

3. LA SITUACIÓN ACTUAL Y LOS PROBLEMAS EXISTENTES Y PREVISIBLES

Como se apuntó en el capítulo introductorio, y una vez descrito en el segundo capítulo el contexto global, geográfico, en sus tres vertientes fisiográfica, socioeconómica e institucional, que caracteriza y condiciona el problema hídrico, en esta tercera parte se llevará a cabo una descripción técnica sobre las circunstancias y situación actual de las aguas en España desde un punto de vista eminentemente descriptivo.

Tal descripción se ocupará en primer lugar del dato básico de cuánta agua hay, dónde está, y cómo es -los recursos hídricos en cantidad y calidad-, para después pasar revista a la situación de los usos, demandas y asignaciones que gravitan sobre estos recursos, a los sistemas de explotación en que se integran recursos y demandas, a los mecanismos de protección del dominio público hidráulico, a la economía, protección y administración del agua, a las infraestructuras y a los fenómenos extremos de sequías e inundaciones. Se concluye el capítulo con una referencia específica al contexto internacional y a la cooperación con Portugal y con un comentario sobre la situación actual en nuestro país de la investigación y desarrollo en recursos hídricos.

3.1. LA SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

3.1.1. Introducción. El concepto de recurso

En los epígrafes que siguen, y tras la exposición de los marcos generales de referencia, describiremos con detalle la situación de los recursos hídricos desde un punto de vista ya específico y cuantitativo. La amplia extensión que se dedicará a su estudio está ciertamente justificada, pues los recursos no son sino el agua que hay, y se comprende que este es un dato esencial, fundamento y condicionante de casi todos los demás.

Con carácter previo a este análisis, es conveniente, no obstante, realizar algunas precisiones terminológicas. Así, la consideración del agua como un recurso, que da título a este epígrafe, remite a su percepción como algo que puede desempeñar distintas funciones, pero éstas han de entenderse en un sentido abstracto, en modo alguno vinculadas de forma directa a connotaciones trivialmente utilitarias o directamente económicas.

Es claro que las funciones del agua más obvias son aquellas que se refieren a su posibilidad de utilización por la humanidad para distintos usos directos (beber, regar, mover ruedas o turbinas, bañarse...), pero estas funciones en sentido estricto no agotan otras funcionalidades quizá menos directamente perceptibles pero que resultan ser tan importantes como las primeras. Es el caso de las funciones ambientales (soporte de eco-

sistemas, receptor de residuos...) o de otras funciones no estrictamente utilitarias, y asociadas al recreo, la contemplación del paisaje, o la sensación experimentada frente a un elemento primario, como el fuego o la tierra, antropológicamente imbricado de forma profunda en la conciencia de la especie humana. Nos referiremos en detalle a estas distintas funciones hídricas al exponer los fundamentos ambientales de la política del agua, pero es conveniente dejar ya señalada esta apreciación inicial.

Por otra parte, ha de notarse lo extremadamente tenue que resulta la frontera de separación entre las que hemos denominado funcionalidades utilitarias y no utilitarias, y lo que en el fondo tiene de artificiosa tal separación, pues, ¿cabe dudar en estos momentos de que la función ambiental del agua es una utilidad necesaria para la continuidad de la especie humana?, ¿de que la preservación del medio es a largo plazo nuestra principal necesidad, sin la que las demás no tendrán ocasión siquiera de plantearse?

Hecha esta precisión, en primer lugar se mostrarán los conceptos básicos del ciclo hidrológico en régimen natural y del ciclo en régimen afectado. Tras ello, y puesto que el conocimiento cuantitativo de estos recursos se lleva a cabo mediante la observación y medida de sus componentes, se expondrá la situación de las redes de medida de datos hidrológicos. Mejor conocimiento de los recursos y mejores redes de medida van necesariamente unidos, por lo que esta cuestión reviste una importancia estratégica.

Descritas las redes se abordará ya directamente la evaluación de los recursos hídricos, tanto en régimen natural como afectado, y considerando también lo que se ha venido llamando recursos no convencionales y que, como veremos, cada vez merecen menos este calificativo. Es pues tras la descripción física del estado natural de las aguas en la biosfera que se procederá a introducir una primera visión de los recursos hídricos de forma orientada a su posible utilización para satisfacer necesidades humanas. Surge así el concepto de recursos disponibles por contraposición al de recursos naturales, conceptos de importancia fundamental, que han sido en alguna ocasión origen de confusiones y erróneas interpretaciones técnicas, y que se desarrollarán de forma rigurosa y detallada en este documento.

Por último, se incluye también una ilustrativa comparación de nuestra situación con la de los países del entorno europeo, y se realiza un análisis de lo que pueden suponer la variabilidad hidrológica natural y las incertidumbres del cambio climático para nuestros recursos hídricos del futuro.

Ha de insistirse en que, inicialmente, nos referiremos en este capítulo a los recursos hídricos bajo esta per-

cepción física global, funcional en un sentido amplio, sin entrar a dilucidar su aptitud o utilidad para la concreta satisfacción de necesidades humanas. La descripción cuantitativa ha de responder, por tanto, a las preguntas más elementales: ¿cuánta agua hay?, ¿dónde está?, ¿cómo se mueve? ¿por dónde va? ¿hasta qué punto puede controlarse?... preguntas en apariencia simples -pero solo en apariencia- y cuya respuesta constituye la materia de la ciencia hidrológica.

Por otra parte, las cuestiones relativas a la calidad de las aguas no pueden conceptualmente separarse de las de la cantidad. Se ha dicho y repetido que cantidad y calidad van de la mano, no pueden disociarse, no pueden correctamente entenderse de forma separada. Las preguntas elementales que, continuando con las anteriores, deben responderse ahora serían: ¿puede beberse? ¿puede regarse con ella? ¿puede mejorarse?

En este libro se asume por entero -como es obvio- este planteamiento integrado, pero, tras analizar la posibilidad de desarrollar una presentación híbrida -desde luego muy novedosa pero que, con los conocimientos disponibles, hubiese sido viable-, razones expositivas y de mejor comprensión de ambos aspectos complementarios aconsejaron la separación formal -que no material- de las cuestiones relativas a calidad y contaminación de las aguas, desarrollando con ellas un extenso apartado específico.

Podría concluirse esta introducción cerrando el proceso de interrogaciones que, en un proceso de gradual curiosidad y aprendizaje nuestro hipotético filósofo antes se formulaba. Así, puede imaginarse ahora que, una vez suficientemente conocido dónde está y qué se puede hacer con ella, es decir, una vez satisfechas las inmediatas funciones utilitarias del agua, la siguiente pregunta sería: ya que tengo lo suficiente para mis necesidades ¿qué papel juega el agua en la naturaleza? ¿qué otras cosas, además de a mí, está soportando? ¿qué relación tengo yo con esas otras cosas?.

Las respuestas a estas preguntas conducen directamente a estudiar las funciones ambientales de los recursos hídricos y, en último extremo, a plantear en su raíz el problema de la relación del hombre con el medio que le rodea.

3.1.2. La consideración cuantitativa del recurso

El agua en la naturaleza se mueve según una secuencia de procesos físicos que constituyen el ciclo hidrológico, y que conviene describir para poder así tener en cuenta las relaciones del agua con su entorno, y conocer cómo pueden afectar a los distintos componentes del ciclo, y al medio ambiente en general, las

modificaciones debidas al aprovechamiento de los recursos hídricos.

Pese a su aparente simplicidad, la comprensión del mecanismo del ciclo hidrológico en sus rasgos básicos es un hecho relativamente reciente. Ideas que hoy parecen triviales, como que el océano es la principal fuente de agua del ciclo, que la aportación de los ríos está asociada a las lluvias, o que el agua de los manantiales procede de la recarga de los acuíferos, no se han comprendido claramente hasta fechas modernas. La primera explicación efectiva del ciclo hidrológico, mediante procedimientos experimentales y mediciones cuantitativas, se produce en el siglo XVII, cuando Perrault demuestra, a partir de la observación y el registro de datos, que la aportación del río Sena, en Francia, estaba relacionada con la precipitación caída sobre su cuenca, y era del orden de 1/3 de esta precipitación. Las mediciones de Perrault (de octubre de 1668 a octubre de 1669, de octubre de 1670 a octubre de 1671, y de octubre de 1673 a octubre de 1674) constituyen el primer registro sistemático de la lluvia durante al menos un ciclo estacional completo (Solís, 1990, pp.93).

Seguidamente se ofrecerá una breve descripción del ciclo hidrológico en régimen natural, para posteriormente mostrar los impactos básicos que, desde un punto de vista cuantitativo, la acción humana introduce en este ciclo natural dando lugar al régimen afectado, que es el que, salvo en las cuencas vírgenes, puede observarse en la realidad.

La consideración, siquiera elemental, de estos procesos resulta de fundamental importancia para la comprensión global del problema hídrico.

3.1.2.1. El ciclo hidrológico en régimen natural

Con objeto de ofrecer unas nociones básicas del ciclo hidrológico en régimen natural, se expondrán en primer lugar los conceptos técnicos y componentes básicos de este ciclo. Su entendimiento permitirá introducir de forma natural el concepto de balance de agua de un territorio, fundamental para la comprensión de los recursos hídricos desde el punto de vista cuantitativo. Por último, y asociado al concepto de balance, se introducirán los conceptos de recursos renovables y de reservas.

3.1.2.1.1. El concepto de ciclo hidrológico

Se entiende por ciclo hidrológico el conjunto de transferencias de agua entre la atmósfera, el mar y la tierra en sus tres estados, sólido, líquido, y gaseoso. El motor energético de estas transferencias es el Sol. El

ciclo hidrológico se produce a escala planetaria, aunque es su fase continental la que incorpora los recursos que sirven para satisfacer las necesidades humanas, la que produce perturbaciones en los casos de inundaciones, o sobre la que tienen lugar los principales impactos antrópicos.

El conjunto de procesos hídricos que han tenido o tendrían lugar en la naturaleza en total ausencia de intervención humana (es decir, como si no existiese la humanidad sobre la tierra) constituye el ciclo hidrológico en régimen natural.

La figura 54 representa esquemáticamente este ciclo en forma conceptual, y muestra los distintos estados, flujos y almacenamientos de agua.

Los procesos básicos que incluye el ciclo hidrológico son los de evapotranspiración, precipitación, infiltración, percolación y escorrentía. La evapotranspiración es el efecto conjunto que se produce a través de la evaporación del agua presente en la superficie terrestre y en los mares, ríos y lagos, y la transpiración procedente de la tierra a través de los seres vivos, en especial de las plantas. Esta evapotranspiración determina la formación de vapor atmosférico que al condensarse, bajo determinadas condiciones, retorna en parte a la superficie continental en forma de precipitación líquida o sólida. Parte de esa precipitación se infiltra en el suelo, desde donde se vuelve a evapotranspirar, o percola en el subsuelo, y otra parte escurre superficialmente por la red de drenaje (escorrentía superficial directa) hasta alcanzar la red fluvial. El agua infiltrada en el subsuelo, y que no se evapotranspira, se acumula en los poros, grietas y fisuras de los materiales del terreno que, por sus características físicas, tienen capacidad de almacenar el agua. Las formaciones geológicas que tienen capacidad para almacenar y transmitir el agua se denominan, con carácter general, acuíferos. La parte del agua que, mediante la percolación, recarga los acuíferos y vuelve a salir, diferida en el tiempo, a la red fluvial, se denomina escorrentía subterránea. Es frecuente asociar la escorrentía subterránea al denominado flujo base de los ríos, aunque puede haber otras componentes del caudal con variabilidad temporal relativamente lenta, como la fusión de nieves, y cabe asimismo distinguir un flujo de fondo o base de otros flujos más rápidos en la descarga de los manantiales, siendo ambos escorrentía subterránea.

Se puede definir como aportación de un río en un punto de la red fluvial el volumen de agua que pasa por él durante un periodo de tiempo. En el régimen natural esta aportación comprenderá, pues, la suma de escorrentía superficial directa de toda la cuenca situada aguas arriba, y la escorrentía subterránea que se incorpora a los cauces aguas arriba de ese punto.

El agua que recarga los acuíferos (y que, por referirnos al régimen natural, no es extraída por bombeos) y no se evapotranspira cuando los niveles freáticos están próximos a la superficie, acaba incorporándose a los cauces en los tramos fluviales drenantes de acuíferos, o surge por manantiales. La excepción se produce en los acuíferos costeros, en los que el agua subterránea puede salir directamente al mar, en parte o en su totalidad.

Es claro que los procesos descritos operan con diferente intensidad a muy distintas escalas espaciales y temporales, por lo que más que en un ciclo hidrológico unitario y mecanicista debe pensarse más bien en un conjunto interrelacionado de procesos que, operando a muy distintas escalas, configuran un resultado final agregado que es el que se observa simplificada-mente como objeto de estudio y evaluación.

Así, un aspecto característico del ciclo hidrológico, y al que frecuentemente se alude, es el de la variabilidad, producida por su dependencia de los factores meteorológicos que intervienen en la circulación atmosférica terrestre. Tal variabilidad está relacionada con la escala temporal y significa que, en distintos periodos de tiempo, las descritas magnitudes del ciclo pueden tomar valores muy distintos.

Una consecuencia de esta variabilidad temporal es que el agua puede plantear problemas tanto por escasez en época de sequías como por exceso en las inundaciones que ocasionan daños y pérdidas de vidas humanas. La variabilidad hidrológica y sus sucesos extremos, avenidas y sequías, son fenómenos que se pueden caracterizar, a los que nos referiremos más adelante, y que resultan de obligada consideración para una correcta planificación hidrológica.

Por otra parte, la descripción del ciclo realizada se ha referido únicamente a aspectos cuantitativos del recurso, pero es obvio que, a medida que el agua recorre las distintas fases del ciclo, arrastra consigo o deposita sustancias químicas de los medios que atraviesa, y va modificando así sus condiciones de calidad natural, que se estudiará más adelante en relación con los aspectos cualitativos del recurso. Aunque es razonable asociar de forma finalista el concepto de calidad como aptitud para el uso que va a tener el agua, puede entenderse también en abstracto, y con independencia de posibles usos, como el conjunto de parámetros físico-químico-biológicos que la caracterizan.

Una frecuente confusión es la de asociar aguas de mala calidad a problemas de contaminación por actividades humanas. Sin embargo, es perfectamente explicable que, conforme a lo dicho, haya aguas no aptas para ningún uso por causas enteramente naturales, y sin que se haya introducido antrópicamente con-

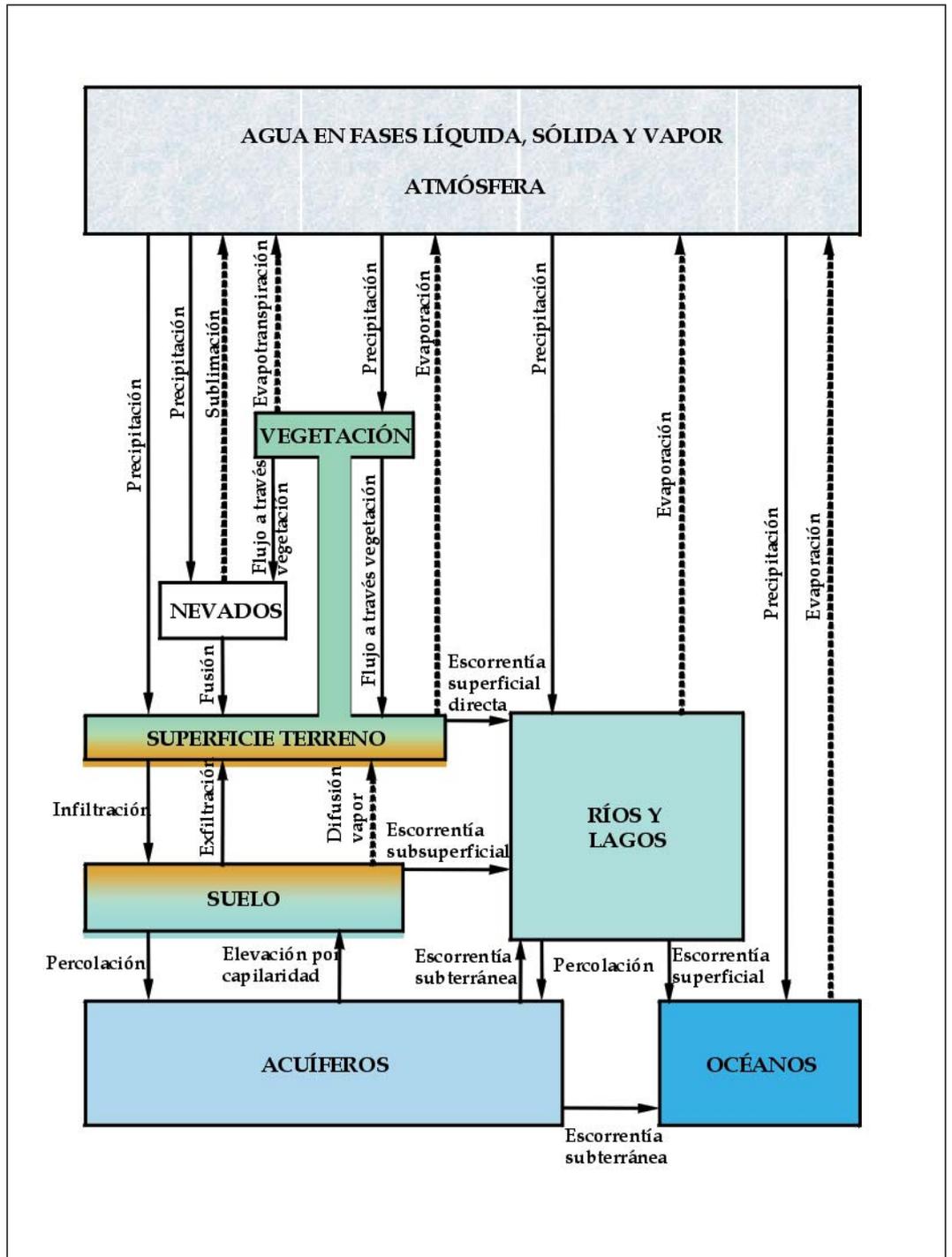


Figura 54. Esquema conceptual del ciclo hidrológico

taminación alguna. Es, por ejemplo, el frecuente caso de aguas salinas o sulfatadas por contacto con materiales yesíferos o evaporíticos.

3.1.2.1.2. Balance hídrico de un territorio

Los conceptos y procesos hidrológicos que se están exponiendo pueden contemplarse, como se ha indicado, a muy distintas escalas espacio-temporales, por lo que no han de ceñirse, necesariamente, al ámbito espacial de una cuenca hidrográfica, y pueden referirse a un territorio cualquiera (como un país, una provincia o una finca).

En efecto, los recursos naturales generados internamente en un territorio cualquiera son los que se producen a partir de la precipitación y, en concreto, comprenden la escorrentía superficial directa y la recarga a los acuíferos. Estos recursos no tienen por qué coincidir exactamente con la aportación de la red fluvial, dado que pueden producirse transferencias superficiales y subterráneas desde o hacia otros territorios vecinos, tal como esquemáticamente se representa en la figura adjunta, adaptada de Erhard-Cassegrain y Margat (1983). Con este esquema conceptual puede plantearse el concepto de balance hídrico para un

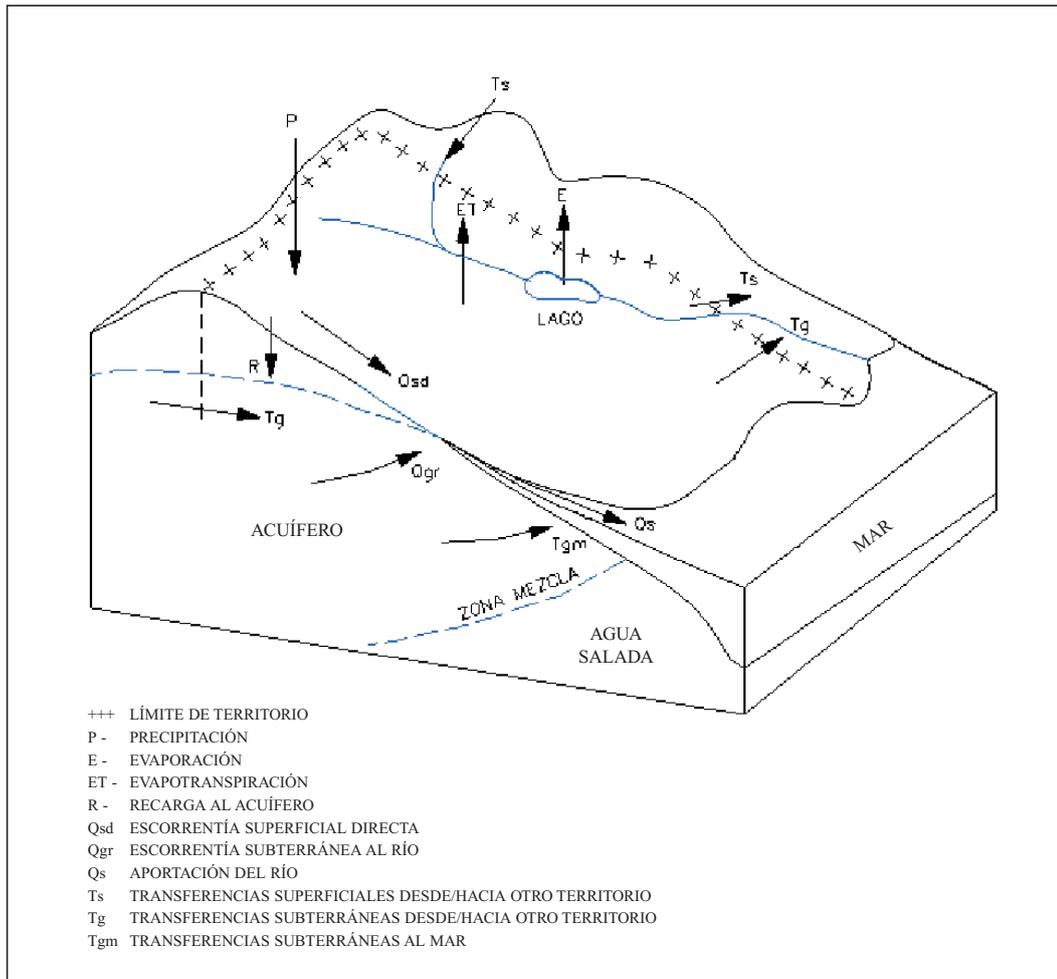


Figura 55. Esquema de los principales flujos del ciclo hidrológico en un territorio

territorio cualquiera, que no necesariamente ha de ser una cuenca hidrográfica, y que sería -para un periodo cualquiera o en valores medios a largo plazo- el resultado de considerar las entradas y salidas al territorio mostradas en el esquema (fig. 55).

Las cuencas hidrográficas no son, en definitiva, sino un caso particular de territorio, cuya peculiaridad radica en que no recibe, en régimen natural, transferencias superficiales, y las que recibe subterráneamente suelen ser, en general, poco importantes. Esta independencia hídrica con respecto a los territorios vecinos es lo que hace a las cuencas hidrográficas muy adecuadas como unidades territoriales para la gestión de los recursos hídricos.

En la figura 56 (de elaboración propia a partir de los esquemas de Erhard) Cassegrain y Margat (1983) adaptados a los datos españoles- se muestran las cifras globales agregadas de los principales flujos en régimen natural para el territorio español (en km³/año), y, por tanto, los elementos fundamentales de su balance hídrico.

Más adelante, en los epígrafes dedicados a los recursos naturales, se tratará este asunto en detalle y de

forma desagregada, pero pueden retenerse ya las grandes magnitudes básicas: la aportación total de la red fluvial española es de unos 109 km³/año (del orden de un tercio de los 346 km³/año precipitación total), de los que tres cuartas partes (82 km³/año) son escorrentía superficial directa, y una cuarta parte (29 km³/año) es escorrentía subterránea. Las transferencias externas globales tanto superficiales como subterráneas son muy reducidas frente a los grandes flujos propios, lo que resulta lógico considerando el carácter geográfico de país peninsular -separado del resto por cordilleras e isleño, y, por tanto, su gran aislamiento hidrográfico en relación a otros países del entorno.

3.1.2.1.3. Recursos renovables y reservas

Habitualmente se admite que los recursos hídricos de un área coinciden con sus recursos totales (superficiales y subterráneos) renovables, es decir, con el balance de su territorio. En nuestro caso, estos recursos totales serían unos 111 km³/año (109+2), valor ligeramente superior a las aportaciones totales de los ríos.

