del estero, siendo éste la cintura costera que se sitúa entre la pleamar y la bajamar y es por tanto susceptible de ser inundada en las mareas altas.
Mediterráneo	Este término, que se refiere al mar Mediterráneo y a sus territorios ribereños cuando se habla en términos geográficos (o incluso históricos, políticos o culturales), ha sido usado con sentidos particulares en el ámbito de la Geobotánica y de la Climatología. 1. En Biogeografía se refiere a los taxones, comunidades o tipos de vegetación en sentido amplio que viven o caracterizan la región Mediterránea o son representativos de ella. 2. En Bioclimatología se refiere al tipo de clima mediterráneo, en general aquel tipo no tropical (diferencia térmica sustancial entre el invierno y el verano) que sufre de sequía estival mientras que en el resto de las estaciones se atenúa el déficit hídrico con precipitaciones más abundantes; para Rivas-Martínez, el clima mediterráneo se amplía a cualquier clima extratropical en el que los veranos sean secos.
Megafórbico	Perteneciente o relativo a las *megaforbias* o plantas herbáceas vivaces y de gran talla; en general se excluye a las gramíneas o plantas graminoides, con lo que el término se suele referir a las de hojas anchas.
Megavatio	Unidad de potencia eléctrica que equivale a un millón de vatios. MW.
Megavatio-hora	Medida de energía igual a un millón de vatios-hora. MWh.
Mesoescala	Escala que comprende los fenómenos meteorológicos con una dimensión horizontal del orden de unos pocos kilómetros a decenas de kilómetros, con una duración típica entre 1 hora y 1 día.
Mesofítico	Adjetivo aplicado a plantas que viven en medios con disponibilidad de agua intermedia.

Término científico	*Definición.*
Mesomareal	Aplicado a zonas costeras donde el rango mareal oscila entre 2 y 4 metros.
Meteorización	Proceso geológico por el cual las rocas se van destruyendo por obra de los agentes atmosféricos.
Micromareal	Aplicado a zonas costeras donde el rango mareal es menor de 2 metros.
Millardo	Mil millones.
Mineralización	Transformación de la materia orgánica en inorgánica por acción bacteriana.
Mitigación	Intervención humana para reducir las fuentes o incrementar los sumideros de gases de efecto invernadero.
Mix de generación	Combinación de las distintas tecnologías disponibles en la producción de electricidad.
Morbilidad	Cualquier separación, subjetiva u objetiva, del estado de bienestar fisiológico o psicológico. En este contexto, los términos *enfermedad, trastorno y estado mórbido* se definen de forma similar y se consideran sinónimos.
Mutualismo	Relación entre dos especies en la que ambas encuentran beneficio de la misma.
NAO	Corresponde a las siglas inglesas de la llamada Oscilación del Atlántico Norte que técnicamente consiste en las variaciones opuestas de la presión atmosférica superficial media en las zonas de Islandia y de las Islas Azores. En promedio, entre las bajas presiones en Islandia y las altas en las Azores se genera una corriente atmosférica del oeste que transporta sistemas de baja presión, con sus frentes asociados, hacia Europa. La diferencia de presión entre Islandia y las Azores fluctúa en escalas de días a décadas, e incluso llega a invertirse ocasionalmente. Cuando esta oscilación alcanza valores extremos de un signo u otro, ocasiona notables anomalías en las distribuciones típicas de temperatura y precipitación a lo largo de Europa y el Mediterráneo occidental.
Nemátodo	Ver helminto.
Nitrificación	Proceso bioquímico, ejecutado por determinadas bacterias, por el cual el amonio presente en aguas o sedimentos es transformado en nitrato.
Nivel piezométrico	Nivel de las aguas subterráneas en una zona de un acuífero.
Nivel trófico	Nivel que ocupa un organismo en la escala de alimentación relativo a los productores primarios que son aquellos que no se nutren de otros organismos.
No linealidad	Se dice que un proceso es “no lineal” cuando no existe una relación proporcional entre la causa y el efecto. En el sistema climático hay numerosos procesos no-lineales, lo que hace que dicho sistema tenga un comportamiento muy complejo.