Además de estos recursos renovables, en un territorio puede haber acuíferos con reservas muy importantes

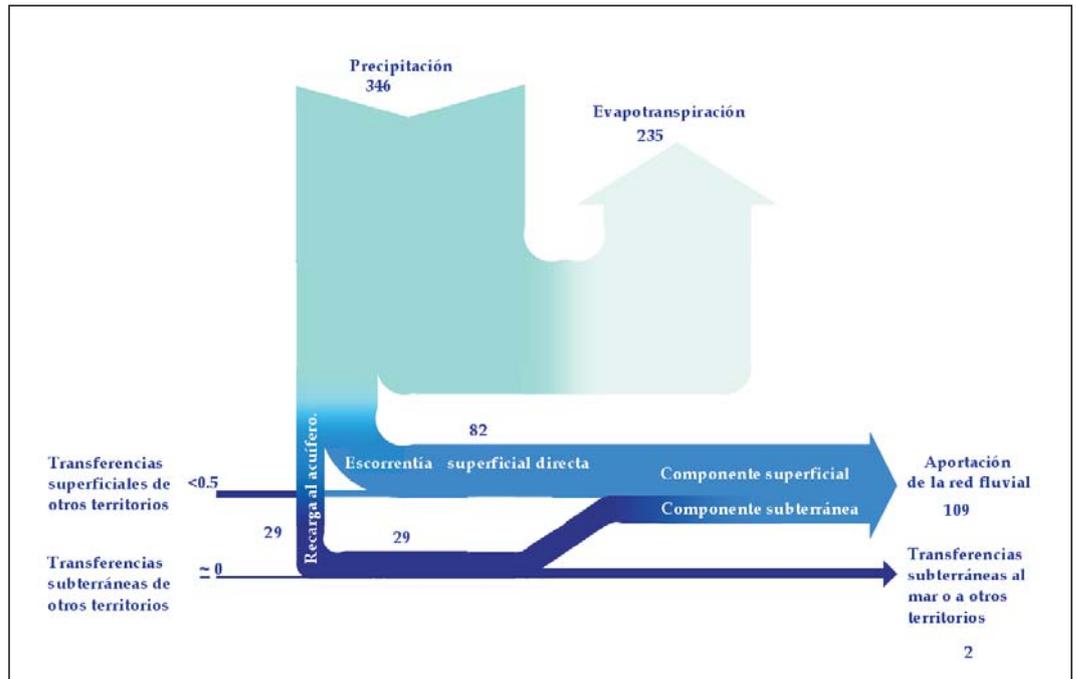


Figura 56. Esquema de los principales flujos de agua (km³/año) en régimen natural para el territorio español

de agua almacenadas en ellos, y que pueden tardar decenas o cientos de años en renovarse. En régimen natural, tales reservas han de considerarse como un almacenamiento permanente, y no como un recurso renovable. En regímenes afectados tales reservas podrían permitir una mayor disponibilidad temporal de agua durante un tiempo limitado, pero no incrementarían los recursos de forma permanente. El volumen de reservas existente en nuestro país es sin duda muy importante, pero su cuantificación - y su propio concepto - plantea algunos problemas a los que nos referiremos más adelante.

Hay que hacer notar que la renovabilidad del agua, como todas las características del ciclo, no es un atributo fijo e inamovible, sino que puede verse afectada por la actuación humana.

3.1.2.2. El ciclo hidrológico en régimen influenciado

Una vez expuestas las nociones básicas del ciclo hidrológico en régimen natural, procede considerar ahora este ciclo pero en las condiciones reales actuales, es decir, afectado por la acción humana. Para ello se expondrá el concepto clásico de ciclo influenciado o afectado y se mostrarán distintos casos de afección, tras lo que se planteará el problema básico de estimar los flujos naturales a partir de los flujos observados, lo que se conoce como restitución al régimen natural. Finalmente, se expondrá el nuevo concepto de la afección a escala global.

3.1.2.2.1. La afección antrópica sobre el ciclo hidrológico

El agua ha sido siempre un elemento imprescindible para el desarrollo de la civilización, y el hombre ha avanzado en este desarrollo modificando el régimen de los flujos y almacenamientos naturales del agua en el ciclo hidrológico. Así, el establecimiento de las ciudades, o la producción de alimentos mediante la agricultura de regadío, o la producción de energía, han exigido derivar las aguas de sus lugares naturales - ríos, lagos o acuíferos- y aplicarlas a estos usos, modificando así la circulación que habrían tenido de no mediar intervención humana.

En muchas regiones del planeta, y en particular en nuestro país, estas intervenciones locales han sido muy intensas, y han dado lugar a una circulación del ciclo que resulta, en muchos casos, absolutamente distinta de la que se produciría en el régimen natural. Esta circulación real, resultante de los flujos y almacenamientos naturales modificados por las acciones antrópicas, constituye el ciclo hidrológico en régimen afectado.

En la figura 57 se muestran esquemáticamente distintos ejemplos de afección al régimen natural, en su sentido clásico, debidos a la presencia de un embalse de regulación, de unos pozos en el acuífero, de una central térmica, de una ciudad y de una zona de regadíos.

El embalse de regulación supondrá una modificación del régimen hidrológico del río para adaptarlo a las demandas y mermará sus aportaciones como consecuencia de la evaporación. Los pozos que bombean agua del acuífero darán lugar a un descenso de los

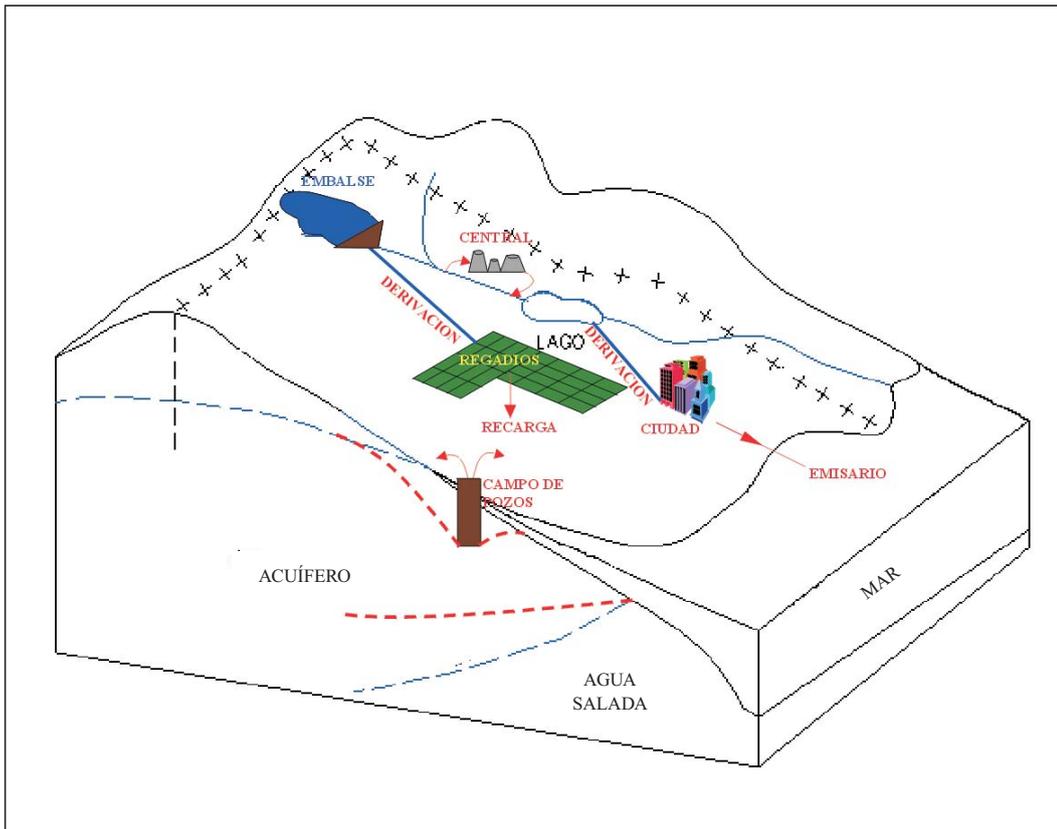


Figura 57. Algunos ejemplos de alteraciones antrópicas del ciclo hidrológico

niveles piezométricos, el cual afectará a los caudales del río y podrá inducir a su vez, dada la proximidad de los pozos a la costa, una penetración del frente de intrusión salina. La central térmica derivará caudales para su refrigeración, los cuales al ser devueltos al río podrán ver aumentada su temperatura. El agua aplicada para los regadíos y utilizada por las plantas supondrá una disminución del recurso, mientras que la no consumida retornará a los ríos y acuíferos viendo alterada su calidad, al adquirir nuevos elementos proce-

dentos de fertilizantes, insecticidas, pesticidas, etc. El agua detraída para el abastecimiento de la ciudad también se consumirá en parte, retornando el resto para ser depurada y evacuada al mar.

Como se ilustra en la figura y se deduce de los comentarios anteriores, las alteraciones que puede sufrir el ciclo hidrológico son muchas y de muy variados efectos, y a su consideración se dedicarán distintos epígrafes de este Libro.

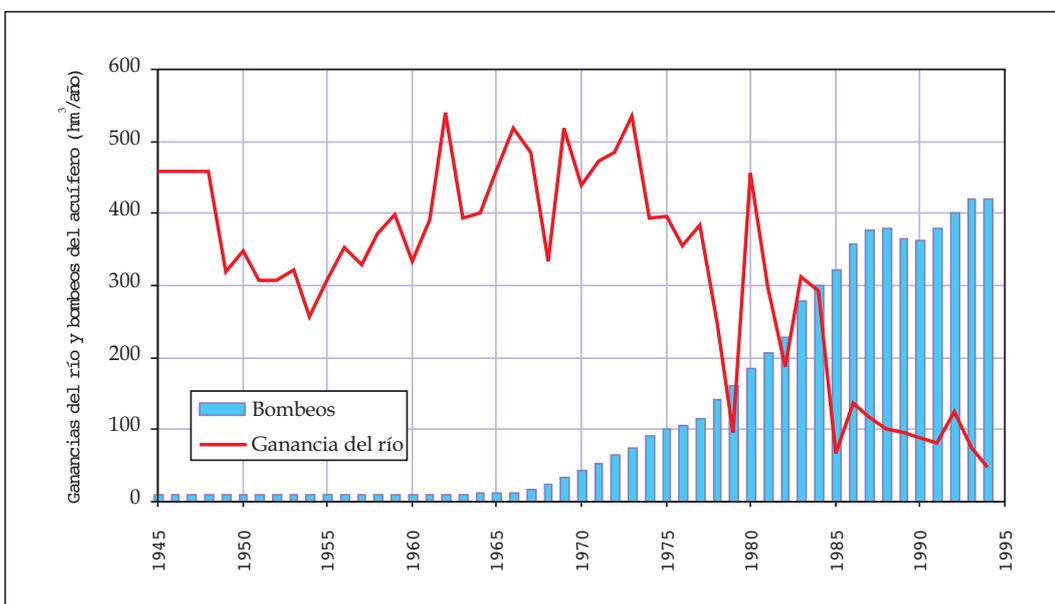


Figura 58. Afección de los bombeos en La Mancha sobre los caudales del río Júcar

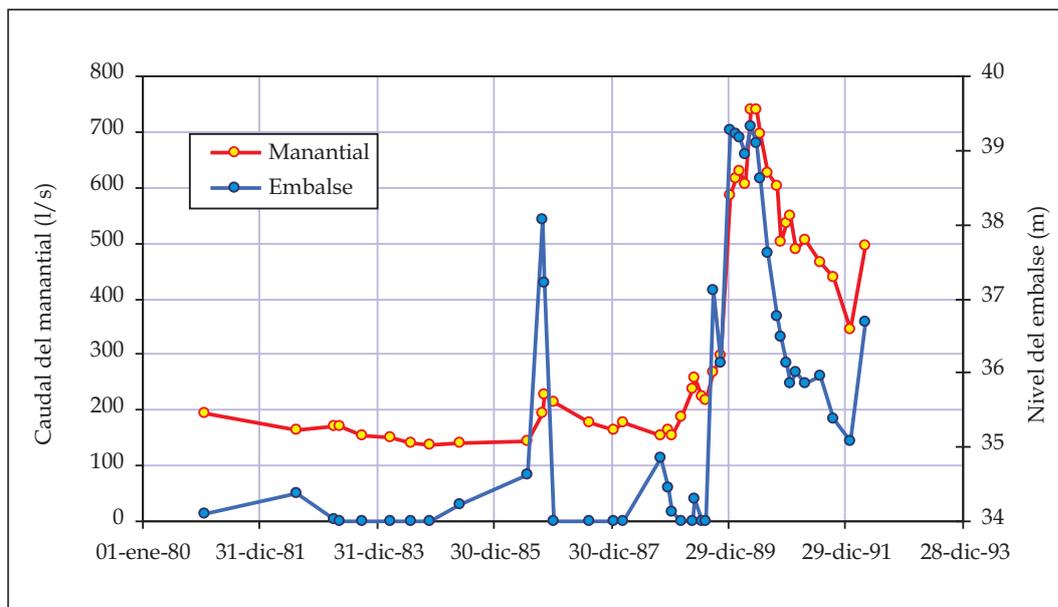


Figura 59. Afección del embalse de Valdeinfierno sobre el manantial de los Ojos de Luchena

Un buen ejemplo de la clásica afección antrópica de los bombeos de un acuífero sobre los caudales del río que lo drena es el proporcionado por el acuífero de la Mancha Oriental y el río Júcar. La figura 58 muestra muy expresivamente la evolución del proceso de los bombeos anuales del acuífero y la ganancia hídrica en el tramo fluvial asociado, en el periodo de los últimos 50 años. Como se aprecia, hay importantes volúmenes de agua que hasta los años setenta salían naturalmente al río, y ahora han pasado a extraerse por bombeo, afectando así a las aportaciones fluviales, si bien hay que precisar que, en los últimos años, a este efecto de afección se superpone el de la sequía pluviométrica.

Otro ejemplo ilustrativo y anecdótico de afección antrópica, mucho menos usual e importante que el anterior, es el producido por un embalse cuyo vaciado y llenado induce la respuesta de un manantial hidrogeológicamente asociado, modificándose así las condiciones de escorrentía natural del acuífero. Es el caso, por ejemplo, del embalse de Valdeinfierno en el río Guadalentín (cuena del Segura), y el importante manantial de los Ojos de Luchena, del que existen aforos discontinuos desde el siglo XVII. El gráfico adjunto muestra con claridad -para los aforos disponibles en el periodo 1981-1993- la afección indicada (fig. 59).

Hay que hacer notar que el hecho de que se produzcan sobre el ciclo hidrológico afecciones antrópicas como las mostradas no es intrínsecamente negativo ni positivo, sino distinto. Son simplemente diferentes modelos de funcionamiento, cuya mayor o menor bondad con respecto a la situación inicial dependerá de muchas circunstancias locales y debe dilucidarse en cada caso concreto.

Desde el punto de vista cuantitativo, la afección más significativa es sin duda la merma de los caudales naturales debida a las detracciones del agua para los usos consuntivos. Como es bien conocido, la mayor utilización consuntiva del agua en España es para los riegos, siendo un porcentaje muy alto de ese agua devuelta a la atmósfera mediante la evapotranspiración desde las zonas de regadío. Los usos urbanos e industriales en España representan una proporción consuntiva mucho menor que la de los usos agrícolas, mientras que el uso energético, principalmente la refrigeración de centrales, es muy poco consuntivo.

En el entendimiento de que se trata sólo de una primera imagen, y sin perjuicio del desarrollo expositivo que tendrán estas cuestiones más adelante, puede avanzarse ahora, como primer indicador de la afección antrópica sobre el ciclo natural, el cociente entre el caudal medio que circula actualmente y, por tanto, en régimen real, afectado, y el que circularía si no hubiese afección humana, es decir, en régimen natural. Los valores de este indicador para algunos importantes ríos españoles se muestran en el gráfico adjunto, en el que se representa también el valor medio global para estos ríos, y se manifiesta con claridad el efecto de la afección antrópica (fig. 60).

Como se aprecia, el efecto relativo de las detracciones para usos aguas arriba es máximo en el Segura (llega al mar un 4% de lo que llegaría si no hubiese aprovechamientos), lo que revela una extrema utilización consuntiva de las aguas en esta cuena. También es importante este efecto, aunque en menor medida, en las cuencas de los ríos Guadiana, Guadalquivir o Júcar, siendo menor en el Tajo, Ebro y Duero.

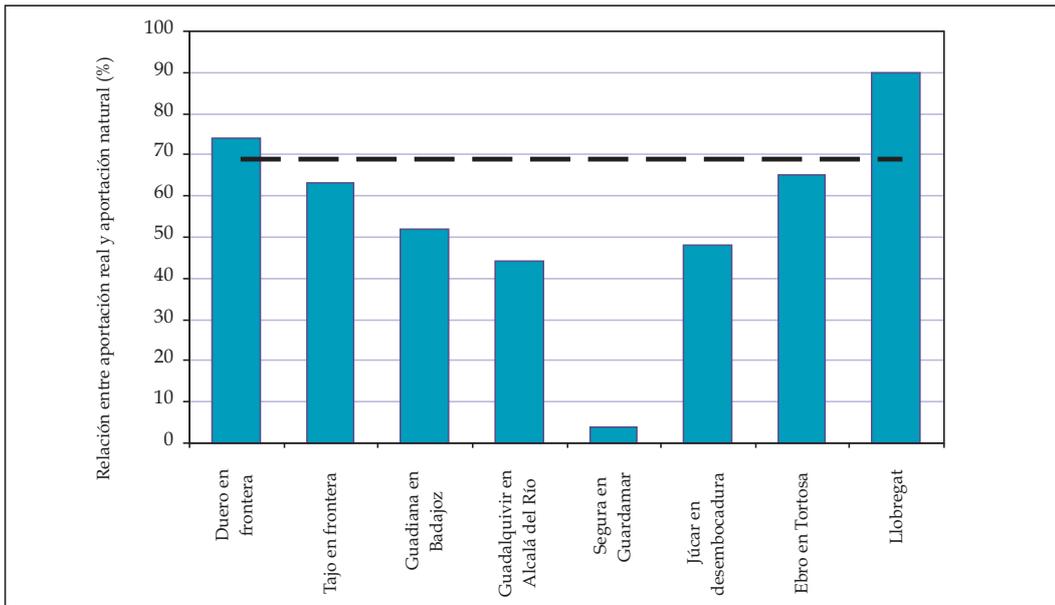


Figura 60. Relación entre aportación real y aportación natural para diferentes ríos españoles

Como se ha indicado, esta relación no es sino un primer indicador de la afección, pero en modo alguno la describe enteramente. Piénsese, por ejemplo, que puede haber modificaciones sustanciales del régimen de circulación de las aguas en la cuenca que no impliquen consumos apreciables (como producción hidroeléctrica o industrias con alto retorno) y, por tanto, no se reflejen en el ratio ofrecido. Además, y sobre todo, pueden producirse modificaciones muy importantes en las condiciones de calidad de las aguas que serían

invisibles para este ratio. En la práctica, no obstante, es frecuente que ambas condiciones vayan asociadas, y lugares con niveles de utilización más intensos presenten también los mayores niveles de degradación.

Por otra parte, desde el punto de vista del régimen temporal de flujos, la afección más importante es sin duda la inducida por los embalses de regulación, cuyo objetivo es precisamente ése, la modificación del régimen de caudales naturales para su adaptación a los requerimientos humanos.

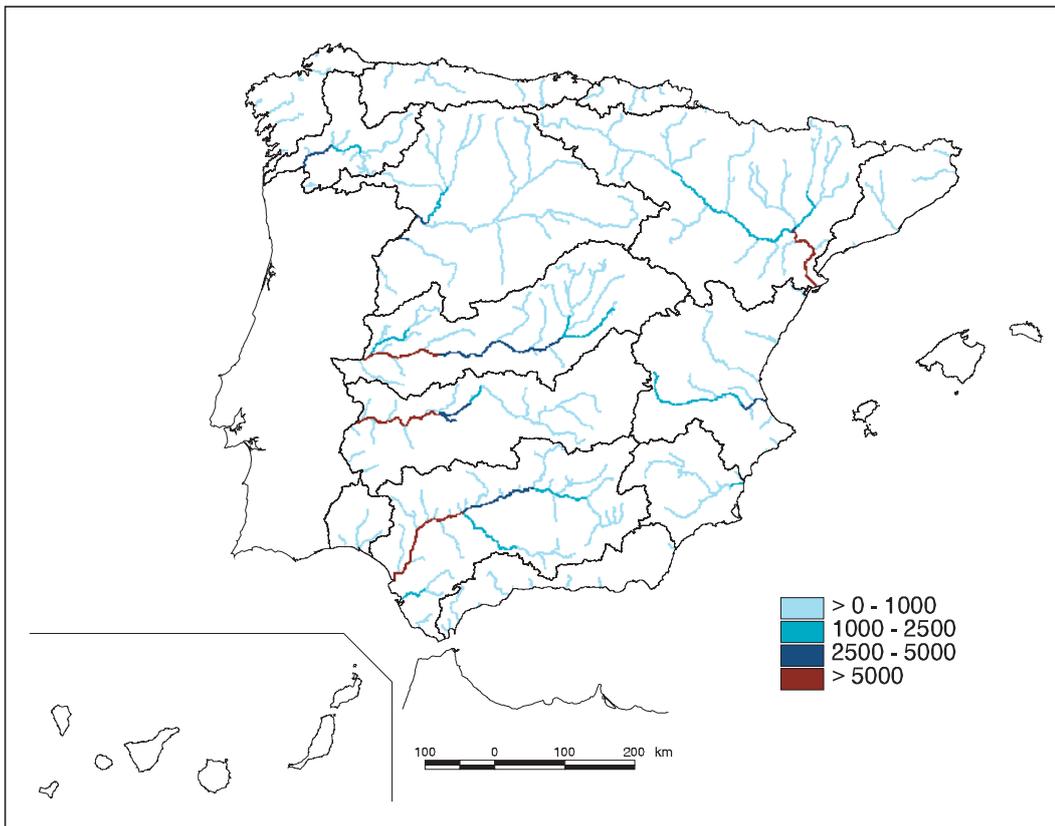


Figura 61. Mapa de volúmenes de embalse aguas arriba (hm³)

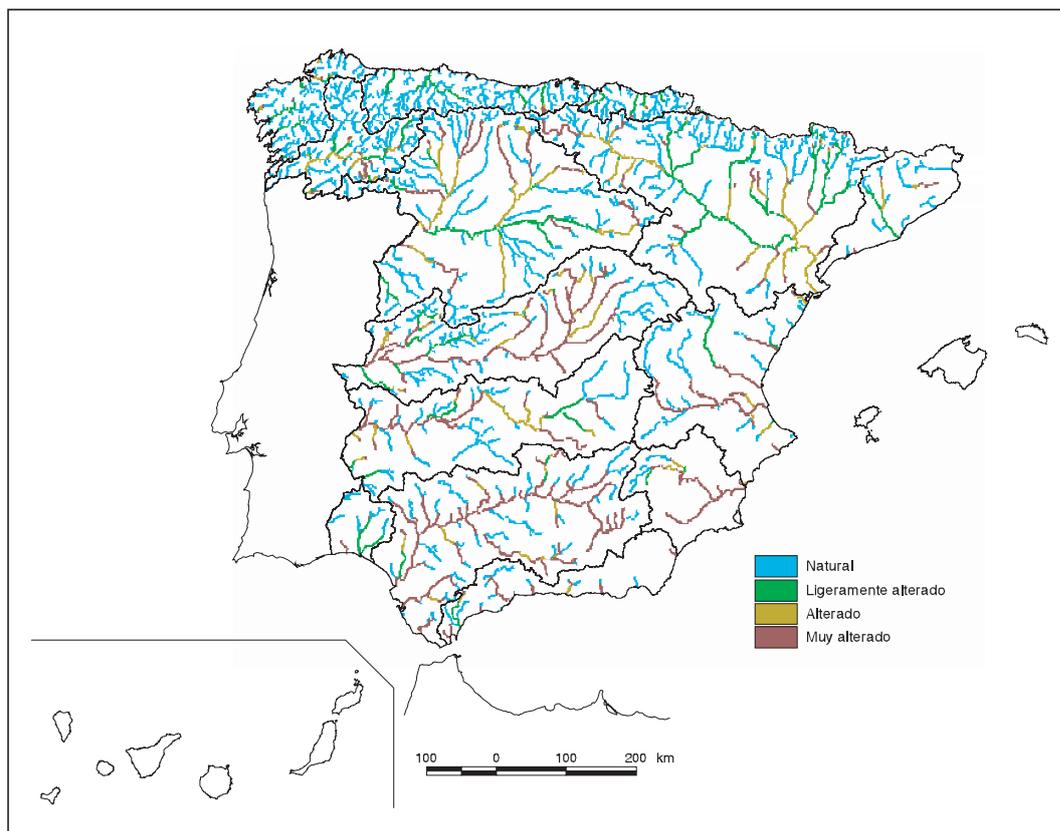


Figura 62. Mapa de máxima alteración potencial actual del régimen natural por efecto de la regulación existente

Bajo esta perspectiva, el grado de alteración producido en un punto de un río será básicamente función del volumen de embalse existente aguas arriba del punto, de la magnitud relativa de ese embalse con respecto a las aportaciones circulantes, y del régimen de explotación de estos embalses aguas arriba.

El régimen de explotación podría ser tal que se reprodujese la circulación natural, con lo que la alteración sería nula. En el extremo contrario, la máxima perturbación sería la correspondiente a la movilización de todo el volumen de embalse aguas arriba. Para acotar este efecto extremo, y tener una primera idea cuantitativa de lo que puede suponer en nuestro país la alteración del régimen de caudales, como consecuencia de la regulación, se ha elaborado un mapa de volúmenes de embalse aguas arriba de cada punto de la red fluvial, tal y como se muestra en la figura 61.

Como se observa, los mayores volúmenes llegan a superar los 5.000 hm³, y se encuentran obviamente en los cursos bajos de los grandes ríos (Guadalquivir, Ebro, Tajo, Duero y Gadiana). Por contra, existen algunas cuencas donde apenas se alcanzan los 1.000 hm³ (Norte, Sur, C.I. de Cataluña, Galicia Costa y Segura).

Si se divide el mapa de aportación natural circulante por este mapa de volumen de embalse aguas arriba, se obtiene el interesante nuevo mapa de máxima alteración potencial del régimen mostrado en la figura 62.

Como puede verse, las alteraciones potenciales por efecto de la regulación presentan un aspecto muy diferente al del embalse aguas arriba. Cuencas con muy alta capacidad absoluta de almacenamiento, como el Ebro, presentan regímenes en general poco alterados debido a su gran aportación natural, mientras que otras también con grandes aportaciones presentan posibilidades de alteración mucho mayor (Tajo o Guadalquivir), debidas a su mayor disponibilidad de embalses.

Además, debe recordarse que nos estamos refiriendo a alteraciones máximas potenciales, y las reales pueden ser notablemente inferiores a estas. Piénsese, por ejemplo, en el caso frecuente de un embalse hidroeléctrico de muy alta capacidad, pero con poca carrera de explotación. La alteración potencial aguas abajo podría ser muy alta, pero la realmente producida puede ser muy pequeña.

3.1.2.2.2. La restitución al régimen natural

La restitución de los caudales de los ríos y drenajes de acuíferos consiste en estimar su régimen natural -que es el que define los recursos existentes- a partir del régimen alterado, que es el que puede observarse y medirse. Para estimar ese régimen natural es preciso conocer las detracciones de agua de los ríos y acuíferos, los retornos al río, la gestión de los embalses, así como las evaporaciones y filtraciones que en ellos

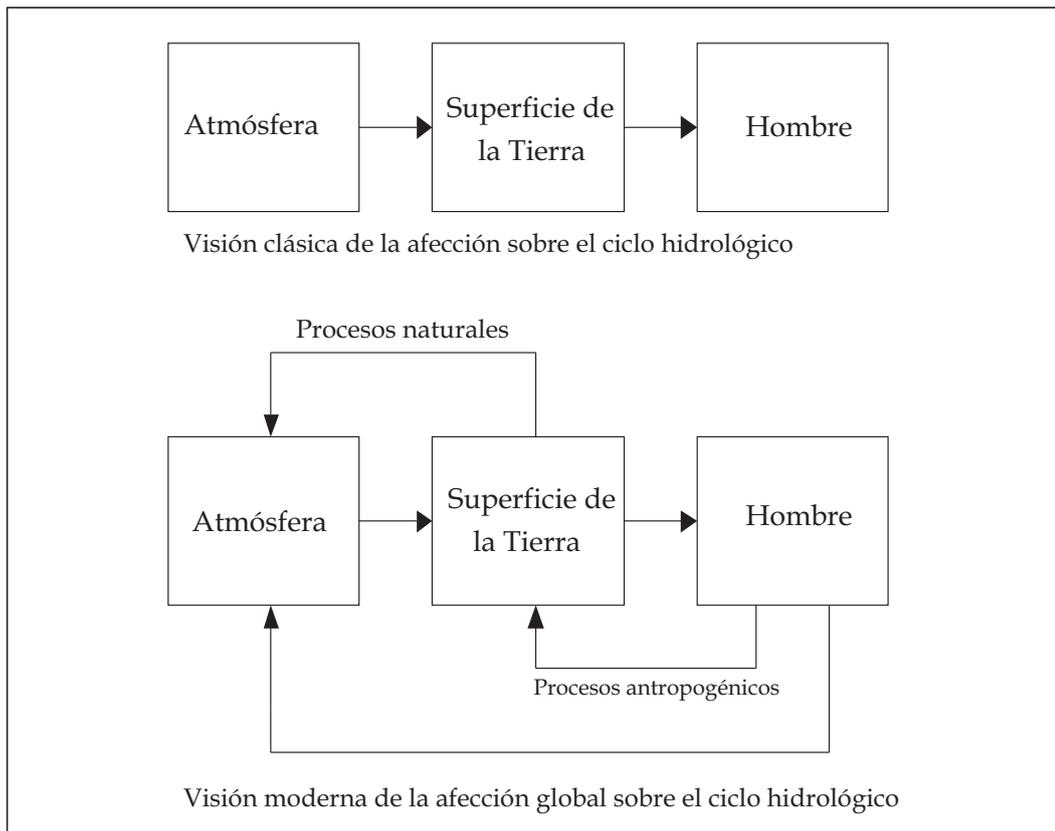


Figura 63. Distintas perspectivas de los efectos antrópicos sobre el ciclo hidrológico

puedan producirse, las transferencias artificiales entre cuencas, etc. En suma, se necesita disponer de información sobre la evolución en el tiempo de todas las intervenciones humanas significativas que se han producido en la cuenca.

En general, en nuestro país no se conocen de forma satisfactoria los usos y derivaciones del agua. Lógicamente, este conocimiento es mayor en aquellas zonas donde la escasez ha exigido mayores controles e intervenciones públicas para la distribución de las aguas, pero, en todo caso, y de forma general, resulta imprescindible promover avances fundamentales en esta dirección, que solo pueden venir de la intensificación y potenciación de las redes de medida, aspecto fundamental que ya avanzamos, y que trataremos más adelante.

Los retornos del agua derivada, que son aún menos conocidos cuantitativamente, dependen del tipo de uso y de la distancia del punto de utilización a los de toma y retorno. El retorno de agua superficial a los ríos se produce con un desfase respecto a la toma usualmente de horas o días, pero que puede llegar a ser del orden de un mes. Si el retorno se produce a través de los acuíferos, el desfase suele ser mucho mayor, incluso de años. Esto es importante a la hora de interpretar los datos de caudales históricos registrados en las estaciones de aforo de los ríos y, en particular, los de caudales bajos cuando están influidos por derivaciones de riego de cuantía desconocida. Lo mismo sucede cuan-

do se producen bombeos de agua subterránea de cuantía y distribución temporal desconocida en acuíferos aluviales pequeños, que pueden influir de forma rápida en los caudales del río.

En definitiva, el nivel de alteración antrópica es a veces tan intenso y complejo que resulta prácticamente imposible restituir los caudales naturales, con cierta fiabilidad, a partir del imperfecto conocimiento de las afecciones producidas. En estos casos, frecuentes en los cursos bajos de los ríos, puede recurrirse a modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía que, razonablemente calibrados, permitan estimar las condiciones naturales de la cuenca. Una adecuada combinación de distintos métodos y aproximaciones, según las circunstancias de cada caso, será la clave del éxito para atacar el problema de forma satisfactoria.

Restituir los caudales naturales históricos y obtener valores de aportaciones en régimen natural es una tarea de la mayor importancia para el conocimiento de los recursos hídricos y para la planificación hidrológica, pudiendo decirse que, en nuestros días, todavía está sujeta a algunas incertidumbres relativamente importantes, que no pueden ignorarse por esta planificación.

3.1.2.2.3. La afección antrópica a escala global

Además de previamente descritas afecciones antrópicas clásicas, a la escala local de las cuencas hidrográ-

ficas, recientemente ha emergido la consideración de otro tipo de afección antrópica sobre el ciclo hidrológico, que es la debida a los impactos humanos a escalas globales, continentales o planetarias.

Las alteraciones térmicas y emisiones de gases debidas a las concentraciones humanas y megalópolis en latitudes templadas, o la tala masiva y deforestación de los trópicos, son fenómenos planetarios conmensurables con los del intercambio de humedad de la circulación general atmosférica. El efecto de realimentación del estado de superficie, cada vez más influenciado de forma antrópica, sobre los procesos atmosféricos y el ciclo hidrológico a escala global, comienza a ser una realidad cuyas consecuencias no son aún suficientemente conocidas (NRC, 1991. pp.43-45). La figura 63 ilustra esquemáticamente estas perspectivas.

En definitiva, una moderna concepción del ciclo hidrológico ha de tener presente que, además de las afecciones clásicas a la escala de las cuencas fluviales, la actividad humana a la escala planetaria ha llegado a ser una parte significativa de este ciclo global, produciéndose complejos fenómenos de retroalimentación, aún no bien caracterizados desde el punto de vista científico.

3.1.2.3. La contabilidad del agua

Una vez contemplados los aspectos básicos del ciclo hidrológico tanto en régimen natural como afectado, procede comentar la existencia de metodologías para llevar a cabo la contabilidad formal de los procesos descritos.

Estas metodologías de cuentas del agua en su vertiente cuantitativa presentan gran interés como procedimiento de organización compacta, metódica y estructurada de los flujos y almacenamientos, y aunque se limitan a grandes balances agregados y carecen de la finura de los modelos detallados de simulación de sistemas hidráulicos, pueden emplearse como expresión sintética y estructurada de las salidas de estos modelos, y como instrumento de homogeneización formal con vistas a una posible contabilidad de los recursos naturales.

Los primeros antecedentes de esta aproximación se deben a los trabajos sobre las cuentas del agua desarrollados por Margat en los años 70, y han sido aplicados en España de forma experimental en la cuenca del Segura en 1984, y sistemáticamente en todo el territorio nacional (MOPTMA, 1996b).

El desarrollo de un sistema de información estadística construido con tablas contables proporcionaría una base sólida de datos para el seguimiento y evaluación de las actuaciones políticas sobre la gestión, uso y ahorro de agua en España, y permitiría análisis homogéneos y comparaciones internacionales.

Este sistema estadístico podría basarse en las denominadas cuentas satélite del agua que está desarrollando EUROSTAT con la colaboración de algunos estados miembros. El INE español está participado en estos desarrollos.

3.1.3. El reconocimiento de los recursos. Redes de medida

El conocimiento descriptivo de los procesos intervinientes en el ciclo hidrológico, tal y como ya se ha descrito, no es suficiente, ya que las necesidades de la sociedad actual obligan, cada vez más y con mejor detalle, a conocer su magnitud de una forma también cuantitativa. Para ello es necesario medir los flujos y almacenamientos de agua mediante redes de medida.

Así, las redes de medida son el elemento básico para la cuantificación de los recursos hídricos, y tienen como objetivo fundamental suministrar información sobre el estado y evolución de las aguas superficiales y subterráneas.

Existe un gran número de redes, de muy distinta naturaleza, objetivos y tipología. De forma esquemática, puede afirmarse que las que afectan a la cuantificación de los recursos hídricos son:

1. Las meteorológicas, dado que tanto la precipitación como otras variables meteorológicas intervinen en el proceso de generación de escorrentía
2. Las de aguas superficiales, que miden los flujos y almacenamientos en superficie, y
3. Las de aguas subterráneas, que proporcionan información básicamente sobre niveles piezométricos en los acuíferos y caudales en los manantiales.

A ellas nos referiremos en los epígrafes que siguen.

3.1.3.1. Situación de las redes de control

3.1.3.1.1. Redes meteorológicas

Aunque existen observaciones meteorológicas puntuales desde tiempos muy remotos, es por Perrault en Francia y en el siglo XVII, entre 1668 y 1674, cuando se realizan por vez primera mediciones sistemáticas de lluvias a lo largo de todo un año, en el contexto de los primeros estudios cuantitativos sobre el ciclo hidrológico. Desde finales del XVII se extiende por los países de occidente la medición de las precipitaciones, y comienza a medirse la tasa de evaporación (Solís, 1990, p.173).

En España, los primeros intentos realizados para disponer de datos meteorológicos son muy antiguos,

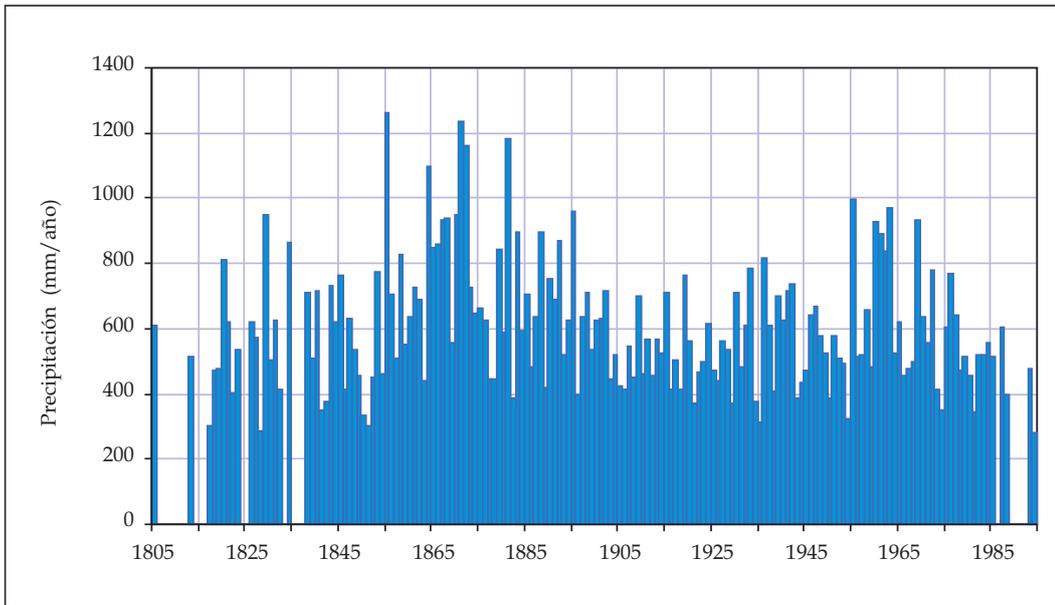


Figura 64. Serie de precipitaciones anuales en San Fernando (Cádiz) desde 1805

existiendo constancia de observaciones realizadas con fines médicos desde las Efemérides de Navarrete, en 1737. De finales del XVIII son las pioneras observaciones de Salvá en Barcelona, Alonso Salanova en Madrid, Sánchez Buitrago en Cádiz, o Bals y Cardona en Mahón (Barriendos et al. [1997] pp.47-62).

Ya a finales del siglo XVIII se iniciaron propiamente las observaciones meteorológicas, y los primeros datos que se conservan son los del Observatorio de San Fernando en Cádiz, desde 1805, y los del Observatorio de Madrid, desde 1841. La serie de San Fernando, la más antigua de todas las españolas, es la ofrecida en el gráfico adjunto, elaborado con datos de INM (1996) (fig. 64).

Además de los Observatorios oficiales, existieron curiosas iniciativas singulares como la del párroco

mosén Bodí, que recogió la relación detallada de las tormentas acaecidas en Carcagente entre 1837 y 1876, con datos concretos de las lluvias caídas en cada temporal y sus vientos dominantes, o la recopilación de Rico Sinobas, con datos del primer tercio del siglo.

Un primer impulso al desarrollo de la red oficial se produce en 1860, año en que Isabel II promulgó un Real Decreto por el que se encomendaba a la Junta General de Estadística del Reino la creación de 22 estaciones meteorológicas, lo que produjo un aumento espectacular del número de puntos de observación, tal y como se muestra en la figura 65 -elaborada con datos del Instituto Nacional de Meteorología-, de evolución del número de estaciones a lo largo del siglo XIX. Tal y como puede observarse, a finales de este siglo la red estaba compuesta por unas 40 estaciones meteorológicas.

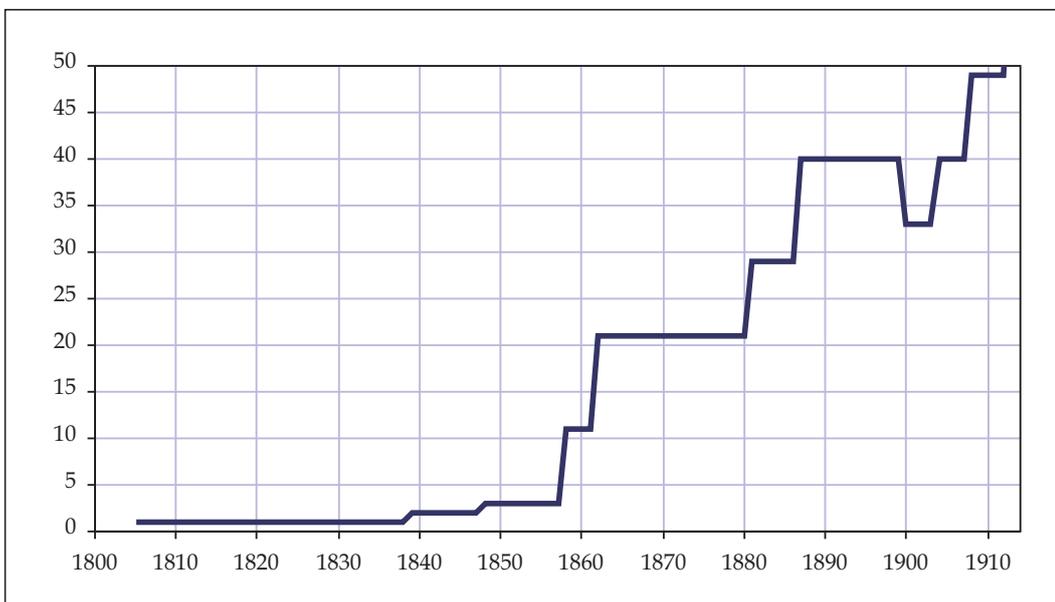


Figura 65. Evolución del número de estaciones meteorológicas en España durante el siglo XIX

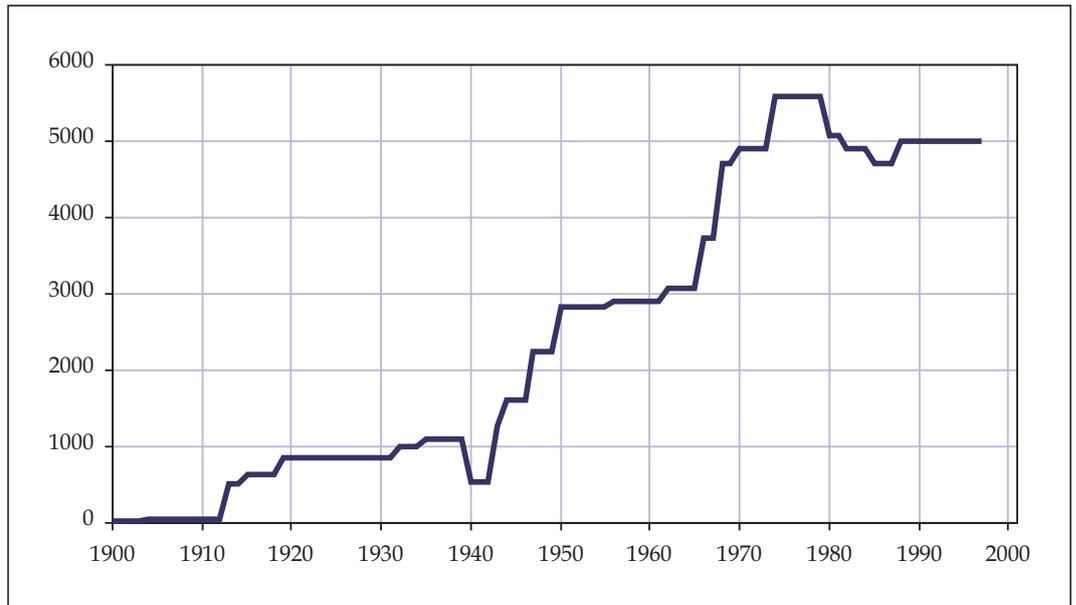


Figura 66. Evolución del número de estaciones meteorológicas en España durante el siglo XX

Durante el presente siglo el crecimiento de la red ha sido desigual, y aunque en la segunda década (arrancando en 1912-1913) se produce el despegue inicial, con un aumento muy importante de estaciones alcanzando un número próximo a mil, puede afirmarse que es a partir del año 1940 cuando se empieza a disponer masivamente de series ininterrumpidas, o al menos con pocas lagunas. Esta es la razón principal por la que, con frecuencia, los datos de estudios hidroclimáticos en nuestro país arranquen en esas fechas.

Como se aprecia en el gráfico adjunto, elaborado con datos del INM, este crecimiento alcanza un máximo a finales de los años 70, para mantenerse o incluso decrecer hasta la actualidad, en que existe un número aproximado de 5.000 estaciones meteorológicas en servicio (fig. 66).

En la actualidad, el Ministerio de Medio Ambiente es el responsable, a través del Instituto Nacional de Meteorología, de la adquisición, gestión y difusión de los datos meteorológicos.

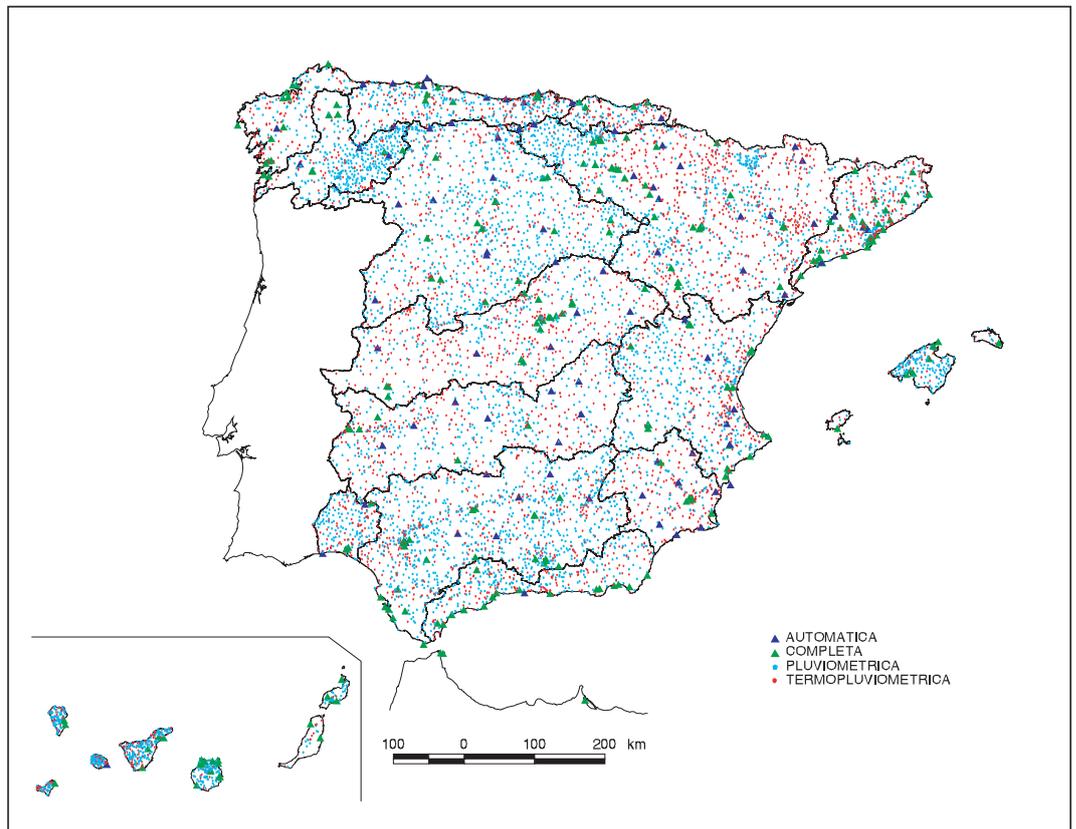


Figura 67. Mapa de la Red de estaciones meteorológicas con registros históricos del INM

Ámbito	Pluviométricas	Termopluviométricas	Completas	Automáticas	Totales
Norte I	326	74	8	3	411
Norte II	241	169	8	12	430
Norte III	74	88	3	2	167
Duero	757	355	15	10	1.137
Tajo	257	355	18	6	636
Guadiana I	344	298	6	8	656
Guadiana II	124	74	3	2	203
Guadalquivir	782	382	23	7	1.194
Sur	215	147	14	1	377
Segura	110	182	6	8	306
Júcar	447	318	18	5	788
Ebro	663	748	34	14	1.459
Galicia Costa	82	97	10	1	190
C.I. Cataluña	170	242	30	4	446
Baleares	130	38	7	0	173
Canarias	435	164	23	0	622
Total	5.157	3.731	226	83	9.197

Tabla 3. Número y distribución por ámbitos de planificación de las estaciones meteorológicas con registros históricos

La red de ámbito nacional, mostrada en la figura 67 y descrita por ámbitos de planificación en la tabla 3, consta de aproximadamente 9.200 estaciones en las que se dispone de registros históricos, de las cuales unas 5.200 miden sólo precipitaciones (P); 3.700 miden precipitaciones y temperaturas (TP); 200 son estaciones completas (C), que registran datos de precipitación, temperatura, humedad atmosférica, insolación, velocidad del viento, etc.; y 80 son automáticas. Este último tipo de estaciones son muy recientes. Registran los mismos tipos de datos que las completas y su principal rasgo característico es que transmiten la información automáticamente a través de la red telefónica.

Los datos registrados históricamente en todas las estaciones meteorológicas se almacenan en la base de datos climatológicos del INM, tal y como se describe en el correspondiente epígrafe.