Término científico	*Definición.*
Nutriente	Compuesto químico imprescindible para el crecimiento vegetal. Los principales son los de carbono, nitrógeno y fósforo.
Ola de calor	Conjunto de varios días extremadamente cálidos sucesivos.
Ola de frío	Conjunto de varios días extremadamente fríos sucesivos.
Oligotrófico	Medio o sistema pobre en nutrientes.
Ombrófilo	Dícese de plantas y comunidades que necesitan climas lluviosos.
Ombrotérmico	Se aplica a índices o diagramas climáticos que tienen datos de precipitación y temperatura.
Ombrotipo	Valor que expresa el cociente entre la precipitación media en milímetros y el sumatorio en grados centígrados de aquellos meses cuya temperatura media es superior a cero grados centígrados. Los ombrotipos que se reconocen son: ultrahiperárido, hiperárido, árido, semiárido, seco, subhúmedo, húmedo, hiperhúmedo y ultrahiperhúmedo.
Ombrotrófico	Dícese del vegetal que recibe sus nutrientes únicamente del agua de lluvia.
Oretano	Según la división fitogeográfica de la Península Ibérica, relativo al valle del Tajo occidental.
Orófilo	Se aplica a las plantas y tipos de vegetación que son propias de las zonas elevadas en las altas montañas.
Oscilación eustática	Cambio del nivel del mar global debido al variaciones en el volumen global de agua oceánica y no a movimientos locales de los continentes.
Ostrácodo	Grupo de crustáceos microscópicos, recubiertos de caparazón, cuyos restos suelen conservarse bastante bien en los sedimentos durante mucho tiempo.
Paleocrecida	Aumento súbito del nivel de un río producido en tiempos pasados, y que puede reconstruirse a partir de las evidencias sedimentarias.
Paleontología	Ciencia que estudia los restos fósiles del pasado geológico.
Palinología	Ciencia que se ocupa del análisis del polen permitiendo la reconstrucción de la vegetación de épocas pasadas.
Paquete turístico	Producto que se comercializa de forma única y que contiene dos o más servicios de carácter turístico (alojamiento, manutención y transporte), por el que abona un precio, dentro del cual el consumidor no es capaz de establecer un precio individual para cada servicio.
Parametrización	En los modelos climáticos se utiliza este término para referirse a la técnica de representar procesos que no pueden ser explícitamente resueltos en la resolución espacial o temporal del modelo, es decir procesos de escala menor que las celdillas del modelo, utilizando para ello relaciones entre el efecto promedio de tales procesos sub-celdilla y el flujo (atmosférico u oceánico) a escala mayor que puede resolver las ecuaciones del modelo climático.

Término científico	*Definición.*
Parámetros orbitales	Excentricidad de la órbita terrestre, inclinación del eje y precesión del eje. Su variación periódica afecta a la cantidad y duración de la insolación de las diferentes zonas del globo modificando el clima.
Parasitoide	Organismos que parasitan a otros pero que llevan indefectiblemente a la muerte del hospedador.
Partenogenético	Dícese del ser vivo que se reproduce sin la aportación genética del macho.
Pascícola	Perteneciente o relativo a los pastos, vegetación herbácea susceptible de ser comida por el ganado.
Patrones de variabilidad del clima	La variabilidad natural del sistema climático, y en particular la que se produce en escalas de tiempo estacionales o mayores, que se debe a las características no-lineales de la circulación atmosférica o a las interacciones con la superficie oceánica o el suelo, ocurre predominantemente siguiendo unos determinados patrones espaciales. Estos patrones, también se llaman regímenes o modos. Los ejemplos más conocidos son la conjunción entre El Niño y la Oscilación del Sur, que se conoce por las siglas inglesas ENSO, y la llamada Oscilación del Atlántico Norte conocida por las siglas inglesas NAO.
Pelágico	Comunidades de organismos u que viven en la columna de agua, bien suspendidos (plancton) o mediante natación activa (necton).
Pequeña Edad de Hielo	Pulsación fría producida en el Hemisferio Norte entre el siglo XVI y el XIX.
Percentil	Si se ordena un conjunto de datos por su magnitud y se divide en cien partes iguales, a cada una de ellas se llama percentil. Así el percentil 10 corresponde un valor de una determinada población de datos tal que hay un 10% de ellos que tiene una magnitud menor o que hay un 90% de datos con una magnitud mayor que la de dicho percentil.
Pernoctación	Cada una de las noches que un viajero permanece o está registrado en un establecimiento de alojamiento colectivo o privado.
Perturbación	Por lo común, se entiende por perturbación una alteración episódica y brusca de las condiciones ambientales que provoca una pérdida o limitación de la biomasa en una comunidad, V. gr. un incendio, una avalancha de nieve o de piedras, una inundación, una remoción del terreno, la incidencia masiva de grandes herbívoros, una plaga por insectos u hongos, etc.
Pirófita	Especie (generalmente de planta) que se encuentra en zonas afectadas por incendios.
Plancton	Conjunto de organismos microscópicos (tamaño inferior a 1 cm) que viven en suspensión en el agua.