De las casi 9.200 estaciones meteorológicas reflejadas en la tabla anterior se encuentran actualmente en servicio unas 5.080, de las cuales 2.520 son pluviométricas, 2320 son termopluviométricas, 160 son completas y 80 son automáticas. El reparto por cuencas hidrográficas se muestra en la tabla 4, elaborada con datos del INM.

Las estaciones pluviométricas y termopluviométricas registran datos diarios, de gran valor para la estimación de los recursos, pero insuficientes para los estudios de crecidas, que requieren información en periodos de tiempo menores. Los datos de intensidades horarias, e incluso minutas, sólo se registran en las estaciones completas y automáticas, cuyo número es muy escaso para el conjunto del territorio nacional. Este hecho hace que, como se verá mas adelante, la información captada por los sensores pluviométricos de la red SAIH (Sistema Automático de Información

Cuenca	Pluviométricas	Termopluviométricas	Completas	Automáticas	Totales
Norte	213	268	23	18	522
Duero	339	215	12	10	576
Tajo	105	177	15	6	303
Guadiana	153	206	6	10	375
Guadalquivir	385	198	13	7	603
Sur	166	54	14	1	235
Segura	70	156	5	8	239
Júcar	180	193	15	5	393
Ebro	214	498	16	14	742
C.I. Cataluña	70	132	15	4	221
Baleares	134	43	7	0	184
Canarias	485	183	18	0	686
Total	2.514	2.323	159	83	5.079

Tabla 4. Número y distribución de las estaciones meteorológicas actualmente en servicio

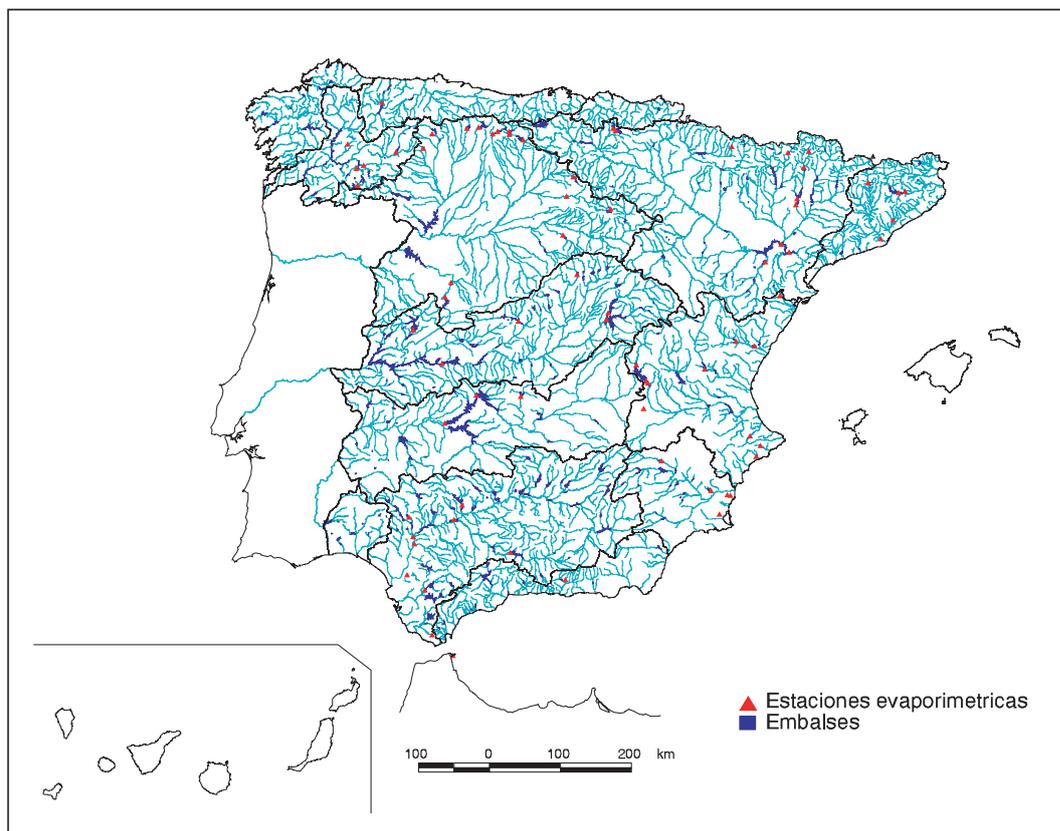


Figura 68. Mapa de la Red de estaciones evaporimétricas en embalses

Hidrológica) tenga un especial interés para las crecidas, y como complemento de las estaciones completas y automáticas del INM.

Otra red meteorológica de ámbito nacional es la red de estaciones evaporimétricas en embalses, que históricamente ha desarrollado y mantenido la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas (DGOHCA). Además de registrar información sobre diferentes variables meteorológicas, mide datos de evaporación en tanque o en Piché. Aunque con anterioridad tuvo mayor número de estaciones, la red consta en la actualidad de los 75 puntos mostrados en la figura 68, cuyos datos mensuales son incluidos en los Anuarios de Aforo que regularmente publica la DGOHCA.

Además de las mencionadas, existen otras redes meteorológicas, de menor ámbito, que son gestionadas por los propios Organismos de cuenca u otros Organismos de la Administración Central o Autónoma, y que sirven para propósitos específicos y de complemento a la red nacional.

También existe un programa, denominado ERHIN (Estudio de los Recursos Hídricos procedentes de la Innivación), que se inició en la cordillera pirenaica, y cuya finalidad es la de cuantificar la contribución de la fusión de la nieve en los recursos hídricos de distintas cuencas (MOPU [1988]; MOPT [1992b]).

El variado número de redes existentes y el diferente alcance de las mismas, pone de manifiesto el proble-

ma de la dispersión y la necesidad de coordinación que debe existir entre todas las Administraciones y Organismos implicados.

3.1.3.1.2. Redes de aguas superficiales

El concepto de caudal de un río era conocido desde antiguo, pero su determinación en los cauces planteó en la práctica muchos problemas, no siendo hasta el siglo XIX cuando se conocen y dominan las técnicas necesarias para tal estimación. Así como la lluvia comenzó a registrarse en Europa a finales del XVII, la medición de caudales no se desarrolla hasta los siglos XIX y XX.

Aunque se conocen datos puntuales de caudales en algunos ríos españoles desde antes, es en el último tercio del XIX cuando comienza a disponerse de series continuas, como muestra la figura 69 de aportaciones anuales del Guadalentín en la presa de Puentes, y que es -como la de San Fernando para las lluvias- la serie de aforos diarios conocida más larga de España. Lo usual es que, como se ha dicho, a lo largo del XIX no se disponga más que de datos puntuales de aforo muy dispersos espacial y temporalmente (v. Bentabol, 1900), no existiendo registros sistemáticos -aunque en un número reducido de estaciones- hasta comienzos del presente siglo.

La primera normativa oficial sobre redes de medida de caudales data de 1941, cuando el entonces Ministerio

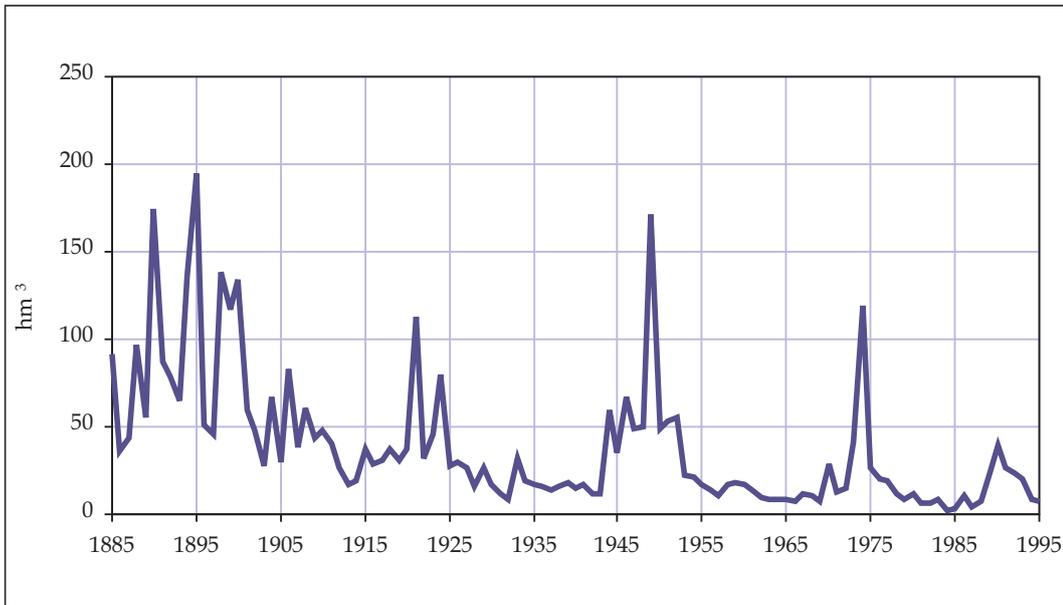


Figura 69. Serie de aportaciones anuales del río Guadalequiv en la presa de Puentes desde 1885

de Obras Públicas aprobó una Orden Ministerial para conocer los caudales utilizados por los concesionarios de los aprovechamientos de aguas públicas.

Esta Orden Ministerial tuvo un cumplimiento parcial y tardío por lo que en 1963, la entonces Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH), ante la constatación de que las estaciones no funcionaban de la forma deseable, aprobó un Plan General de Mejora y Ampliación de Estaciones de Aforo, que condujo al establecimiento de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA). Este importante Plan se desarrolló entre 1963 y 1972 y dio lugar, tal y como se observa en la figura 70, a un crecimiento muy importante del número de estaciones de aforo en los ríos, que alcanzó un máximo a principios de los ochenta, para luego decrecer ligeramente hasta la actualidad.

En la organización actual, los Organismos de cuenca tienen a su cargo la operación y mantenimiento de estas redes de medida, mientras que el Organismo responsable del archivo general y la difusión de los datos es el Ministerio de Medio Ambiente, a través de la DGOH-CA. En las Cuencas Internas de Cataluña, Galicia Costa, Baleares y Canarias, los Organismos responsables dependen de sus respectivos Gobiernos autónomos.

La ROEA proporciona información de los datos de niveles y caudales en puntos seleccionados de los ríos y en los principales embalses y canales. Consta de unas 1.200 estaciones de aforo en los ríos (de las cuales se encuentran en servicio unas 730), unos 300 puntos de control en embalses mayores de 10 hm³, y unos 180 puntos de control en canales, tal y como muestran la figura 71 y la tabla 5, elaboradas con

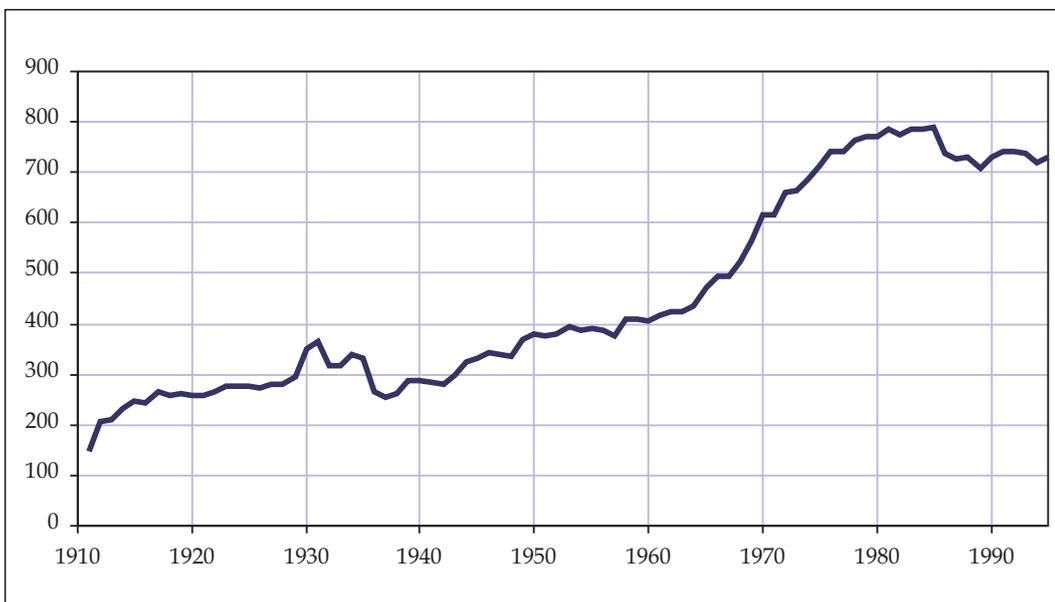


Figura 70. Evolución desde 1910 del número de estaciones de aforo en los ríos

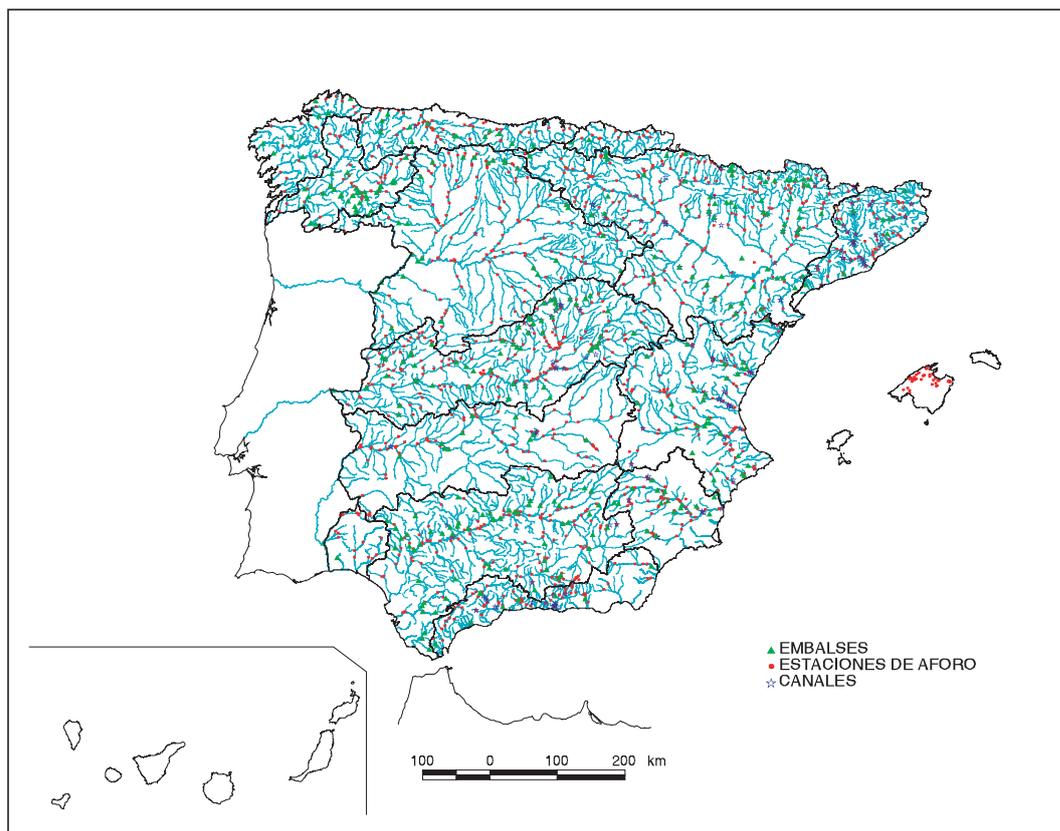


Figura 71. Mapa de la Red de medida de aguas superficiales

información de las Confederaciones Hidrográficas y otros Organismos.

La mayor parte de los datos de estas estaciones se almacena en la base de datos HIDRO diseñada y mantenida por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Quintas, 1996), Organismo que tiene encargo de la DGOHCA de archivar y publicar periódicamente esa información. El dato se almacena y publica a escala diaria, aunque muchas de las estaciones de la red pueden registrar datos de forma prácticamente continua.

Las estaciones que forman parte de la ROEA tienen, en general, instalaciones de carácter permanente, y podrían complementarse con estaciones que funcionasen durante periodos cortos, por ejemplo durante las fases de estudio y proyecto de una obra hidráulica, y que después se abandonarían. Esto debería hacerse en cualquier caso de forma muy selectiva y programada.

Existen otro tipo de redes, como los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH), promovidos por la DGOHCA, e implantados en fase de implantación en los Organismos de cuenca. Los SAIH son una herramienta de gran interés proporciona un conocimiento de la situación hidrometeorológica e hidrológica de cuencas en tiempo real, y permite, con los adecuados modelos, hacer predicciones de ciertas variables a corto plazo (MOPTMA-CHE [1995]; Aldana et al. [1996]).

En la actualidad, la red SAIH cubre sólo parcialmente el territorio español, aunque se prevé a corto plazo su extensión a todas las cuencas peninsulares, y proporciona, entre otros, datos en tiempo real - a escala de pocos minutos - sobre niveles y caudales en ríos y canales, reservas y salidas de los embalses, precipitaciones, etc. En la actualidad, están funcionando total o parcialmente las redes correspondientes a las cuencas hidrográficas del Júcar, Segura, Sur, Ebro, Internas de Cataluña y Guadalquivir, tal y como se muestra en la figura adjunta, y se encuentran en distintas fases de desarrollo las del Tajo, Guadiana, Norte y Duero. Los datos oficiales más antiguos registrados por esta red son de 1988 y corresponden a la cuenca del Júcar, que fue la primera en la que se instaló el sistema (Pedrero, 1996).

Los datos de intensidades de precipitación y caudales en los ríos que proporcionan los SAIH son de gran interés para el estudio de episodios de tormenta, y deben servir de complemento a los datos diarios de la red de estaciones pluviométricas del INM y de la red oficial de estaciones de aforo en los ríos de la DGOHCA (fig. 72).

Aunque las redes anteriores hayan tenido en su origen una finalidad diferente - la ROEA es una red de propósito general de alcance nacional y el SAIH nació como una red específica en tiempo real orientada a las crecidas - en la actualidad sus objetivos y alcances tienden a ser convergentes y concebirse no específicamente para crecidas o explotación, sino como instru-

Ámbito de planificación	Superficie (km ²)(1)	Estaciones de aforo en ríos	Densidad de estaciones de aforo en ríos (1/km ²)	Puntos de control en embalses > 10 hm ³	Estaciones de aforo en canales
Norte I	17.600	14	1/1.257	25	2
Norte II	17.330	32	1/541	8	1
Norte III	5.720	10	1/572	4	0
Duero	78.960	104	1/759	27	1
Tajo	55.810	96	1/581	46	36
Guadiana I	53.180	29	1/1.833	24	8
Guadiana II	7.030	11	1/639	6	0
Guadalquivir	63.240	71	1/891	57	6
Sur	17.950	48	1/374	12	22
Segura	19.120	17	1/1.125	13	11
Júcar	42.900	44	1/975	19	22
Ebro	85.560	171	1/500	46	35
Galicia Costa	13.130	14	1/938	10	1
C.I. Cataluña	16.490	40	1/412	6	31
Baleares	5.010	31	1/162	0	0
Canarias (2)	7.440	-	-	-	-
Total	506.470	732	1/692	303	176

Tabla 5. Puntos de control en servicio de la Red oficial de estaciones de aforo de aguas superficiales

(1): La superficie de los distintos ámbitos es la resultante de integrar la poligonal que define cada uno de ellos, la cual se ha obtenido a partir de la digitalización de las hojas topográficas a escala 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército en coordenadas UTM transformadas al huso 30.

(2): La ROEA no incorpora actualmente información sobre los puntos de control de aguas superficiales en Canarias.

mentos para el conocimiento y control del dominio público hidráulico.

3.1.3.1.3. Redes de aguas subterráneas

Con respecto a las aguas subterráneas, las redes de piezometría e hidrometría son las que aportan datos sobre niveles de agua en los acuíferos y caudales en los manantiales, respectivamente. La red de hidrometría incluye también, ocasionalmente, mediciones de algunos cursos de agua además de los manantiales.

En España, los primeros datos de medidas de niveles piezométricos de los que se tiene referencia se remontan al siglo XIX (época del desarrollo del artesianismo), y corresponden a los primeros pozos de abastecimiento y riegos. Sin embargo, hay que esperar hasta la década de 1960 para el planteamiento de programas sistemáticos de investigación de mayor entidad, iniciándose su desarrollo masivo a finales de esta década (Caride de Liñán [1992]; Martínez Gil [1994]; Cabezas [1994]).

Además de las redes generales, y como en el caso de las redes de aguas superficiales, existen redes específicas, operadas y gestionadas por entidades públicas o privadas. Es el caso de la red del Pirineo Oriental, con unos 400 puntos, algunos desde 1966 y con registros mensuales, y operada en la actualidad por la Junta de Aguas, o de las de algunas Diputaciones Provinciales, como la

Red de Control de la Diputación Provincial de Alicante, que tiene firmado un convenio de intercambio de datos con la Confederación Hidrográfica del Júcar. Esta red consta de 130 puntos de piezometría, 200 de calidad e intrusión y 20 de medida de manantiales.

De las redes existentes destacan, por su mayor aproximación a los objetivos de una red de propósito general de alcance nacional, las de piezometría e hidrometría operadas por el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) desde finales de los años 60 hasta la actualidad. En los últimos años vienen siendo operadas conjuntamente por el ITGE y la DGOHCA.

La red piezométrica cubre unos 135.000 km², del orden del 80% de la superficie permeable del territorio. Consta en la actualidad de unos 3.000 puntos de observación (ver tabla adjunta, con datos del ITGE correspondientes a 1996), en los que se realizan al menos dos medidas al año, siendo lo habitual establecer controles trimestrales y, en algunos casos, mensuales. La figura 73, elaborada a partir de los datos de MOPTMA-MINER-UPC (1993), muestra algunos puntos seleccionados de las indicadas redes (tabla 6).

En cuanto a la red de hidrometría (aforo de manantiales), cubre una superficie del orden de 42.000 km² y se compone de casi 500 puntos de observación.

En los últimos años se ha producido un descenso en el número de puntos de estas redes, como muestra el paso

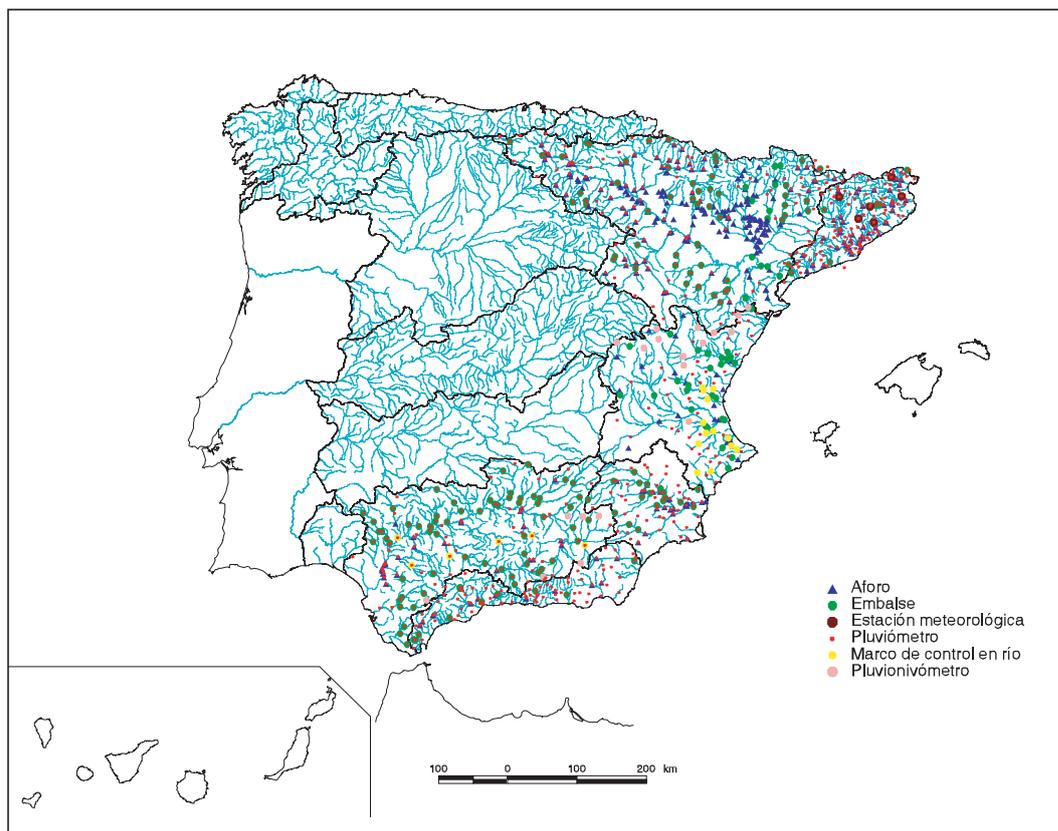


Figura 72. Mapa de la Red SAIH en funcionamiento

de más de 4.500 puntos de la red de piezometría en el periodo 1980 a 1985, a menos de 3.000 en la actualidad. La figura 74 muestra el número de datos piezométricos registrados en la cuenca del Segura desde 1960; aunque se refiere a un territorio concreto, ilustra muy bien el proceso global que se ha seguido.

Como se observa, la toma de datos sistemática comienza a finales de los 60. El gran impulso de investigación de las aguas subterráneas que se dio en la primera mitad de los 70 llegó a producir casi 4.000 datos anuales, mientras

que desde mediados de los 80 la cifra se reduce a unos 1.000, y con altibajos y tendencia decreciente en los 90.

Recientemente, la Administración ha programado una serie de actuaciones con objeto de implantar nuevas redes de medida, que en el futuro constituirán la Red Oficial de Control de las Aguas Subterráneas (MOPT, 1992).

En la tabla 7 se recogen los puntos de medida propuestos, diferenciando los de nueva ejecución y los preexistentes, seleccionados éstos últimos por reunir

Cuenca	Superficie de afloramientos permeables (km ²)	Número de puntos red de piezometría (1996)	Densidad de la red de piezometría (1/km ²)	Número de puntos red de hidrometría (1996)	Densidad de red de hidrometría (1/km ²)
Duero	52.798	284	1/186	-	-
Tajo	17.473	84	1/208	75	1/233
Guadiana	14.740	228	1/65	18	1/819
Guadalquivir	15.157	433	1/35	109	1/139
Sur	5.215	779	1/7	134	1/113
Segura	7.023	170	1/41	35	1/201
Júcar	23.787	334	1/71	22	1/1.081
Ebro	17.047	237	1/72	72	1/237
C.I.Cataluña	6.596	257	1/26	12	1/550
Baleares	3.675	150	1/25	-	-
Total	163.511	2.956	1/55	477	1/343

Tabla 6. Número de puntos de observación de las redes de piezometría e hidrometría.

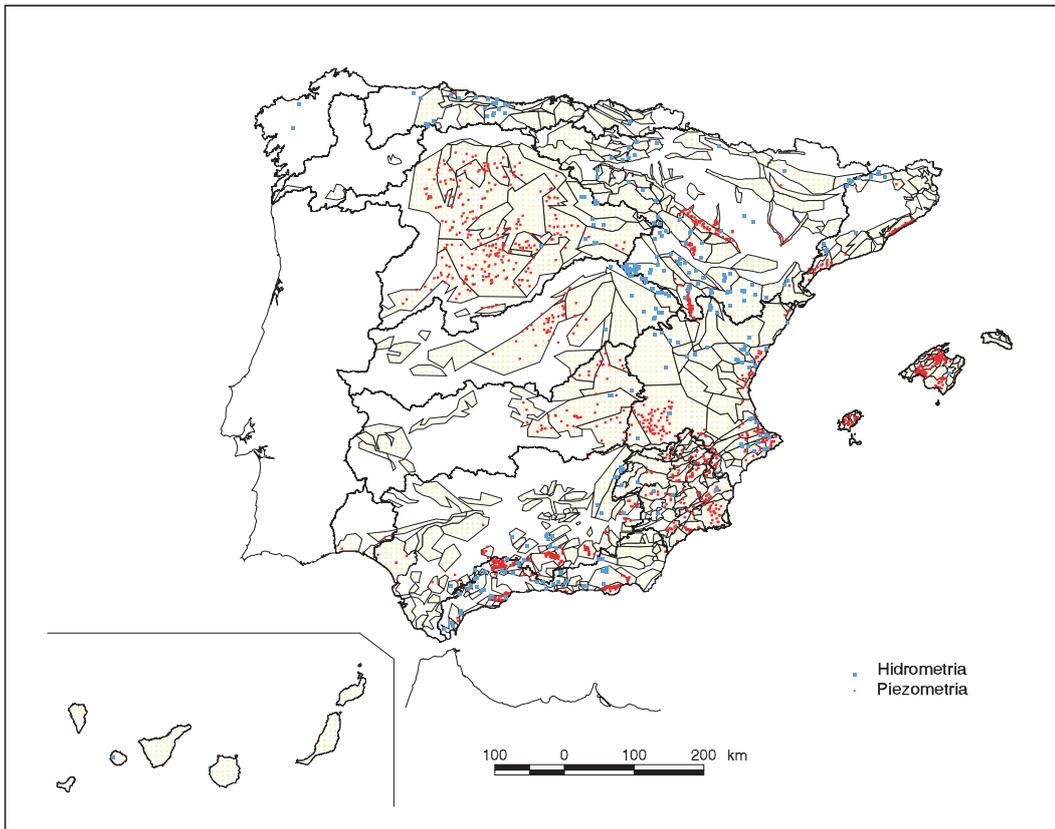


Figura 73. Mapa de puntos seleccionados de las redes de piezometría e hidrometría

las características exigibles a los puntos de control de una red.

Resultan así 1.910 puntos de control, con una superficie permeable aflorante controlada de aproximadamente 160.000 km². La densidad media es de un punto de control cada 85 km², correspondiendo los valores extremos a la cuenca del Duero y al archipiélago Balear, con uno cada 142 y 30 km², respectivamente.

Este programa de implantación de redes de control de aguas subterráneas se inició en 1994 y tenía prevista una duración de 6 años, encontrándose actualmente en ejecución.

Desde 1996, la responsabilidad de la publicación de los datos de estas redes, junto con las de aguas superficiales, corresponde a la DGOHCA del Ministerio de Medio Ambiente.

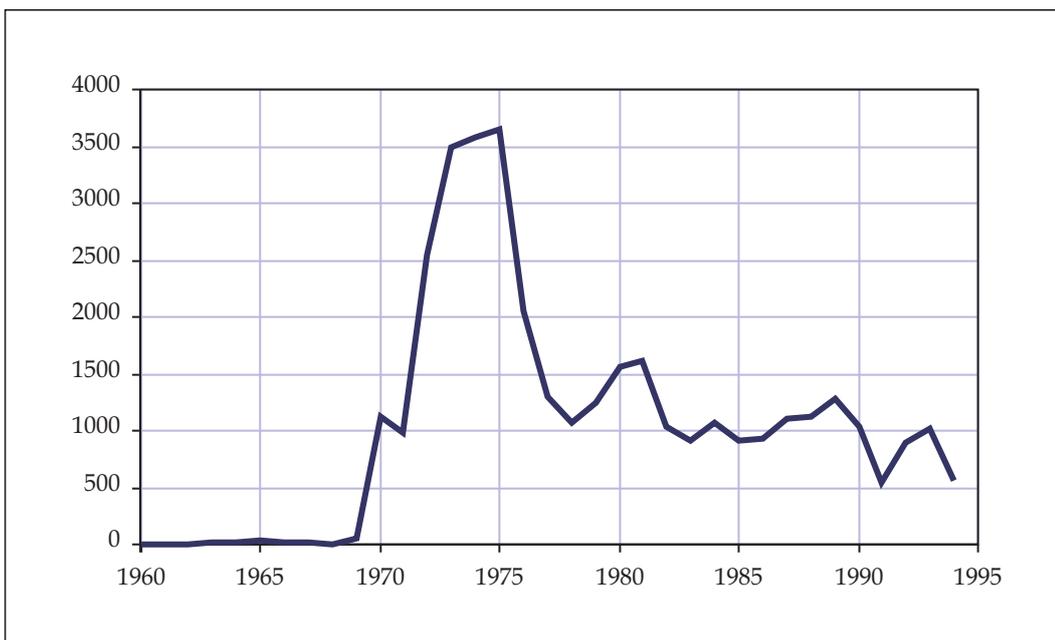


Figura 74. Evolución desde 1960 del número de datos piezométricos en la cuenca del Segura

Cuenca hidrográfica	Sup. permeable aflorante (km ²)	Número de puntos de control			Densidad media (1/km ²)
		De nueva ejecución	Preexistentes	Total	
Norte	5.548	58	20	78	1/71
Duero	52.798	280	93	373	1/142
Tajo	17.473	93	38	131	1/133
Guadiana	14.740	118	86	204	1/72
Guadalquivir	15.157	184	122	306	1/50
Sur	5.215	76	67	143	1/36
Segura	7.023	75	41	116	1/61
Júcar	23.787	121	137	258	1/92
Ebro	17.047	107	71	178	1/96
Baleares	3.675	57	66	123	1/30
Total	162.463	1.169	741	1.910	1/85

Tabla 7. Red nacional de control piezométrico prevista (cuencas intercomunitarias y Baleares)

3.1.3.2. Comparación con otros países

Una vez descrita la situación de nuestras redes básicas, es interesante comparar esta situación con la de otros países del entorno.

Según un estudio de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1991) la densidad de estaciones pluviométricas en España está muy por encima del mínimo recomendado por la OMM y se encuentra, en relación a otros países, en un nivel aceptable. No sucede igual en cuanto a la densidad de la red de medida de aguas superficiales, donde España se encuentra entre los últimos lugares, muy distanciada de otros países de nuestro entorno.

En la tabla adjunta -elaborada a partir de datos de EEA (1996a)- se muestra el número de estaciones de las redes de aguas superficiales de distintos países de la Unión Europea (UE), para los que la densidad media es del orden de una estación cada 270 km² (tabla 8).

El número de estaciones operativas en la red oficial de aforos de ríos en España (732) representa un índice de densidad algo inferior al medio (aproximadamente, una estación cada 600 km²) recomendado por la OMM (1981) para regiones de tipo montañoso, pero es muy inferior - del orden de 1/3 - a la media europea de una

estación cada 270 km², siendo solo superior a los índices de los países escandinavos, con amplias áreas del territorio lacustres y deshabitadas.

Estas cifras subrayan el muy bajo nivel comparativo de la red de aforos de aguas superficiales, hecho aún menos explicable si se tiene en cuenta la mayor escasez de recurso en nuestro país, tal como se verá más adelante.

En cuanto a las aguas subterráneas, en la tabla 9 se muestran las densidades medias de las redes de control piezométrico de algunos países europeos, extractadas de EEA.

Las cifras de la tabla anterior muestran que España tiene unas densidades similares a Portugal, claramente inferiores a Alemania, Austria, Holanda o Inglaterra, y sólo superiores a Dinamarca, país donde se da el mayor porcentaje de uso de los recursos subterráneos respecto al total en toda la Unión Europea, tal y como se verá más adelante.

3.1.3.3. Problemas, conclusiones y propuestas de actuación

De forma general, y sin reserva alguna, ha de señalarse que la cuestión de las redes de medida es una de las

País	Superficie (km ²)	Número estaciones	Densidad media (1/km ²)
Austria	83.850	861	1/97
Dinamarca	43.092	417	1/103
España	506.470	732	1/692
Finlandia	338.130	322	1/1.050
Francia	543.965	3.500	1/155
Irlanda	70.285	1.243	1/56
Italia	301.277	969	1/310
Portugal	92.389	213	1/433
Reino Unido	244.410	1.339	1/183
Suecia	449.960	420	1/1.071
Total	2673.828	10.016	1/267

Tabla 8. Comparación de redes de medida de aguas superficiales en distintos países europeos

País	Densidad media por superficie permeable (1/km ²)	Densidad media por superficie del país (1/km ²)
Alemania	1/3	1/7
Austria	1/8	1/27
Dinamarca	1/216	1/216
España	1/55	1/171
Holanda	1/9	1/10
Inglaterra	-	1/45
Portugal	1/51	1/149

Tabla 9. Densidades medias de las redes de control piezométrico en países europeos

principales asignaturas pendientes en relación con los recursos hídricos en España.

En efecto, tras un importante impulso oficial en la década de los 60, de la mano de las recién creadas Comisarías de Aguas, del Servicio Geológico de Obras Públicas, y de los grandes programas de investigación hidrogeológica auspiciados por el Ministerio de Industria a través del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), en los años 80 y 90 se observa, como vimos, un estancamiento - cuando no disminución - del número de puntos de control existentes, indicativo de cierto desinterés por mejorar y potenciar estas redes. Ello revela, en última instancia, cómo las prioridades de la Administración hidráulica se orientaron en esos años hacia otros objetivos, y no hacia el control y medida del agua, lo que debiera constituir, sin duda, una de sus principales e irrenunciables funciones.

Incluso la red SAIH, que constituye la excepción a esta tendencia y un importante esfuerzo por potenciar la toma de datos, se concibe inicialmente como vinculada a la explotación y a las avenidas, y no como una modernización de las redes oficiales de control del dominio público.

A este descenso en los últimos años, que contrasta, como se ha dicho, con el fuerte impulso que tuvieron las redes hasta principios de los ochenta, hay que añadir una grave falta de medios para el mantenimiento y depuración de la información generada, y, en algunos casos, importantes retrasos en su publicación.

El variado número de redes existentes y de Organismos encargados de su gestión, requiere inexcusablemente que se establezcan procedimientos de unificación e intercambio de la información, lo cual no sucede en la actualidad. Con este Libro Blanco se ha hecho un primer esfuerzo por recopilar una parte importante de la información existente, con la intención por parte de la DGOHCA de proceder a su unificación y publicación en breve plazo.

Entrando ya específicamente en las redes meteorológicas, la principal observación que puede hacerse, en lo que afecta a la evaluación de los recursos hídricos, es que el número de estaciones es muy escaso en las zonas de mayor altitud, tal como se muestra en la figura 75.

La figura 76 muestra asimismo en un primer gráfico la curva porcentual acumulada de superficie del territorio

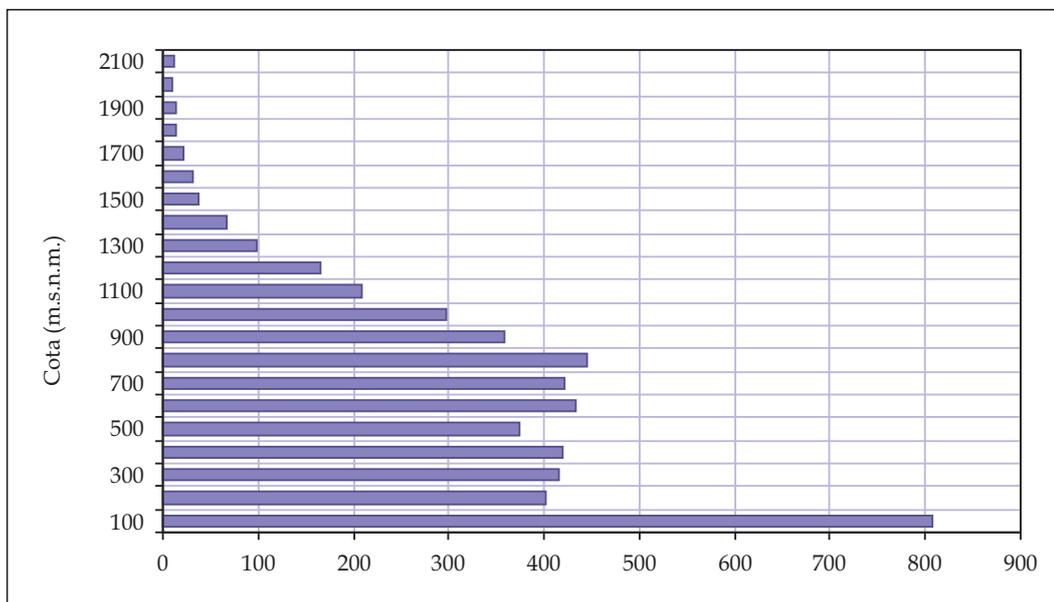


Figura 75. Distribución de las estaciones meteorológicas según su altitud

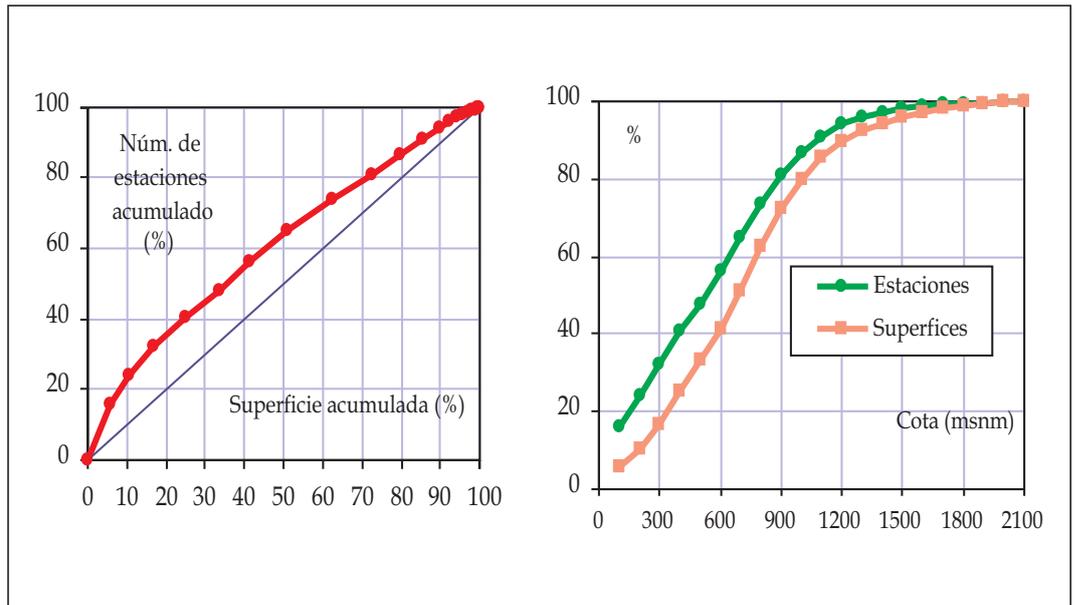


Figura 76. Curva porcentual acumulada de superficie del territorio frente a número de estaciones meteorológicas a las distintas cotas

frente a número de estaciones, con un punto de la curva para cada una de las cotas dadas en la figura anterior, y, en un segundo gráfico, el porcentaje de superficie y de estaciones que se encuentra bajo cada cota.

Puede apreciarse con claridad el sesgo de las estaciones hacia las cotas más bajas, frente a lo que sería una distribución perfectamente uniforme a lo largo de todo el relieve del país (línea azul de los 45° del gráfico primero, o superposición de ambas distribuciones en el

gráfico segundo). Así, mientras que la mitad del territorio español se encuentra bajo la cota 700, el 65% de las estaciones se encuentran bajo esa cota, y en el tercio de tierras con menor altitud se concentra casi el 50% de todas las estaciones.

Una parte importante de los recursos hídricos en España se genera en las cabeceras de las cuencas, donde se sitúa un porcentaje elevado de los embalses, mientras que las estaciones pluviométricas se locali-

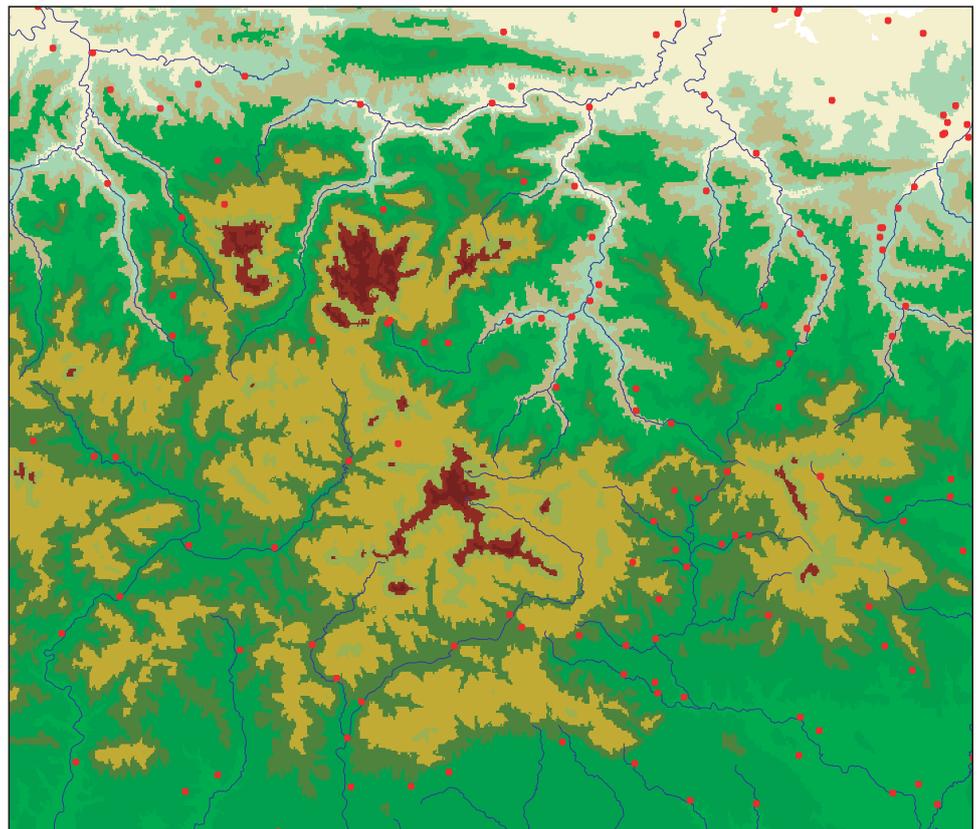


Figura 77. Mapa de distribución espacial de estaciones pluviométricas en los Picos de Europa, sobre un modelo digital del terreno

zan preferentemente en los valles y junto a los cauces, tal y como se muestra en la expresiva figura 77, que representa una zona de la Cornisa Cantábrica. La utilización directa de los datos registrados en las estaciones da lugar a una infravaloración importante del volumen de precipitación, debido al fuerte gradiente de crecimiento de la lluvia con la altitud.

En cuanto a la red oficial de aforos de aguas superficiales, puede afirmarse que su densidad es muy escasa en algunas cuencas, como es el caso del ámbito del Guadiana I, donde sólo se dispone, en media, de una estación de aforo cada 1.800 km². La equiparación de la red española a la media europea supondría prácticamente triplicar su densidad actual.

Otra deficiencia de la red oficial es que no contempla algunos puntos que serían clave para el conocimiento y gestión de los recursos hídricos.

En muchas ocasiones tampoco se tiene una idea precisa de la incertidumbre de los datos de caudal. Éstos se estiman de forma indirecta a partir de los niveles de agua y de la curva de gasto, que relaciona niveles y caudales. Esta curva se obtiene mediante aforos directos, que requieren una atención y un mantenimiento de la estación de aforos que no siempre se da por falta de disponibilidad presupuestaria. Es habitual que los datos de caudales de crecida se estimen a partir de extrapolaciones de la curva de gasto no apoyadas en aforos directos de aguas altas ni en modelos hidráulicos de funcionamiento de la estación, lo que conduce, en ocasiones, a que la fiabilidad de las estimaciones sea baja.

Aunque la mejora de esta red debiera ser una prioridad para la mayoría de los Organismos de cuenca, en la actualidad no existe un programa a escala nacional que contemple la coordinación, modernización, optimización de puntos de control, densificación de la red y mejora en su gestión.

Un programa de estas características debería contribuir a que las nuevas estaciones cumplieren los objetivos básicos de una red de propósito general, como son, entre otros: medir flujos y almacenamientos de agua superficial, tanto en tramos naturales como afectados, evaluar las crecidas de los ríos, complementar la interpretación de los datos de aguas subterráneas y calidad, proporcionar información para la planificación y gestión de los sistemas de explotación de recursos y apoyar la investigación hidrológica. La necesidad de tal programa resulta inexcusable.

La red SAIH también registra datos de aguas superficiales en un gran número de puntos y los transmite en tiempo real. Es deseable una mayor coordinación entre esta red y la ROEA, cuyas responsabilidades, en la mayoría de las ocasiones y por causa de la ya comentada orien-

tación inicial dada a la red SAIH, recaen en diferentes departamentos dentro del mismo Organismo de cuenca. No siempre se tiene en cuenta, por otra parte, que mucho más importante que la transmisión del dato en tiempo real es su fiabilidad, y que ésta solo se consigue con un adecuado mantenimiento y con técnicos especialistas hidrólogos e hidráulicos que no siempre están disponibles en estos Organismos.

Obviamente, será necesario extender las funcionalidades de las redes SAIH a todas las cuencas hidrográficas, completando su cobertura a escala nacional, y potenciando el desarrollo de las utilidades que este tipo de redes de tiempo real pueden proporcionar (alertas hidrometeorológicas para protección civil y planes de emergencia, gestión óptima de embalses en situaciones de crecida, etc.)

En definitiva, es conveniente que aunque diferentes Organismos o departamentos desarrollen y mantengan sus propias redes, se cree una base de datos global que integre toda la información hidrológica existente (convencionales, SAIH, territoriales, etc.) y la haga fácilmente accesible al público en un formato sencillo y homogéneo.

Ante la gran importancia de esta cuestión y la necesidad de mejorar la red oficial, verdadera red básica de medida del agua en España, se requerirá además, en el futuro inmediato, intensificar los esfuerzos de mantenimiento y mejora de esta red, integrar los datos de otras redes y difundir la importante información medioambiental generada.

En cuanto a las aguas subterráneas, las principales observaciones que pueden hacerse a las redes piezométricas e hidrométricas son la baja densidad de estaciones, ya reseñada anteriormente, y que no están diseñadas con criterios técnicos acordes con los objetivos que debe perseguir una red de carácter nacional. Hasta la fecha, salvo pequeñas excepciones, los puntos de control se sitúan en pozos o sondeos construidos para abastecimiento o regadío, generalmente de propiedad privada. Esto origina que la información pueda tener imprecisiones, y sea, en cierto modo, la que históricamente se ha podido encontrar en lugar de la que se desea y se busca.