Término científico	*Definición.*
Planta superior	Planta con tejidos definidos para el transporte de sustancias entre unas partes y otras del vegetal. Son la mayoría de las que vemos a simple vista.
Plantas C3	Plantas que fijan el dióxido de carbono directamente en una molécula de cinco carbonos, la ribulosa 1,5-difosfato.
Plantas C4	Plantas que fijan inicialmente el dióxido de carbono en una molécula de tres carbonos, el fosfoenolpiruvato, proceso que tiene lugar en un tejido diferenciado.
Plasticidad fenotípica	Capacidad de un genotipo determinado de dar lugar a distintos fenotipos en función del ambiente.
Plecóptero	Grupo de insectos, tiene larvas acuáticas.
Plioceno	Se dice de la quinta época del período terciario, que abarca desde hace cinco millones de años hasta hace dos millones de años.
Poliducto	Conducción destinada al transporte de hicrocarburos o de productos terminados.
Poliploidía	Posesión de dos o más series completas de cromosomas por parte de un organismo.
Potencial hídrico	Diferencia entre el potencial químico (o energía libre) de un mol de agua dado y el potencial químico del agua pura a iguales condiciones de presión y volumen. Es la variable más utilizada para describir el estado hídrico de las plantas y el suelo. Varía entre cero (estado hídrico más favorable) y valores negativos. En general, aplicado a las plantas, cuánto más negativo es el potencial hídrico, mayor es el grado de estrés hídrico padecido.
Predicción climática	Es el resultado de un intento para producir una descripción o estimación más probable sobre la evolución real del clima en el futuro.
Primas devengadas brutas	Primas devengadas en seguro directo más primas devengadas en reaseguro aceptado.
Producción primaria	Cantidad de energía electromagnética solar (luz) o energía química asimilada por los organismos foto y quimi-autótrofos, que permite la reducción de compuestos inorgánicos y su transformación en materia orgánica. Se expresa como biomasa producida por unidad de tiempo y superficie o volumen.
Producción secundaria	Producción de los animales.
Productividad	Capacidad o grado de producción de un sistema. Se suele aplicar al incremento neto de biomasa por fotosíntesis.
Progradación	Estructura que implica crecimiento hacia fuera mediante la acumulación de depósitos.
Propiedades termohalinas	Propiedades de una masa de agua relacionadas con su temperatura y su salinidad. Tiene influencia en la circulación marina y en propiedades como la estratificación.

Término científico	*Definición.*
Protocolo de Kyoto	Es un tratado internacional acordado en 1997 en la ciudad japonesa de Kyoto según el cual el conjunto de los países firmantes se comprometen a reducir durante el periodo 2008-2012 la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero al menos un 5 por ciento respecto a los niveles de 1990.
Proyección climática	Simulación con un modelo de la respuesta del sistema climático a escenarios de emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles basados en suposiciones sobre el desarrollo socio-económico o tecnológico futuro que pueden o no producirse. y por tanto están sujetas a una incertidumbre objetiva.
Psicroxerófilo	Término que se aplica a plantas y comunidades que viven en ambientes fríos y secos como los de la alta montaña.
Pulviniforme	De forma almohadillada.
Punto caliente (*hot-spot*) de biodiversidad	Ser aplica este término a lugares geográficos caracterizados por sus elevados valores de diversidad de especies de organismos.
Punto de marchitez	Contenido de agua en el suelo retenido a una tensión suficiente como para no ser accesible a la planta.
Quionófilo	Se dice de vegetales o comunidades que tienen afinidad por la nieve o incluso que requieren estar cubiertos por ella durante un largo período del año.
Rambla	Lecho de un curso de agua, generalmente seco, propio de la zona mediterránea, que ocasionalmente conduce un torrente después de una lluvia intensa.
Realimentación	Un mecanismo de interacción entre procesos en el sistema climático, de manera que el resultado de un proceso inicial induce cambios en un segundo proceso que a su vez influye en el inicial. Se dice que la realimentación es positiva cuando intensifica el proceso original y negativa cuando lo debilita.
Rebrotadora	Se aplica a una planta cuya estrategia principal de establecimiento tras una perturbación como el fuego es mediante la emisión de nuevos brotes a partir de una cepa, rizoma o tubérculo, en oposición a las germinadoras.
Recarga	Proceso por el cual se aporta agua del exterior a la zona de saturación de un acuífero, bien directamente a la misma formación o indirectamente a través de otra formación.
Reciclaje	Utilización de un recurso hídrico en el mismo proceso que lo generó.
Reclutamiento	Incorporación de nuevos individuos a una población explotada. Se diferencia de la natalidad en que los individuos ya tienen una edad cuando se reclutan, y por tanto han sufrido mortalidad. Es decir, no se reclutan todos los individuos nacidos.
Recurso no consumible	Recurso que no se agota con el uso.
Red foronómica	Conjunto de estaciones de aforo instaladas en los ríos.