Además, y como ya se apuntó, en los últimos años se ha producido un descenso en el número de puntos de estas redes, como muestra el paso de más de 4.500 puntos de la red de piezometría en el periodo 1980 a 1985, a menos de 3.000 en la actualidad. Hay que recordar que en 1985 se promulgó una Ley de Aguas que incluía, entre sus grandes decisiones, la demanialización de las aguas subterráneas. Sin embargo, y sor-

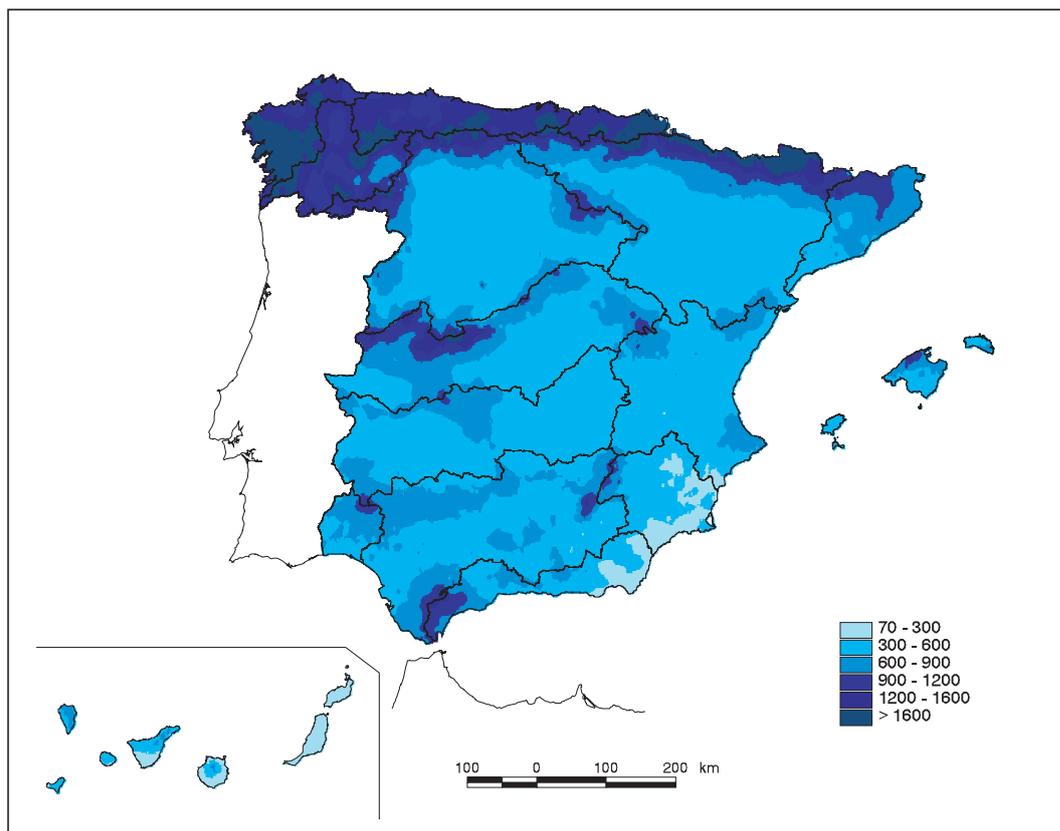


Figura 78. Mapa de valores medios de la precipitación anual (mm) en el periodo 1940/41-1995/96

prevemente, no sólo no se previeron reformas administrativas y actuaciones decididas tendentes a mejorar el conocimiento de estos recursos, sino que este conocimiento fue paulatinamente empeorando desde entonces.

El que en estos momentos se disponga de una información en general más escasa y de peor calidad que de la que se disponía hace veinte años es difícilmente justificable, y no puede entenderse más que en el contexto de una desacertada concepción de los objetivos y funciones de la Administración Hidráulica.

3.1.4. Recursos naturales

La evaluación de recursos hídricos en régimen natural es una tarea compleja que técnicamente aún no está definitivamente resuelta. Debe apoyarse en los datos registrados en las estaciones de aforo, que en la mayoría de las ocasiones miden regímenes afectados.

Como se comentó, la restitución a régimen natural de esos datos, aunque teóricamente sencilla, presenta en la práctica grandes dificultades, pues no es habitual disponer de suficiente información sobre la evolución temporal de los caudales detraídos de los ríos, de los bombeos en los acuíferos, de los retornos de riegos o abastecimientos, o de la gestión de la infraestructura hidráulica. Por esa razón debe también recurrirse, de forma combinada, a la utilización de modelos matemáticos de simu-

lación del ciclo hidrológico, cuya finalidad es reconstruir el régimen hidrológico natural a partir de datos meteorológicos, de las características físicas de las cuencas y de los datos registrados en las estaciones de aforo. Como se verá, tal aproximación combinada es la que se ha llevado a cabo en este Libro y, por vez primera, de forma distribuida y masiva para todo el país.

3.1.4.1. Escorrentías totales en régimen natural

Para el estudio de las escorrentías totales que se producen en nuestro territorio se analizará, en primer lugar, el régimen de precipitaciones y el de evapotranspiración. Estas son las dos variables climáticas básicas que, con el control geológico establecido por el terreno, configuran el régimen de las escorrentías. Tras ello se ofrecerá una evaluación de estas escorrentías totales, y se expondrán los procedimientos empleados y resultados obtenidos en el proceso de evaluación.

3.1.4.1.1. Precipitaciones

A escala interanual, la variabilidad espacial de las precipitaciones en España se muestra en el mapa adjunto, donde se reflejan los valores medios anuales de precipitación (en mm) para el periodo de 56 años comprendido entre los años hidrológicos (de octubre a septiembre) 1940/41 y 1995/96. Los valores que se muestran en el mapa se han obtenido interpolando los datos

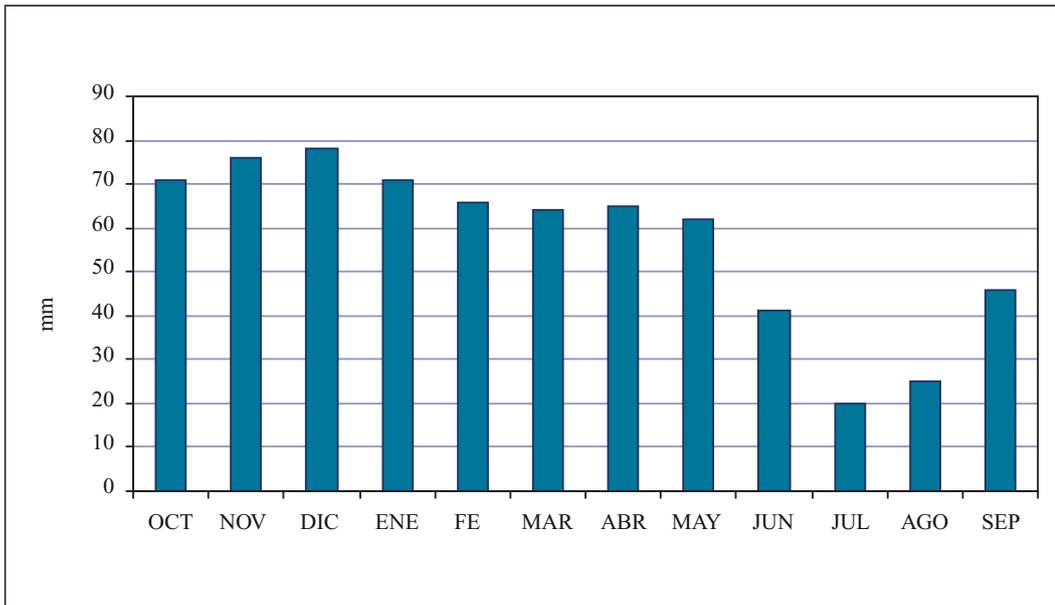


Figura 79. Distribución mensual de la precipitación media en España

registrados en los pluviómetros de la red del INM mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado (fig. 78).

Los valores de precipitación anual varían mucho, desde los más de 1.600 mm en extensas zonas del territorio, en las que se superan incluso los 2.000 mm, a los 300 mm de amplias áreas del Sureste peninsular y los menos de 200 mm en algunas zonas de las Islas Canarias. La media para España es de 684 mm/año - equivalentes, como ya se vio, a 346 km³/año- y su distribución intraanual, a escala mensual, se muestra en la figura 79, en la que puede verse que, a escala global, el mes más lluvioso es el de diciembre, y el menos lluvioso es el de julio.

Es interesante también comprobar en esta figura la similitud de valores en el periodo entre enero y mayo,

resultante, sin duda, del efecto de superposición y promedio de distintos regímenes pluviométricos en diferentes áreas del país.

Por otra parte, y como complemento de la descripción de la variabilidad espacial, para caracterizar la variabilidad temporal de la lluvia en una zona se utilizan en general valores medios areales de una serie de precipitaciones suficientemente larga. En la figura 80 se muestran los valores anuales de precipitación media areal en España en el periodo de 56 años entre 1940/41 y 1995/96, junto con la media global para ese periodo.

El examen de la serie anterior pone de relieve que las rachas de años secos son más largas que las húmedas, como corresponde a datos no gaussianos y con sesgo positivo. Las dos rachas secas más largas, entendiéndose

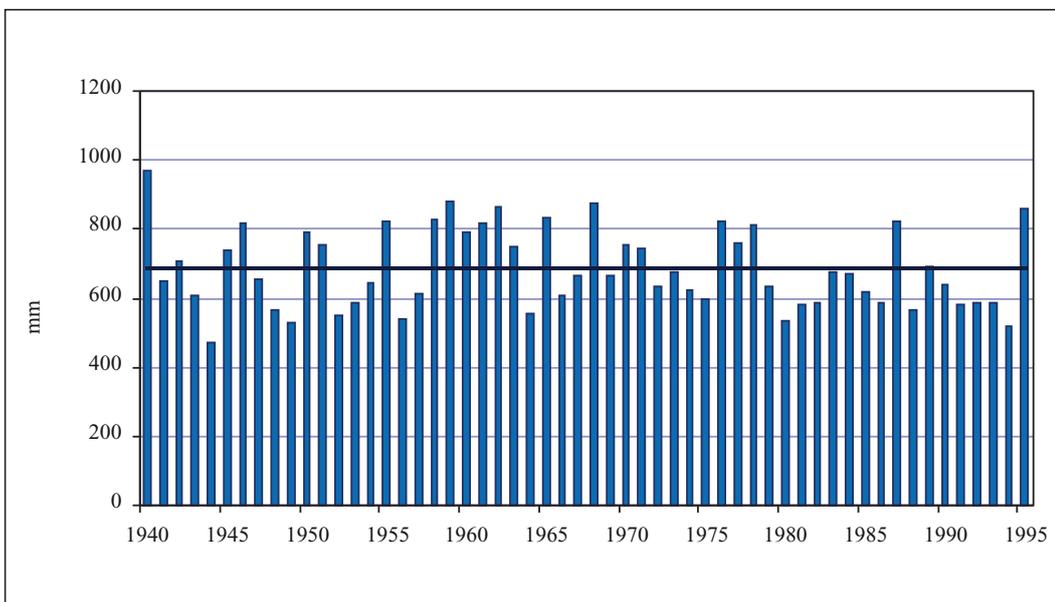


Figura 80. Serie de precipitaciones anuales medias en España en el periodo 1940/41 - 1995/96

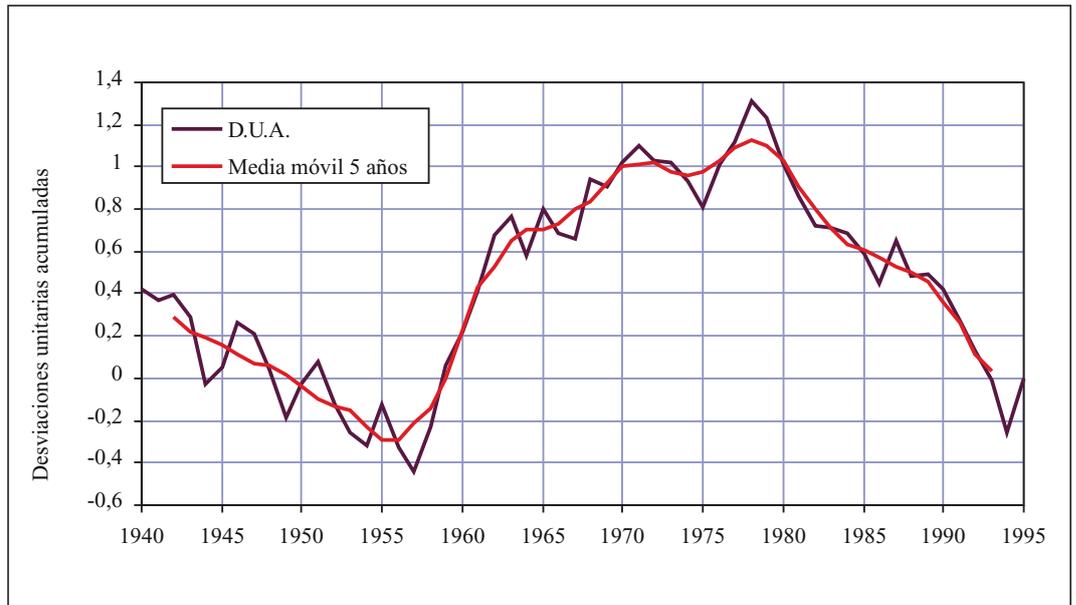


Figura 81. Rachas de la precipitación media anual en España en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

por tales aquéllas donde no se supera la media de la serie, tienen una duración de 8 (periodo 1979/80 a 1986/87) y 5 años (1990/91 a 1994/95), mientras las dos húmedas más largas son de 6 (1958/59 a 1963/64) y 3 años (1976/77 a 1978/79). Es también interesante destacar que durante el periodo de 17 años comprendido entre 1979/80 y 1995/96, sólo en 3 ocasiones se ha excedido la media de la serie, lo que es bien ilustrativo, como veremos, de los graves problemas de escasez de agua que se han producido en los últimos años en muchos lugares de España.

Para apreciar mejor estas rachas de una forma global, se ha construido la serie de desviaciones unitarias acumuladas (desviación es la diferencia de un valor con respecto a la media de la serie, y desviación unitaria es la desviación dividida por la media), ofrecida, junto con su media móvil centrada de 5 años, en el gráfico adjunto. Tendencias crecientes reflejarán rachas húmedas, y tendencias decrecientes reflejarán rachas secas (fig. 81).

Es claramente perceptible en la figura anterior la existencia de 3 periodos distintos: uno globalmente seco

desde 1940 hasta 1957, al que sigue uno globalmente húmedo desde 1958 hasta 1978 (acaso con dos subperiodos de distinta intensidad separados por 1963), y al que, finalmente, sigue otro seco desde 1979 hasta 1995. Hasta qué punto tales rachas globales son representativas de los distintos territorios se verá más adelante, cuando volvamos sobre estas interesantes cuestiones al analizar otras rachas hidroclimáticas, las diferencias regionales, y el problema de la representatividad de los registros hidrológicos.

Un aspecto de interés es el de la estructura de autocorrelación de las lluvias anuales (es decir, las relaciones de dependencia de la lluvia de un año con respecto a las de los años pasados). Para su contraste, la figura 82 muestra las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la serie, junto con sus intervalos de confianza del 95%.

Ambas funciones muestran con nitidez la inexistencia de dependencia temporal de las precipitaciones anuales, lo que significa que no puede mejorarse la predicción de la pluviometría del año siguiente considerando la de los

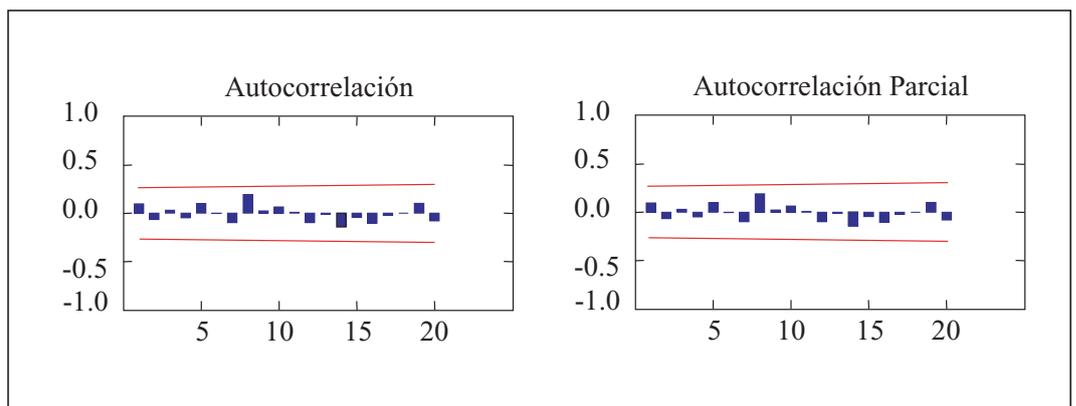


Figura 82. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de las precipitaciones medias anuales en España en el periodo 1940/41-1995/96

Ambito de Planificación	Mínimo	Medio	Máximo	Máx/Mín	Coef. de variación	Coef. de sesgo	1er coef. de autocorrelación
Norte I	797	1.284	2.017	2,5	0,22	0,62	0,08
Norte II	899	1.405	1.888	2,1	0,14	-0,24	0,07
Norte III	958	1.606	2.282	2,4	0,16	-0,15	0,03
Duero	381	625	931	2,4	0,21	0,40	-0,02
Tajo	374	655	1.037	2,8	0,23	0,32	0,05
Guadiana I	261	521	755	2,9	0,25	0,07	0,19
Guadiana II	278	662	1.142	4,1	0,30	0,31	0,14
Guadalquivir	272	591	1.026	3,8	0,28	0,40	0,27
Sur	247	530	908	3,7	0,27	0,71	0,17
Segura	221	383	643	2,9	0,26	0,36	0,27
Júcar	302	504	805	2,7	0,21	0,61	0,19
Ebro	526	682	925	1,8	0,16	0,54	0,12
C. I. Cataluña	437	734	1.147	2,6	0,22	0,64	-0,18
Galicia Costa	929	1.577	2.324	2,5	0,20	0,27	0,01
Península	472	691	985	2,1	0,17	0,40	0,11
Baleares	381	595	975	2,6	0,23	0,76	0,20
Canarias	119	302	574	4,8	0,33	0,55	0,05
Total España	469	684	970	2,1	0,17	0,39	0,10

Tabla 10. Estadísticos básicos de las series de precipitaciones anuales areales correspondientes al periodo 1940/41-1995/96, por ámbitos de planificación hidrológica

anteriores, pues cada año es enteramente independiente del anterior, y se trata de un fenómeno sin memoria.

Asimismo no se observan, en apariencia, ciclos pluviométricos plurianuales de naturaleza periódica. Fenómenos como el del ciclo de actividad solar (relacionado con las manchas solares, que presentan periodos de unos 11 años) no parecen incidir sobre la pre-

cipitación media que se registra en España. Es curioso constatar que esta hipotética relación, muy estudiada en registros de todo el mundo desde la década de los 60, ya fue anticipada en nuestro país por Bentabol (1900), concluyendo - tras el estudio de Almería, el Ebro, Valencia, Valle del Guadalquivir, Castilla, Murcia y Francia -, que la periodicidad de las sequías

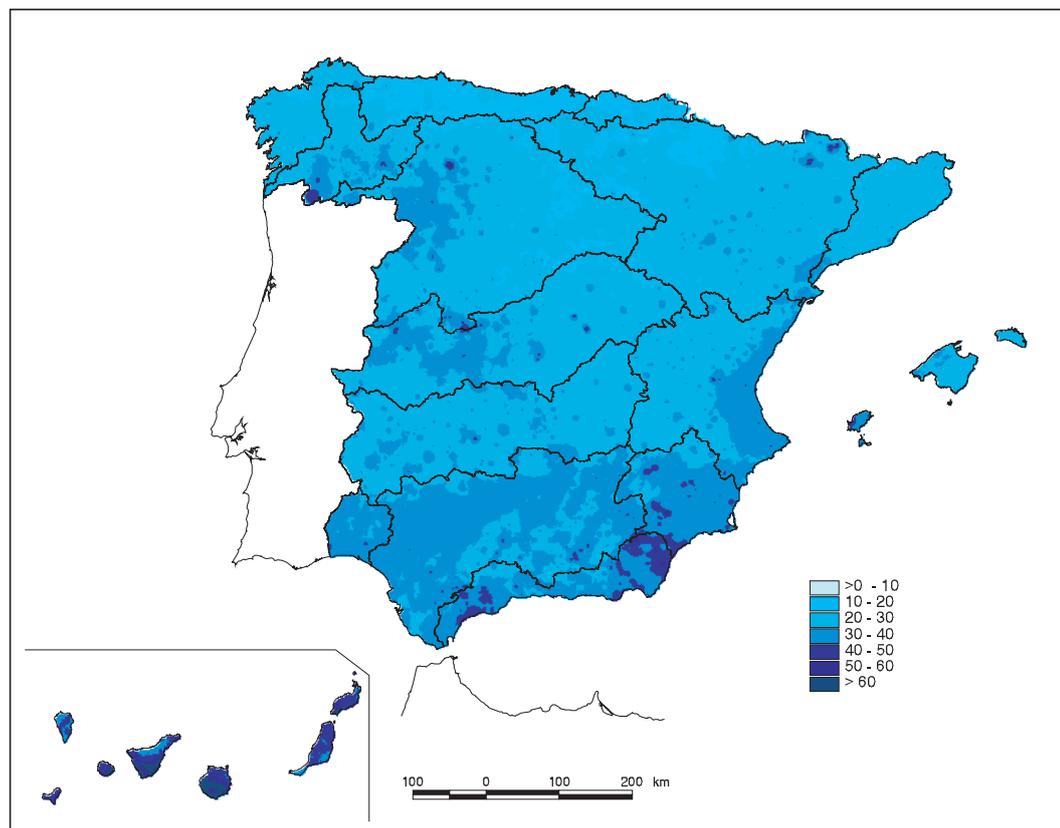


Figura 83. Mapa de coeficientes de variación (%) de la precipitación anual en el periodo 1940/41-1995/96

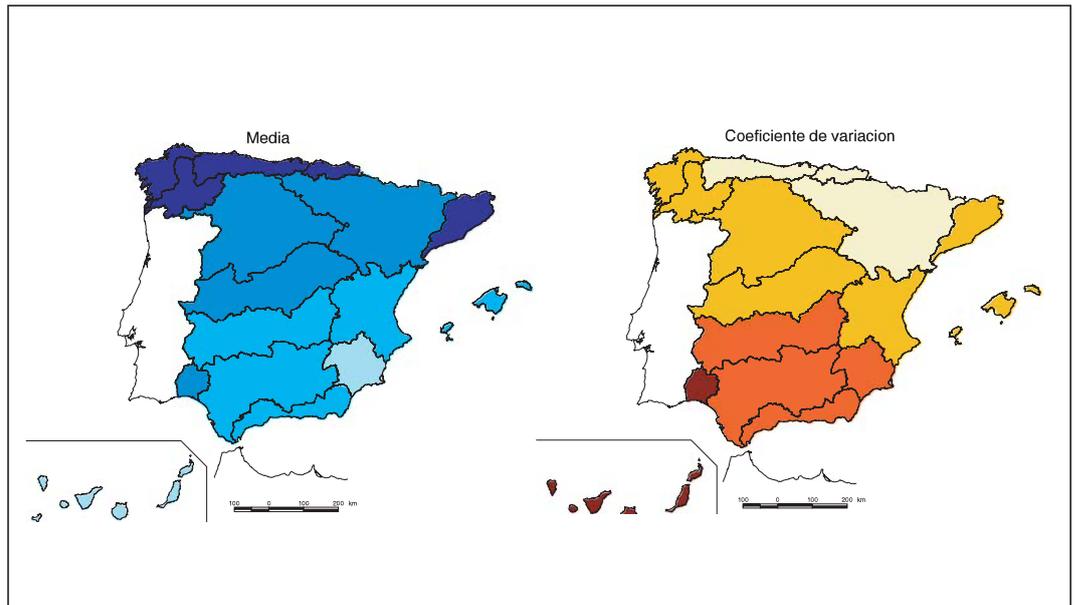


Figura 84. Mapas de medias y coeficientes de variación de las precipitaciones anuales por ámbitos de planificación

e inundaciones se daba aparentemente conforme al ciclo solar de modo generalizado y, muy especialmente, en Murcia. Como puede verse, los modernos análisis del registro pluviométrico no permiten soportar en la actualidad esta vieja hipótesis.

Considerando ahora las distintas áreas territoriales, en la tabla 10 se ofrecen distintas medidas estadísticas básicas de las series de precipitaciones areales anuales, para el periodo 1940/41 a 1995/96, en cada uno de los ámbitos territoriales de la planificación hidrológica.

Como puede verse, no solo hay grandes diferencias interterritoriales en las cuantías medias anuales de las lluvias, sino también en su variabilidad relativa, medida por el coeficiente de variación (cociente entre desviación típica y media). El mapa de la figura 83 mues-

tra la distribución espacial de este coeficiente, expresado en tanto por ciento.