Término científico	*Definición.*
Red trófica	Red de transferencia de energía entre las especies de un ecosistema que se produce por consumo o alimentación de unas especies sobre otras.
Redundancia funcional	Equivalencia entre dos o más organismos respecto de su aportación al funcionamiento del ecosistema.
Reforestación	Plantación de árboles y arbustos en un lugar en el que existía este tipo de vegetación en tiempos pasados pero desapareció o se encuentra en mal estado.
Regeneración de nutrientes	Procesos conjuntos de mineralización de materia orgánica y excreción de materia inorgánica dentro de un mismo ecosistema.
Régimen de humedad údico	En la Taxonomía de Suelos USA, suelos sin sequía estival.
Régimen de humedad ústico	En la Taxonomía de Suelos USA, suelos con sequía estival moderada.
Régimen de incendios	Es el patrón medio de ocurrencia de incendios en un determinado territorio. Incluye la frecuencia, la estacionalidad, la intensidad o el tamaño medio de los incendios.
Régimen de temperatura térmico	En la Taxonomía de Suelos USA, suelos con una temperatura media anual entre 15 y 22ºC, y una diferencia entre la temperatura media de verano y de invierno superior a 5ºC.
Régimen especial de producción eléctrica	Producción de energía eléctrica que se realiza en instalaciones cuya potencia instalada no supere los 50 megavatios, de acuerdo con la Ley 54/1997.
Registro estratigráfico	Restos fósiles presentes en las distintas capas sedimentarias de un ecosistema.
Regresión	Cambio en el nivel relativo de la tierra y el mar que ocasiona el descenso neto del nivel real del mar y consecuentemente la emersión de tierras antes emergidas. Puede deberse a un descenso eustático del nivel del mar o a una elevación del continente.
Regulación	Operación de adecuación de las aportaciones a la estructura de las necesidades en cantidad, calidad, tiempo y espacio.
Relicto	Se aplica a especies o sistemas propios de otras épocas geológicas que llegan hasta nuestros días como reliquias, siendo con frecuencia escasas y sensibles a cambios y perturbaciones.
Reserva de agua utilizable por las plantas	Cantidad de agua almacenada en el suelo que puede ser utilizada para la evapotranspiración de las plantas.
Retención de nutrientes	Almacenamiento de nutrientes en los sedimentos de un ecosistema determinado, de modo que se impida su exportación a otros ecosistemas cercanos. En ocasiones, se denomina también "retención" a su eliminación del ecosistema por paso hacia la atmósfera.

Término científico	*Definición.*
Reutilización	Utilización de un recurso hídrico en un proceso distinto del que lo generó.
Revolución Verde	Importante incremento de la producción agrícola que se produjo en numerosos países a partir de la década de los 1940s, como consecuencia del empleo de técnicas de producción modernas, concretadas en la selección genética y la explotación intensiva permitida por el regadío y basada en la utilización masiva de fertilizantes, pesticidas y herbicidas.
Ría	Valle fluvial inundado por el mar.
Riesgo (peligro)	Factor o exposición que puede influir sobre la salud de forma adversa.
Riesgo (probabilidad)	Probabilidad de que ocurra un hecho, por ejemplo, que un individuo enferme o fallezca, dentro de un periodo de tiempo o edad determinados.
Ruderal	Dícese de las plantas o comunidades que viven en lugares donde hay construcciones humanas o sus restos, como tejados, tapias, calles, corrales, establos, escombreras, y otros.
Sabulícola	Se dice de plantas y comunidades vegetales que viven en suelos arenosos profundos.
Salinización	Acumulación de sales más solubles que el yeso (cloruros y sulfatos de sodio y de magnesio) en el suelo o las aguas continentales.
Salud	Estado de completo bienestar físico, mental y social, y no sólo la mera ausencia de enfermedad o dolencia.
Salud Pública	Conjunto de actividades organizadas de la comunidad dirigidas a la promoción y restauración de la salud de los individuos, grupos y colectividades.
Secuencia sedimentaria	Distribución vertical de las distintas capas de sedimentos en un ecosistema.
Sedimentología	Rama de la geología que estudia los sedimentos, y las rocas que forman, con el propósito de establecer modelos sedimentarios actuales que permitan reconocer e interpretar modelos sedimentarios del pasado.
Seguro de ingeniería	Grupo de modalidades de cobertura que comprende los seguros de construcción, maquinaria, montaje, ordenadores, etc. Se denomina también seguro de ramos técnicos.
Seguro No Vida	Incluye accidentes, enfermedades-subsidios, asistencia sanitaria, ganado, pedrisco, incendios, Seguro obligatorio y voluntario de automóviles, responsabilidad civil, robo, transportes, decesos, multirriesgo de hogares, y otros.
Sequía	Ausencia prolongada o escasez acusada de precipitación.
Serotina	Se aplica a especies vegetales cuya dispersión de semillas requiere de la intervención del fuego, como ciertas especies de pinos.

Término científico	*Definición.*
Serpentínico	Suelo o zona donde abundan silicatos de magnesio.
Severidad del fuego	Grado en que un sitio ha sido alterado o dañado por el fuego. Una medida de la severidad es el producto de la intensidad por el tiempo de residencia del frente de llamas, lo que da una idea de la cantidad total de calor liberada en un sitio dado.
Shoreface	Zona costera entre el nivel submareal y unos 10-20 m de profundidad dentro de la cual la acción del oleaje gobierna los procesos sedimentarios.
Silicícola	Se dice de plantas y comunidades vegetales que habitan en suelos silíceos carentes de carbonato cálcico, con un pH de neutro-ácido a ácido.
Sistema climático	Es un sistema complejo formado por cinco componentes: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la biosfera y la litosfera, y las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona bajo la influencia de su propia dinámica interna y también a causa de forzamientos externos, como pueden ser las variaciones solares, las erupciones volcánicas o las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera o los usos del suelo.
Sistema de recursos hidráulicos	Grupo de estructuras hidráulicas, acuíferos y entidades hidrológicas relacionadas, que se destinan a uno o más fines y se explotan conjuntamente.
Solifluxión	Flujo lento y viscoso pendiente abajo de un suelo o materiales superficiales saturados de agua, especialmente en condiciones climáticas frías.
Subálveo	Acuífero subterráneo.
Subbético	Según la división fitogeográfica de la Península Ibérica, relativo a la zona oriental de la cuenca del Guadalquivir.
Subsidencia	Movimiento lento de descenso de una parte de la superficie terrestre.
Substáncias húmicas	Materia orgánica de estructura amorfa, color oscuro, de carácter ácido, procedentes de la descomposición y transformación de los restos de organismos en el suelo y las aguas.
Surco de playa	Suave depresión, larga y estrecha, aproximadamente paralela al litoral, extendida entre dos cordones de playa.
Swash	Masa de agua turbulenta procedente de la rotura de la ola, que avanza hacia el interior de la playa.
Tablas *input-output*	Instrumento estadístico que desglosa la producción nacional entre los sectores que la han originado y los que la han absorbido.
Tafonomía	Rama de la paleontología que estudia la formación de los yacimientos fósiles. Se ocupa de los procesos que sufren los organismos y sistemas biológicos al pasar de la biosfera a la litosfera.

Término científico	*Definición.*
Táxon	Unidad taxonómica de cualquier rango. La *taxonomía* es la disciplina que se ocupa de los métodos de clasificación de los organismos; crea las categorías de los diferentes rangos y se ocupa de darles nombre de acuerdo con los códigos existentes al efecto.
Temperatura umbral en el calor	Temperatura máxima diaria por encima de la cual se produce un aumento significativo de la mortalidad diaria.
Temperatura umbral en el frío	Temperatura máxima diaria por debajo de la cual se produce un aumento significativo de la mortalidad diaria.
Tempestad ciclónica atípica	Desde el punto de vista del Seguro, tiempo atmosférico extremadamente adverso y riguroso. Incluye ciclones violentos de carácter tropical (vientos superiores a 96 km/h promediados durante 10 min y precipitaciones de intensidad superior a 40 mm/hora), borrascas frías intensas (vientos superiores a 84 km/h promediados durante 10 min y temperaturas referidas a nivel del mar inferiores a -6 °C), tornados o vientos extraordinarios (superiores a 135 km/h sostenidos durante 3 s).
Termófilo	Dícese del organismo que requiere temperaturas cálidas para vivir.
Termomediterráneo	Subtipo térmico de clima mediterráneo correspondiente a una temperatura media anual entre 17 y 19ºC.
Textura	Proporción de partículas de diferentes diámetros (arena, limo, arcilla) en el suelo.
Toneladas equivalentes de petróleo	Energía liberada por la combustión de una tonelada de petróleo, que por definición de la Agencia Internacional de la Energía equivale a 10e7 Kcal.
Transgresion	Movimiento de avance del mar sobre el continente debido a un aumento del nivel de las aguas. Puede deberse a un aumento eustático del nivel del mar o a un descenso en la vertical del continente.
Transgresión flandriense	Elevación general del nivel del mar iniciada al final de la última glaciación.
Transvase de agua	Flujo de agua dirigido artificialmente de una cuenca excedentaria a otra deficitaria.
Tricóptero limnefílido	Subgrupo de ese grupo de insectos; tienen larvas acuáticas.
Triploide	Dícese del ser vivo que tiene una dotación genética triple, en vez de doble, que es la más habitual en la inmensa mayoría de los organismos.
Trófico	Relativo a la nutrición.
Tropopausa	El límite superior de la troposfera.