Puede apreciarse que, sin perjuicio de la simplificación de emplear promedios areales de los ámbitos, que suavizan los valores puntuales extremos de su interior, las zonas de menor precipitación (Sur, Sureste, Islas Canarias, etc) tienen un coeficiente de variación mayor, lo que añade a la escasez en la precipitación una mayor irregularidad temporal. Lo contrario ocurre en las zonas de mayor precipitación, donde el coeficiente de variación es menor.

La figura 84 permite apreciar de forma visual y cualitativa, mediante la mera gradación cromática, este efecto de contraposición entre la cantidad y la variabilidad de las lluvias, a las escalas espaciales de los ámbitos de planificación.

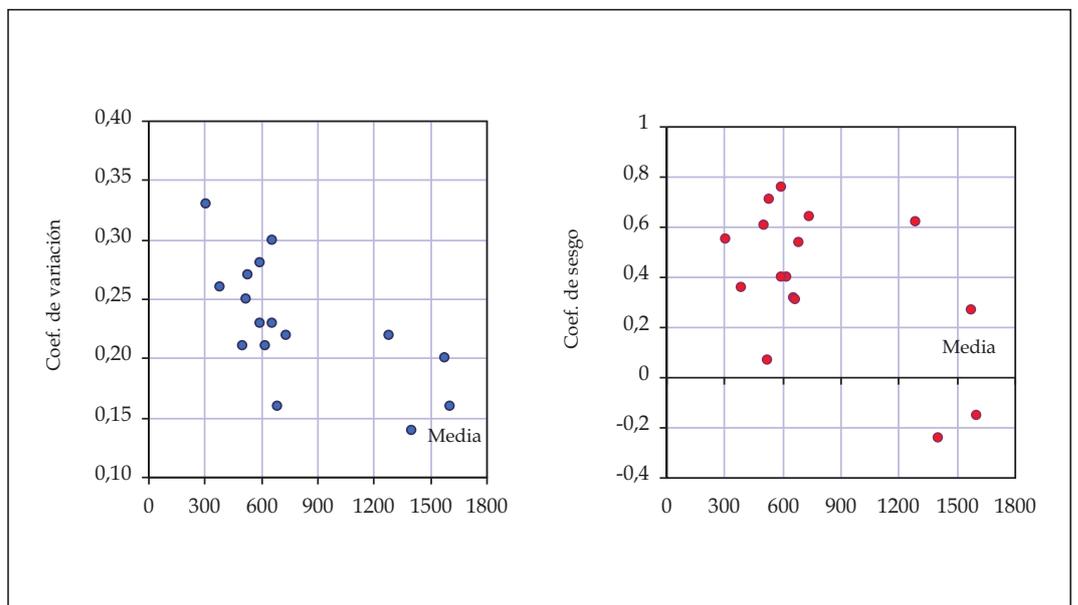


Figura 85. Precipitaciones medias frente a coeficientes de variación y de sesgo por ámbitos de planificación

	GAC	NO1	NO2	NO3	DUE	TAJ	GN1	GN2	GUV	SUR	SEG	JUC	EBR	CIC	BAL	CAN
GAC	1	0	0	1	0	0	0	0.08	0	1	1	1	0	1	1	1
NO1	0.84	1	0	1	0	0	0	0	0	0.87	1	1	0	1	1	1
NO2	0.58	0.62	1	0	0.1	0.61	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
NO3	0.3	0.23	0.82	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.13	1	1	1
DUE	0.73	0.85	0.43	0.06	1	0	0	0	0	0	1	0.48	0	1	1	1
TAJ	0.59	0.78	0.37	0.03	0.92	1	0	0	0	0	1	0.1	0	0.96	1	1
GN1	0.59	0.71	0.33	0.02	0.85	0.92	1	0	0	0	1	0.02	0	0.56	1	1
GN2	0.44	0.53	0.14	-0.14	0.75	0.83	0.87	1	0	0	1	0.17	0.01	1	1	0.16
GUV	0.55	0.67	0.33	0.02	0.8	0.87	0.95	0.87	1	0	1	0.03	0	0.11	1	1
SUR	0.19	0.36	0.11	-0.14	0.54	0.67	0.73	0.78	0.83	1	0	0	0.08	0.45	1	1
SEG	0.01	0.04	0.02	-0.03	0.18	0.22	0.31	0.24	0.32	0.53	1	0	1	1	1	1
JUC	0.19	0.21	0.15	0.05	0.38	0.43	0.48	0.42	0.47	0.54	0.84	1	0	0	0.18	1
EBR	0.58	0.68	0.65	0.42	0.73	0.7	0.67	0.5	0.67	0.44	0.33	0.59	1	0	1	1
CIC	0.21	0.24	0.25	0.13	0.32	0.35	0.37	0.3	0.43	0.38	0.32	0.52	0.71	1	1	1
BAL	-0.07	0.09	0.22	0.14	0.03	0.1	0.06	-0.02	0.12	0.18	0.34	0.41	0.25	0.33	1	1
CAN	0.08	-0.02	0.04	-0.01	0.2	0.24	0.21	0.42	0.23	0.34	0.16	0.25	0.17	0.21	-0.11	1

Tabla 11. Matriz de correlación de las precipitaciones anuales areales por ámbitos de planificación hidrológica

Igualmente, los gráficos de la figura 85 muestran también el efecto de contraposición aludido, que parece asimismo darse -con la debida reserva de su alta variabilidad muestral- con los coeficientes de sesgo, indicadores de asimetría positiva y, por tanto, de una mayor presencia de extremos elevados.

En efecto, la observación de la tabla de estadísticos básicos muestra que el coeficiente de sesgo, aunque pequeño, en buena parte de los ámbitos adopta valores positivos significativamente distintos de cero, lo que indica un

cierto grado de asimetría en la distribución de la precipitación anual, siendo más probable la presentación de valores inferiores a la media que superiores, tal y como se comentó. En cuanto a la autocorrelación temporal, se observa que el valor del primer coeficiente de autocorrelación es muy pequeño y no significativo en todos los ámbitos, lo que confirma la ya apuntada independencia temporal de las precipitaciones anuales.

Avanzando en el estudio de la estructura espacio-temporal de estas lluvias, la tabla 11 muestra la matriz de

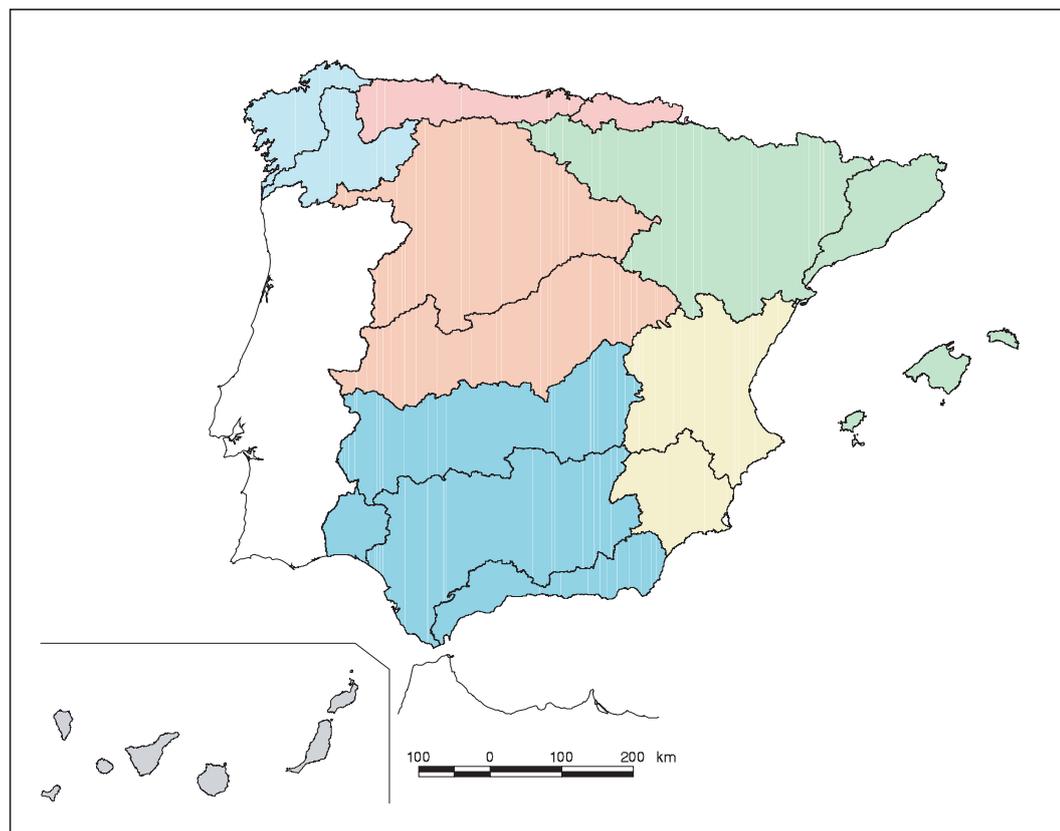


Figura 86. Regiones pluviométricas de los ámbitos territoriales de planificación

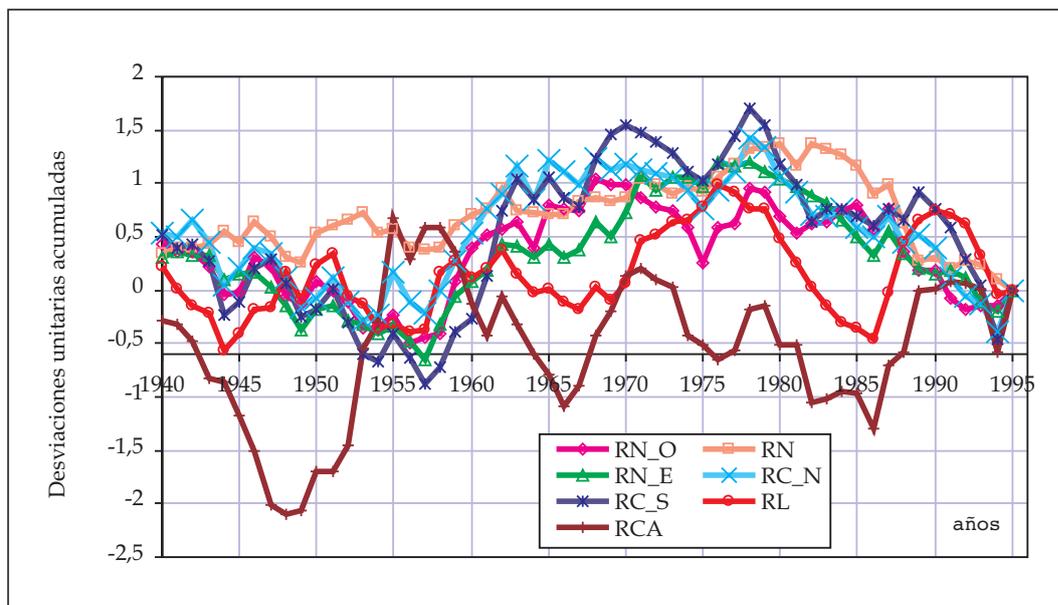


Figura 87. Rachas de la precipitación media anual por regiones pluviométricas en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

correlación de las precipitaciones anuales, para el periodo 1940/41-1995/96, en los distintos ámbitos. De forma compacta, y puesto que esta matriz es simétrica, en la mitad inferior y diagonal se muestran los coeficientes de correlación, y en la superior una estimación de las probabilidades asociadas a estos coeficientes (1 implica no correlación y 0 implica correlación significativa).

La observación de esta tabla permite obtener la interesante conclusión de que existen correlaciones significativas entre grupos de ámbitos, pero no de todos entre sí. Ello significa que existen en España áreas con regímenes pluviométricos independientes, no dándose sensiblemente las rachas secas y húmedas con simultaneidad en todo el país, lo que viene a subrayar, una vez más, la variedad hídrica del territorio español.

Además, todas las correlaciones son nulas o positivas, y no existe, entre ningún par de ámbitos, ninguna correlación negativa significativa. Ello implica que o no hay simultaneidad o hay una cierta simultaneidad de sequía y abundancia, pero no hay, significativamente, sequía en una zona mientras hay abundancia en otra, y viceversa.

Avanzando aún más en la indagación de la estructura espacio-temporal de las precipitaciones y en la exploración de su comportamiento relativo en los distintos territorios, la observación de correlaciones significativas entre ámbitos sugiere estudiar sus posibles afinidades, reduciéndolos a áreas similares desde el punto de vista de las precipitaciones anuales.

Si se realiza un análisis de agregaciones mediante cluster jerárquico, se obtienen algunos agrupamientos muy persistentes entre ámbitos. Así, Norte II y Norte III aparecen siempre agrupados, del mismo modo que

Júcar y Segura; que Tajo y Duero; y que Guadiana I y Guadalquivir. Considerando globalmente estos cuatro grupos básicos, su proximidad entre ellos, y el resto de agrupamientos obtenidos, puede proponerse tentativamente una regionalización muy robusta de los ámbitos de planificación, desde el punto de vista de las precipitaciones anuales, en siete clases, que serían las ofrecidas en la figura 86.

Una gran zona es la central o atlántica (azul), que puede subdividirse en norte (C_N: Duero y Tajo) y sur (C_S: Guadiana, Guadalquivir y Sur); otra zona es la de levante (L: Júcar y Segura); otra sería la noreste (N_E: Ebro, Baleares y C.I.Cataluña); otra es la norte o cantábrica (N: Norte II y Norte III); otra la noroeste (N_O: Galicia Costa y Norte I); y, por último, otra sería Canarias (CA).

La organización regional propuesta permite revisar la cuestión que se planteó sobre las rachas pluviométricas húmedas y secas, pero descendiendo ahora al nivel de la región en lugar de a la media global del país, y empleando regiones rigurosamente establecidas.

Así, y como antes se hizo para la media areal global, se han construido las curvas de desviaciones unitarias acumuladas de las precipitaciones regionales, ofrecidas conjuntamente en la figura 87.

Un primer examen de este gráfico muestra que, en efecto, existen en apariencia diferencias regionales que hacen que las secuencias de rachas en las distintas cuencas no resulten ser las mismas. Una inspección más detallada permite diferenciar las situaciones mostradas en la figura 88.

Como se aprecia, la mayoría de las cuencas (Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Sur, Ebro, C.I. de Cataluña, Norte I, Galicia Costa y Baleares) ha segui-

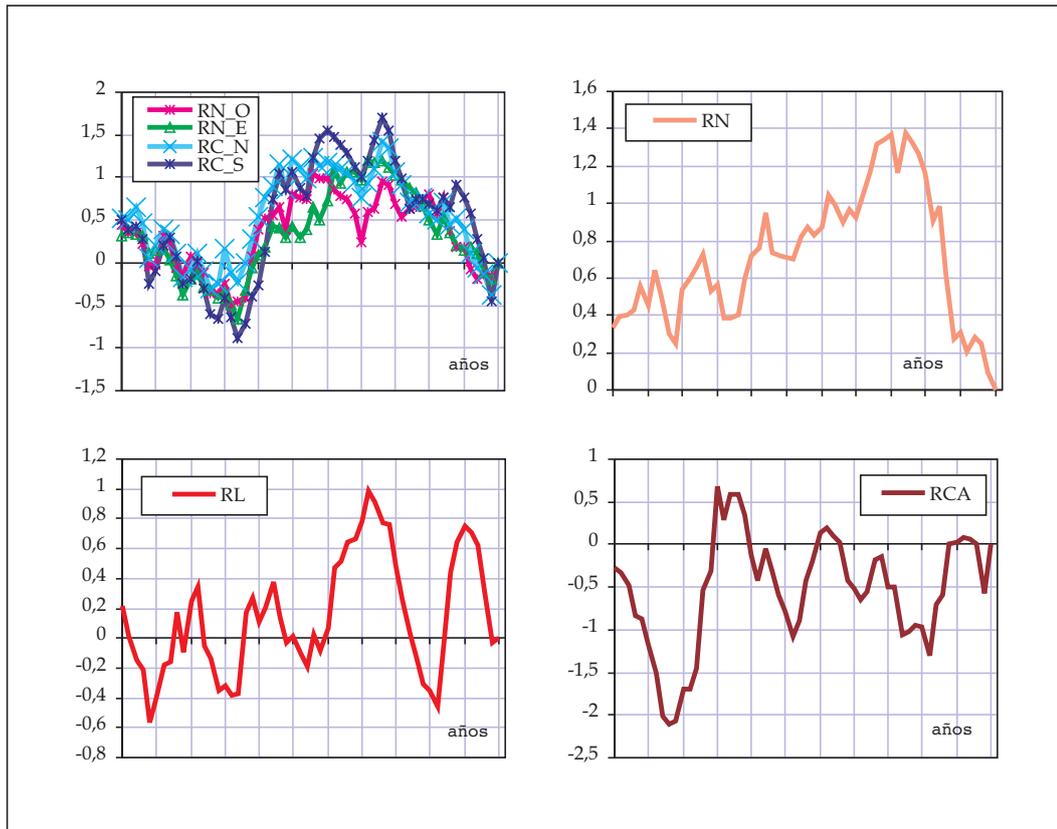


Figura 88. Distintas situaciones de las rachas de la precipitación media anual por regiones pluviométricas en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

do un patrón muy similar, que es, sensiblemente, el que se ofreció antes como representativo de la media global del país, pero hay tres regiones (Levante, Norte y Canarias) que parecen haber seguido patrones diferentes a éste, y diferentes entre sí.

Asimismo, se observa cómo desde finales de los 70 hay una racha seca, más o menos exacerbada, en todas las regiones, y con algún altibajo en el periodo 1985-90, a partir del cual es completamente generalizada. Como se apuntó, ello explica, entre otras razones, la grave crisis de suministro hídrico que se vivió en muchos lugares de España en estos últimos años.

El grado de detalle de todos los análisis anteriores se justifica por un hecho básico, y es que, como ya se ha apuntado, la precipitación es el origen de los recursos hídricos, excita y gobierna la respuesta hidrológica, y su variabilidad es la principal fuente de la irregularidad de los caudales de los ríos. En efecto, la variabilidad pluviométrica se transmite, y de forma más acusada, amplificada, a los datos de escorrentía, tal como se verá más adelante. Regiones de comportamiento pluviométrico similar serán probablemente regiones con comportamiento hidrológico también similar, y rachas pluviométricas húmedas o secas se traducirán, con mayor o menor rezago, en rachas de caudales del idéntico signo.

Por otra parte, si en lugar de datos anuales se emplean datos a escalas más pequeñas (p.e. men-

suales, diarios u horarios), este efecto de irregularidad se ve aún más acentuado.

3.1.4.1.2. Evapotranspiración

Como se mostró en el epígrafe anterior, la precipitación (P) media anual en España es de 684 mm, equivalentes a unos 346.000 hm³/año, cifra que, como también se vio, está sujeta a una gran variabilidad temporal y espacial.

Por otra parte, la evapotranspiración potencial (ETP) media anual en España, mostrada en la figura 89, es, en el mismo periodo, de 862 mm, presentando sus máximos en la mitad meridional de la península, Canarias, y el valle central del Ebro. Este mapa de ETP se ha obtenido aplicando el método de Thornthwaite y corrigiendo los resultados por unos factores mensuales, regionalizados para todo el territorio, deducidos del contraste de los métodos de Thornthwaite y Penman-Monteith.

La evapotranspiración real (ET), mostrada en la figura adjunta, presenta en el mismo periodo un valor medio global de 464 mm/año, siendo bastante menor que la ETP, al no darse siempre las condiciones óptimas de humedad en el suelo para que se produzca la evapotranspiración a su tasa potencial. Como es lógico, las mayores diferencias relativas se darán en los territorios más secos, y las menores diferencias en los

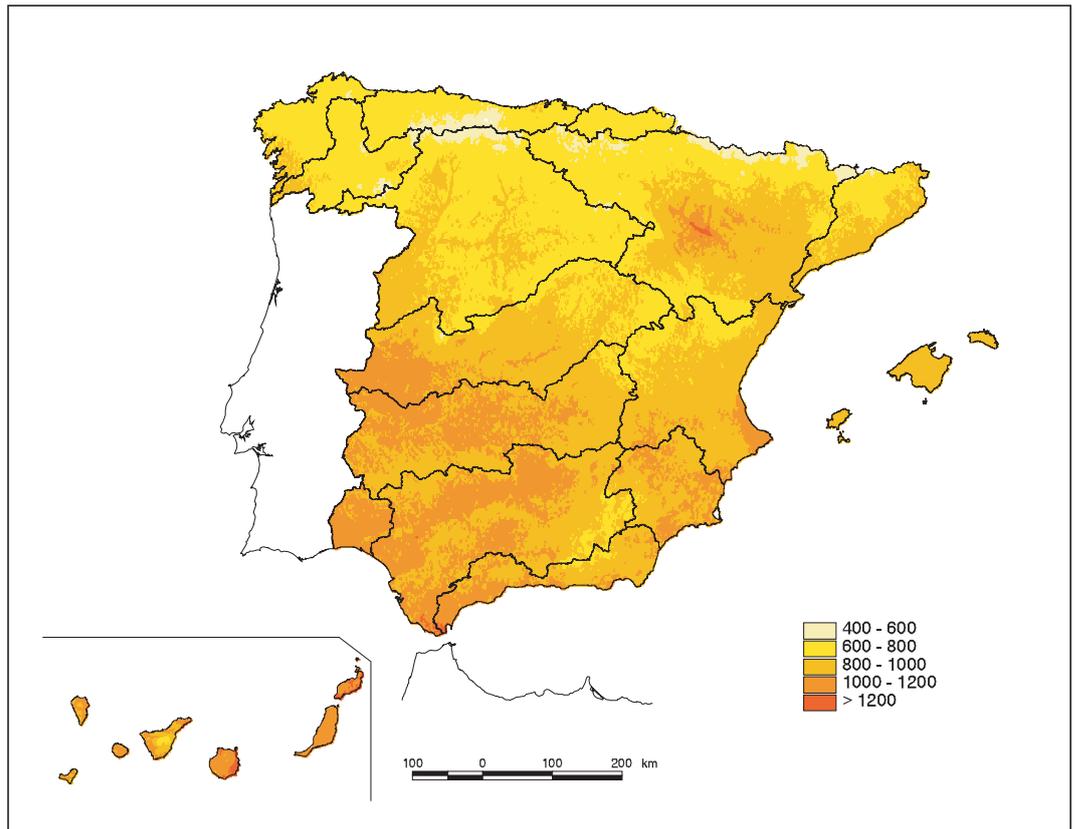


Figura 89. Mapa de evapotranspiración potencial media anual en mm (periodo 1940/41-1995/96)

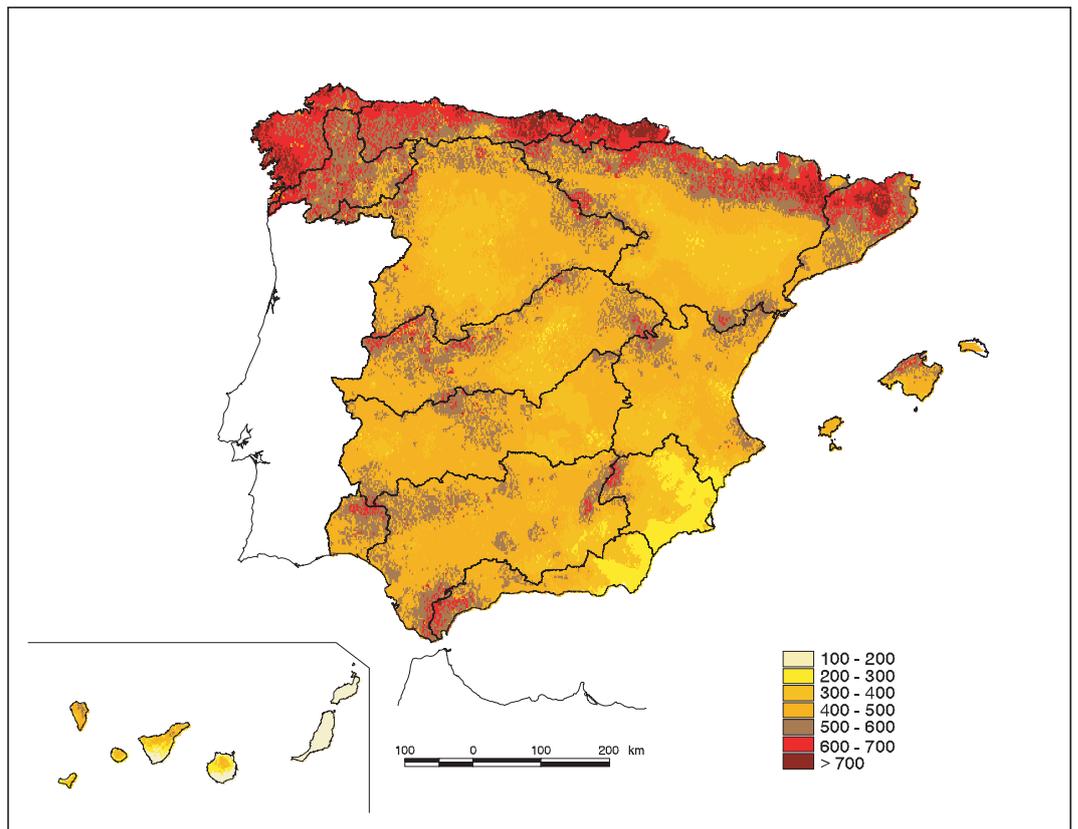


Figura 90. Mapa de evapotranspiración real media anual en mm (periodo 1940/41-1995/96)

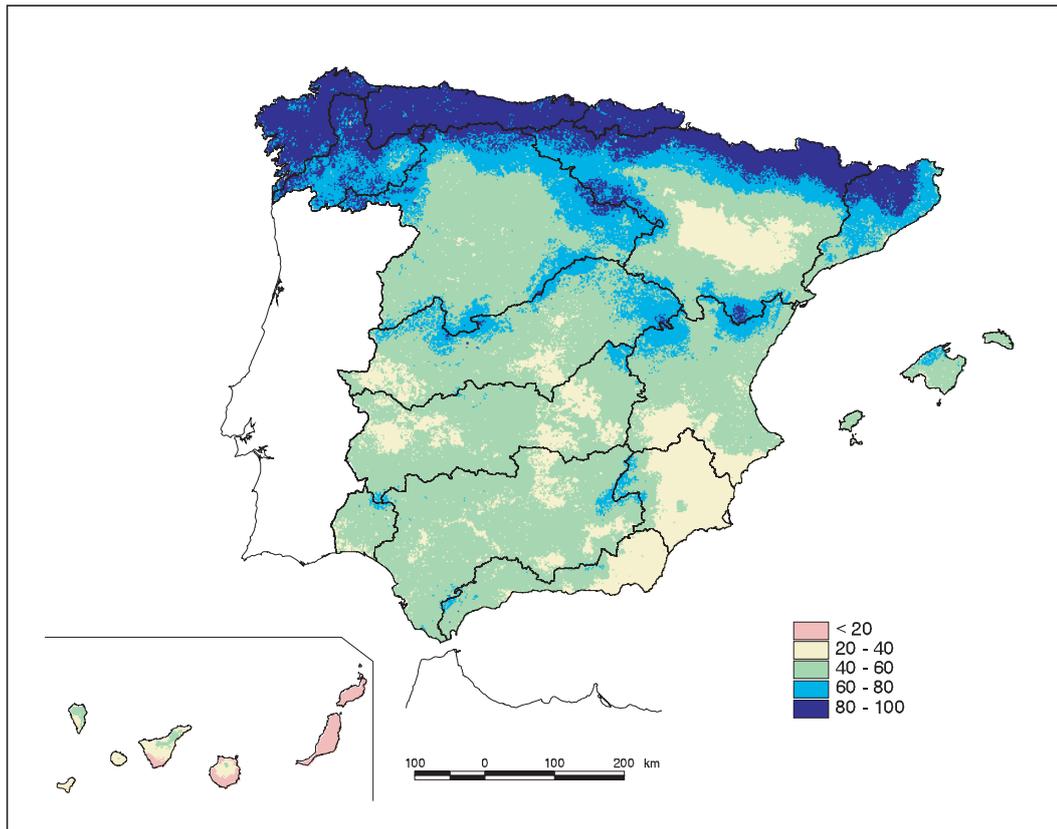


Figura 91. Mapa de la relación ET/ETP (%) (periodo 1940/41-1995/96)

más húmedos. Esa evapotranspiración se ha obtenido mediante el modelo hidrológico distribuido que se describe en apartados siguientes (fig. 90).

La diferencia entre ET y ETP puede verse en el mapa de la figura 91, que muestra la fracción porcentual ET/ETP que, en valor medio para el conjunto del territorio es de 0,54, y que varía desde 0,18 en Canarias a 0,97 en el ámbito del Norte III.

Puede apreciarse el comentado efecto de aumento del cociente con la mayor humedad de la zona.

3.1.4.1.3. Lluvia útil

Recordando el esquema conceptual del ciclo hidrológico y el gráfico de los principales flujos de agua en régimen natural, ofrecidos en anteriores epígrafes, puede verse que si a las precipitaciones se le resta la evapotranspiración, lo que queda es el agua que, bien de forma subterránea o de forma superficial, contribuirá a la escorrentía total y es susceptible, por tanto, de ser utilizada. Esta es la razón por la que a tal diferencia se le denomina lluvia efectiva o lluvia útil.

El concepto de lluvia útil -o diferencia entre precipitación y evapotranspiración real- ha sido ampliamente utilizado en nuestro país en estudios hidrológicos e hidrogeológicos regionales.

El mapa de la figura 92 obtenido restando los dos anteriores (P-ET), muestra la variabilidad espacial de este valor, y ofrece una primera imagen de la mayor o menor abundancia hídrica de los distintos territorios españoles.

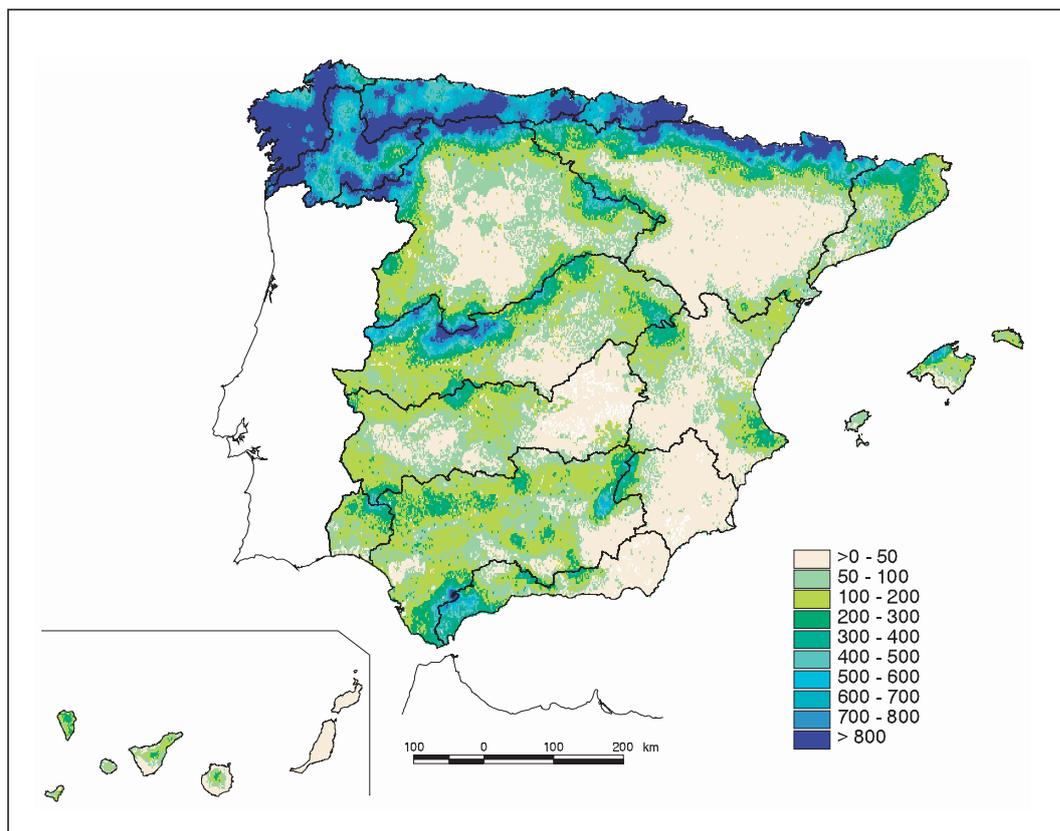
Pese a su evidente proximidad, los conceptos de lluvia útil y de escorrentía total no deben ser confundidos.

La diferencia entre ambos se debe a que mientras que el primero de ellos expresa la mera diferencia entre precipitación y evapotranspiración, la escorrentía representa la aportación total por unidad de superficie, y por tanto tiene en cuenta cómo se distribuye la lluvia útil entre almacenamiento en el suelo, escorrentía superficial y recarga al acuífero, y cómo éste descarga, de forma más o menos diferida, a la red de drenaje.

Aunque las diferencias entre los valores asociados a ambos conceptos pueden ser importantes cuando se consideran escalas temporales más detalladas -días, meses o incluso años-, en valores medios interanuales tales diferencias son mucho más pequeñas (ver figuras adjuntas), y se deben únicamente a la redistribución espacial que se produce en la descarga del agua infiltrada al acuífero.

3.1.4.1.4. Escorrentía total

Consecuencia del efecto de las variables climáticas junto con las características del terreno, la escorrentía total media anual en España sigue un patrón de comportamiento espacial similar al de las precipitaciones, aunque



con una mayor variabilidad, tal y como se aprecia en la figura adjunta. Esta escorrentía total (recurso por unidad de superficie o aportación específica total) es la suma de la escorrentía superficial directa y la escorrentía subterránea, y más adelante se explicará cómo se ha obtenido para cualquier punto del país.

El valor medio anual de la escorrentía total en España es de 220 mm, equivalentes, como se vio, a unos 111.000 hm³. En cuanto a la distribución espacial son evidentes las grandes diferencias territoriales que muestra, variando desde áreas donde la escorrentía es de menos de 50 mm/año (sureste de España, la Mancha, el valle del Ebro, la meseta del Duero, y las Islas Canarias) hasta otras donde supera los 800 mm/año (cuencas del Norte y áreas montañosas de algunas cuencas) (fig. 93).

Esa escorrentía se genera casi en su totalidad en nuestro territorio, a partir de la precipitación. Se exceptúan unos aportes irrelevantes respecto al total de la escorrentía que provienen de Andorra y Francia en la cabecera del río Segre (unos 300 hm³/año según estimación del Plan de cuenca del Ebro), así como las procedentes de unas muy pequeñas cuencas en la frontera portuguesa.

Obtenido el mapa de escorrentías totales para todo el país, la escorrentía total (los recursos naturales) de un territorio cualquiera se obtiene simplemente sumando las escorrentías totales de todos sus puntos, es decir, integrando en el recinto del territorio. Los resultados que

se obtienen de este modo para los ámbitos de planificación hidrológica son los que se ofrecen más adelante.

Asimismo, si en cada punto del territorio se determina la suma de las escorrentías de todos los puntos situados aguas arriba, se obtiene el mapa de aportaciones acumuladas en cada punto, que no es sino una representación fractal de la red fluvial, en la que el valor correspondiente a cada punto de la red es su aportación media interanual. La escorrentía total de un territorio cualquiera será ahora no la suma de sus puntos interiores, sino la de los puntos de su contorno, positiva si el punto aporta al territorio, y negativa si lo drena. Ello equivale en términos formales a integrar curvilíneamente en el contorno del recinto.

La figura 94 muestra este mapa de aportaciones acumuladas para todo el territorio peninsular, habiéndose representado los tramos fluviales con una aportación estimada mayor de 25 hm³/año.

En este mapa se aprecia, por ejemplo, el contraste entre las densidades de las redes fluviales de las cuencas del Norte de España y del Sureste. También en algunas cuencas hidrográficas se producen diferencias acusadas entre las aportaciones de las distintas vertientes, como sucede en el Ebro, donde las aportaciones de la margen izquierda, generadas en gran parte en los Pirineos, son muy superiores a las de la margen derecha. Con carácter general se observa cómo en la mayoría de las cuen-

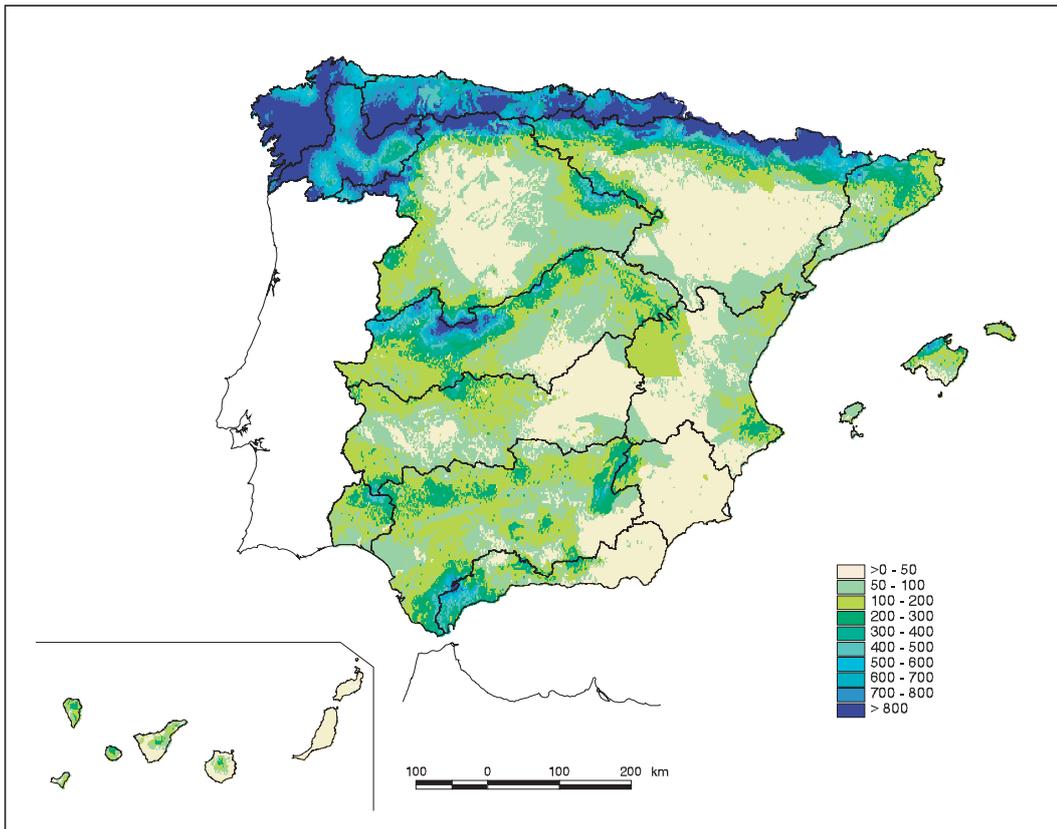


Figura 93. Mapa de escorrentía total media anual en mm (periodo 1940/41 - 1995/96)

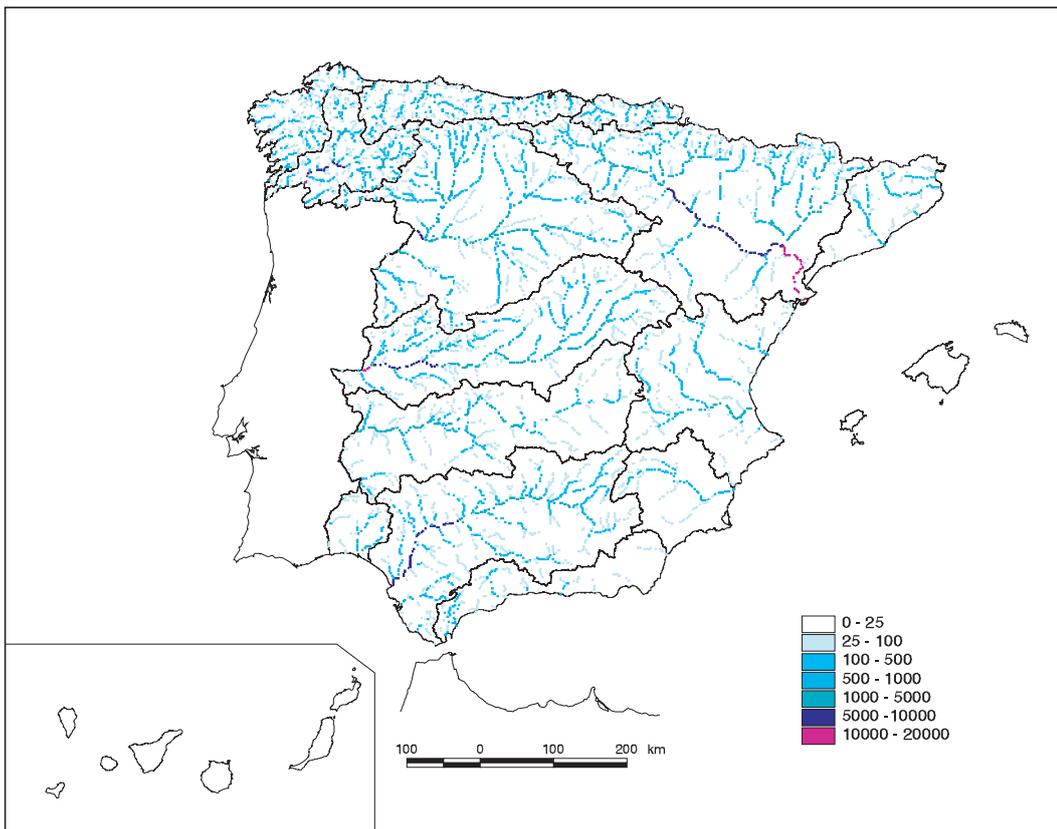


Figura 94. Mapa de aportación total media anual ($hm^3/año$) en el periodo 1940/41 - 1995/96.

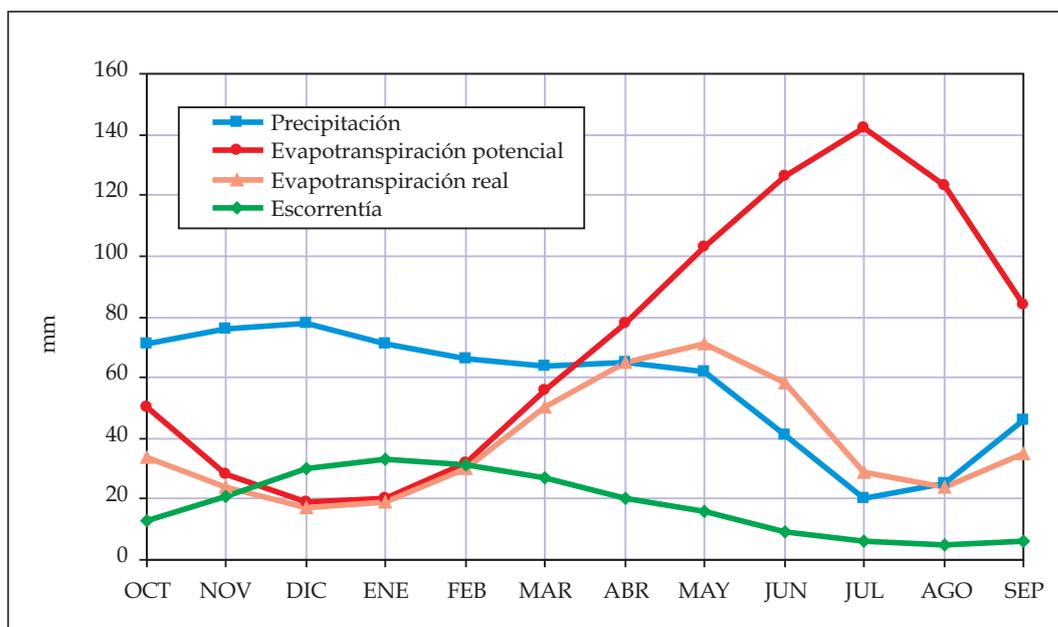


Figura 95. Distribución media intraanual de los principales flujos hidrológicos globales en España

cas una porción muy significativa de los recursos se genera en sus cabeceras. Una excepción es la cuenca del Guadiana, donde los recursos se generan en los afluentes que vierten a sus tramos medios.

La distribución estacional o intraanual de la escorrentía media en España se muestra, junto con la de la pre-

cipitación y las evapotranspiraciones potencial y real, en la figura adjunta.

Se observa claramente el desfase temporal existente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, lo que da lugar a los déficit de humedad del suelo. Igualmente se observa que la máxima produc-

Ámbito de Planificación	1967 (a)	1980 (b)	1993 (c)	1998 (d)	1998 (e)
Galicia Costa	-	-	12.504	12.642	12.250
Norte I	-	-	11.235	11.235	12.689
Norte II	-	-	12.954	13.000	13.881
Norte III	-	-	5.395	5.381	5.337
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 I	-	-	4.872	4.875	4.414
Guadiana II	-	-	1.293	1.293	1.061
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

Tabla 12. Distintas estimaciones de los recursos hídricos totales en régimen natural (hm³/año)

(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) MOPT (1993) Memoria del PHN.

(d) Datos de los Planes Hidrológicos de cuenca (1998)

(e) Datos de la evaluación realizada en este Libro Blanco, que se expondrá más adelante (1998)

Notas: Norte comprende los ámbitos de Galicia Costa y Norte I, II, y III; Guadiana comprende los ámbitos Guadiana I y II. La cifra del Plan de cuenca (columna d) del Ebro no incluye los recursos del Garona y Gallocanta.

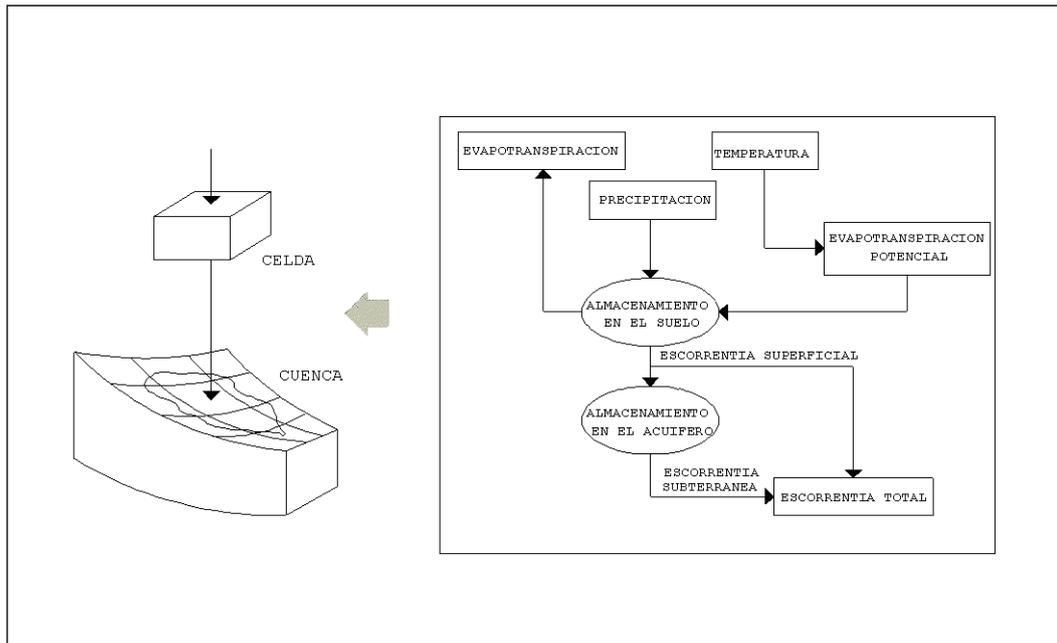


Figura 96.
Representación
esquemática del
modelo distribuido
empleado

ción global de escorrentía se produce de diciembre a febrero, y la mínima en agosto; o que la máxima evapotranspiración potencial se da en julio.

Es también interesante destacar el efecto que tiene el almacenamiento de agua en el suelo y en los acuíferos, que en los meses secos de mayo a julio posibilita que la evapotranspiración real sea mayor que la precipitación, o que circule caudal por los ríos (fig. 95).

Como antes se ha apuntado, la evaluación de las aportaciones naturales de los ríos no es una tarea fácil, y una muestra de ello es cómo a lo largo del tiempo estas estimaciones han ido variando según el autor que las ofrecía y las fechas de elaboración, tal y como se muestra en la tabla adjunta de estimaciones de recursos hídricos totales en régimen natural (expresados en $\text{hm}^3/\text{año}$). Las diferencias son esperables considerando, en primer lugar, las diferentes fechas y periodos (distintas series) en que se realizan las evaluaciones; en segundo lugar, que aún empleando las mismas series, pueden emplearse distintos procedimientos técnicos que darán lugar a diferentes resultados; y, en tercer lugar, que no siempre - y en especial en las estimaciones más antiguas - se ha entendido como cuenca la totalidad del ámbito administrativo definido como tal, habiéndose considerado los recursos solamente del río o ríos principales, y no de todos los cauces.

En todo caso, ha de tenerse presente que, como se dijo, los recursos naturales no pueden medirse de forma directa, y han de ser estimados, lo que conlleva siempre un cierto grado de incertidumbre (tabla 12).

Las cifras más recientes son las procedentes de los Planes Hidrológicos de cuenca (que aunque aprobados en 1998

se basan, con carácter general, en datos del periodo comprendido entre los años hidrológicos 1940/41 y 1985/86), y las correspondientes a la nueva evaluación de los recursos naturales, realizada en este Libro, para el periodo comprendido entre 1940/41 y 1995/96.

Como puede verse, las diferencias entre estas dos últimas estimaciones no exceden en ningún caso del 20% y suelen ser a la baja, lo que resulta lógico considerando los diferentes periodos empleados y el efecto de la última sequía. Asimismo, se observa que las evaluaciones más antiguas se encuentran por lo general ajustadas, y la estimación global de los recursos peninsulares -en torno a los $110 \text{ km}^3/\