Término científico	*Definición.*
Troposfera	La capa más baja de la atmósfera que abarca desde la superficie hasta una altitud de entre 9 km (latitudes altas) y 16 km (trópicos). En ella se desarrollan las nubes y se producen los fenómenos que afectan al tiempo meteorológico.
Tsunami	Maremoto.
Turista	Visitante que permanece por lo menos una noche en un medio de alojamiento colectivo o privado en el país visitado.
Uso conjunto	Utilización combinada de aguas superficiales y subterráneas para dejar satisfecha una necesidad hídrica de acuerdo con una estrategia adecuada.
Uso consuntivo	Uso del agua caracterizado porque se consume y no se devuelve al lugar de origen.
Variabilidad climática	Referente a variaciones en el estado promedio y otros estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de extremos, etc.) del clima en escalas espaciales y temporales superiores a las de los eventos meteorológicos individuales. Puede deberse a procesos internos naturales en el sistema climático o a variaciones en forzamientos radiativos externos de origen natural o antropogénico.
Vector	Organismo que actúa como vehículo de transmisión de un parásito.
Vegetación	Conjunto de plantas o de comunidades que pueblan un área determinada.
Vernalización	Necesidad de exposición a bajas temperaturas para estimular el desarrollo de las flores y frutos en las plantas.
Viaje de corta duración	Viaje con un número de pernoctaciones inferior a cuatro noches.
Visitante	Toda persona que viaja, por un periodo no superior a 12 meses, a un país distinto de aquel en que tiene su residencia habitual, pero fuera de su entorno habitual, y cuyo motivo principal de la visita no es ejercer una actividad que se remunere en el país visitado.
Xerófilo / Xerofítico	Amante de la sequedad; se aplica a las plantas o a la vegetación que están adaptadas a vivir en ambientes secos.
Zona intermareal	Área de la costa que se sitúa entre los niveles más altos y los más bajos de las mareas. Los organismos que viven en ella están sometidos a dos ambientes muy diferentes, el acuático y el atmosférico de una forma cíclica.
Zona riparia	Zona de ribera fluvial.
Zona submareal	Área de la región costera situada por debajo del nivel mínimo de marea y, por tanto, cubierta permanentemente de agua.
Zoócora	Planta cuyas diásporas son dispersadas por animales.
Zoófila	Planta cuyo polen es dispersado por animales.
Zooplancton	Organismos animales que viven suspendidos en el agua en los ecosistemas acuáticos, y cuya capacidad de desplazamiento horizontal es inferior al de la velocidad de las corrientes.

ANEXO III

Listado de acrónimos utilizados en el texto

Acrónimo original	**Significado en español y en el idioma original**	**Acrónimo en español**
AGROSEGURO	Agrupación Española de Entidades Aseguradoras de los Seguros Agrarios Combinados SA	AGROSEGURO
AO	Oscilación del Ártico (*Arctic Oscillation*)	AO
AOGCM	Modelo de circulación general acoplado océano-atmósfera *(Atmosphere-Ocean Global Circulation Model)*	MCGA-OA
APHEA	Estudio europeo sobre el impacto agudo de la contaminación atmosférica en la salud (*Air Pollution and HEAlth*)	
APHEIS	Sistema de Información sobre contaminación atmosférica y la salud en Europa	
ART	Transferencia alternativa de riesgos *(Alternative Risk Transfer)*	
ATS	Aporte de agua del trasvase Tajo-Segura	ATS
BBVA	Banco Bilbao-Vizcaya-Argentaria	BBVA
BP	Antes del tiempo presente (*Before Present*)	
CAP	Política Agraria Común *(Common Agricultural Policy)*	PAC
CBD	Convención sobre la diversidad biológica (*Convention on Biological Diversity*)	CDB
CCAA	Comunidades Autónomas	CCAA
CCS	Consorcio de Compensación de Seguros	CCS
CEDEX	Centro De estudios y Experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento)	CEDEX
CEH	Centro de Estudios Hidrográficos	CEH
CITES	Convención Internacional sobre el Comercio con Especies Amenazadas	CITES
CLH	Compañía Logística de Hidrocarburos	CLH
CNE	Comisión Nacional de la Energía	CNE
COADS	Base de Datos de Atmósfera-Océano (*Comprehensive Ocean Atmospheric Data Set*)	
CRU	Unidad de investigación sobre el clima, Universidad de East Anglia (*Climate Research Unit*, University of East Anglia)	
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas	CSIC
CTEI	Comisión Técnica de Emergencia por Inundaciones	CTEI
DC	Después de Cristo	DC
DDC-IPCC	Centro de Distribución de Datos del Grupo Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (*Data Distribution Center of the Intergovernmental Panel on Climate Change*)	

Acrónimo original	Significado en español y en el idioma original	Acrónimo en español
DGB	Dirección General para la Biodiversidad	DGB
DGCN	Dirección General de Conservación de la Naturaleza	DGCN
DGOH	Dirección General de Obras Hidráulicas	DGOH
DGPEM	Dirección General de Política Energética y Minas	DGPEM
DGSFP	Dirección General de Seguros y Fondos de Pensiones	DGSFP
DMA	Directiva Marco del Agua	DMA
DSSAT	Sistema de transferencia de datos sobre agrotecnología (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*)	
EA	Patrón del Atlántico Este (*East Atlantic Pattern*)	
EA/WR	Patrón del Atlántico Este/Rusia Oeste (*East Atlantic/West Russian pattern)*	
EAN	Red Europea de Aeroalérgenos (*European Aeroallergen Network*)	
ECA	Evaluación del clima en Europa (*European Climate Assessment*)	
EEA	Agencia Europea del Medio Ambiente (*European Environmental Agency*)	AEMA
EECC	Estrategia Española de Lucha contra el Cambio Climático	EECC
EEDS	Estrategia Española de Desarrollo Sostenible	EEDS
EEUU	Estados Unidos de América	EEUU
EMECAS-EMECAM	Estudio multicéntrico sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud en España	EMECAS-EMECAM
ENACW	Masa de agua del Atlántico Norte Centro-Oriental (*Eastern North Atlantic Central Water*)	
ENAGAS	Empresa Nacional del Gas	ENAGAS
EPN	Red Europea de Fenología (*European Phenology Network*)	
ETP	Evapotranspiración	ETP
EUA	Eficiencia en el uso del agua	EUA
EV	Evaporación	EV
EXAMINE	Exploitation of Aphid Monitoring In Europe	
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*Food and Agriculture Organization*)	FAO
FSUE	Fondo de Solidaridad de la Unión Europea	FSUE
FWI	Indice meterorológico de peligro de incendio (*Fire weather index*)	
GCM	Modelo de circulación general *(Global Circulation Model)*	MCG

Acrónimo original	Significado en español y en el idioma original	Acrónimo en español
GEI	Gases de efecto invernadero (*Greenhouse effect gases*)	GHGs
GFDL	Laboratorio de dinámica de geofluidos (*GeoFluids Dynamics Laboratory*)	
GIS	Sistema de información geográfica (*Geographic information system*)	SIG
GISS	Instituto Goddard para estudios Espaciales (*Goddard Institute for Space Studies*)	
GLOBE	Conocimiento Global para el Beneficio del Medio Ambiente (*Global Learning to Benefit the Environment*)	
GLOBEC	Programa de investigación sobre la dinámica de los ecosistemas oceánicos (*Global Ocean Ecosystems Dynamics*)	
GNL	Gas natural licuado	GNL
GOOS	Sistema de observación del océano (*Global Ocean Observing System*)	
HAB	Programa de investigación sobre la proliferación de algas nocivas (*Harmful algal bloom*)	
IAOCSS	Resumen anual sobre clima y océano del Consejo Internacional para la Exploración Marina (*International Council for the Exploration of the Sea Annual Ocean Climate Status Summary*)	
ICC	Instituto Cartográfico de Catalunya (*Institut Cartográfic de Catalunya*)	ICC
ICES	Consejo Internacional para la Exploración Marina (*International Council for the Exploration of the Sea*)	
IEO	Instituto Español de Oceanografía	IEO
IFREMER	Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar (*Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer*)	
IGBP	Programa Internacional Geosfera-Biosfera (*International Geosphere-Biosphere Programme*)	
IGME	Instituto Geológico y Minero de España	IGME
IGN	Instituto Geográfico Nacional	IGN
IGPC	Programa Internacional de Ciencias de la Tierra (*International Geosciences Programme)*	
INE	Instituto Nacional de Estadística	INE
INITEC	Empresa Nacional de Ingeniería y Tecnología	INITEC
INM	Instituto Nacional de Meteorología	INM
INQUA	Unión Internacional para el Estudio del Cuaternario (*International Union for the Study of Quaternary)*	
IPC	Índice de Precios al Consumo	IPC

Acrónimo original	Significado en español y en el idioma original	Acrónimo en español
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos para el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)	GIECC
ITC	Instituto Tecnológico de Canarias	ITC
ITGE	Instituto Tecnológico Geominero de España	ITGE
ITRDB	Base de Datos Internacional sobre Anillos de Creciemiento de Árboles (*International Tree Ring Data Bank*)	
IUCN	Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza (The *World Conservation Union*)	UICN
JACUMAR	Junta Nacional Asesora de Cultivos Marinos	JACUMAR
JGOFS	Programa de investigación sobre los flujos de elementos en el océano (*Joint Global Ocean Flux Study*)	
LAI	índice de área foliar (*Leaf area index*)	IAF ó ISF
LBAE	Libro Blanco del Agua en España	LBAE
LFFMC	Contenido en humedad de los combustibles vivos finos (*Live fine fuel moisture content*)	
LIC	Lugar de Interés Comunitario	LIC
MaBP	Millones de años antes del presente	
MAPYA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación	MAPYA
MIMAM	Ministerio de Medio Ambiente	MIMAM
MINER	Ministerio de Industria y Energía	MOPTMA-MINER
MMA	Ministerio de Medio Ambiente	MMA
MNCN-CSIC	Museo Nacional de Ciencias Naturales	MNCN-CSIC
MOPTMA	Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente	MOPTMA
MOPU	Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo	MOPU
MPA	Red de áreas marinas protegidas (*Marine protected areas*)	AMP
NAO	Oscilación del Atlántico Norte (*North-Atlantic Oscillation*)	OAN
NAP-UNCCD	Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (*National Action Programme to Combat Desertification*)	PAND
NDVI	Índice de vegetación normalizado (*Normalized Difference Vegetation Index*)	
NGO	Organización no gubernamental (*Non-Govermental Organization*)	ONG
NMM	Nivel medio del mar	NMM
NMMAPS	Estudio sobre el impacto de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad y la morbilidad en Estados Unidos (*National Mortality and Morbidity Air Pollution Study*)	

Acrónimo original	Significado en español y en el idioma original	Acrónimo en español
NOAA-CIRES	Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera de EEUU-Instituto de Cooperación para la Investigación en las Ciencias Ambientales (*National Oceanic and Atmospheric Administration-Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences*)	
OAPN	Organismo Autónomo Parques Nacionales	OAPN
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (*Organisation for Economic Co-operation and Development*)	OCDE
OMEL	Operadora del Mercado Eléctrico	OMEL
OPTIGES	Optimización de la gestión de los recursos hídricos de una cuenca (módulo incluido en el sistema AQUATOOL, desarrollado en el IIAMA de la UPV (Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia).	OPTIGES
PAH	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	HAP
PFER	Plan de Fomento de las Energías Renovables	PFER
PHN	Plan Hidrológico Nacional	PHN
PIB	Producto Interior Bruto	PIB
PIB a p.m.	Producto Interior Bruto a precios de mercado	PIB a p.m.
PM10	Partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 10 µm	PM10
PM2,5	Partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 2,5 µm; también se conocen como partículas finas	PM2,5
PYMES	Pequeñas y medianas empresas	PYMES
RCM	Modelo regional del clima (*Regional Climate Model*)	MRC
REA	Red Española de Aerobiología	REA
REE	Red Eléctrica de España	REE
RPA	Red Portuguesa de Aerobiología	RPA
SACRE	Seguimiento de Aves Comunes Reproductoras en España	SACRE
SAHFOS	Fundación Alister Hardy de Oceanografía (*Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science*)	
SCAN	Patrón de Escandinavia (*Scandinavian pattern*)	
SEO	Sociedad Española de Ornitología	SEO
SIMPA	Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación-Aportación	SIMPA
SOLAS	Programa de investigación sobre la dinámica en la superficie del océano en contacto con la atmósfera (*Surface Ocean – Lower Atmosphere Study*)	

Acrónimo original	Significado en español y en el idioma original	Acrónimo en español
SRES	Informe especial sobre escenarios de emisión (*Special Report on Emission Scenarios*)	
SST	Temperatura de la superficie del mar (*Sea Surface Temperature*)	
UE	Unión Europea	UE
UKMO	Oficina Meteorológica del Reino Unido (*United Kingdom Meteorological Office*)	
UNECE	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (*United Nations Economy Commission for Europe*)	CENUE
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (*United Nations Environment Programme*)	PNUMA
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*United States Department of Agriculture*)	
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo *(Universal Soil Loss Equation)*	
UVB	Ultravioleta-B (Ultraviolet-B)	UVB
VOC	Compuestos volátiles orgánicos (*Volatile Organic Compounds*)	COV
WCD	Comisión Mundial sobre Represas (*World Commission on Dams*)	
WHO	Organización Mundial de la Salud (*World Health Organization*)	OMS
WTO - OMT	World Tourism Organization - Organización Mundial del Turismo	OMT
WWF	Fondo Mundial para la protección de la vida salvaje (*World Wildlife Fund*)	

ISBN 84-8320-303-0

9 788483 203033

P.V.P.: 45,00 €
(I.V.A. incluido)

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE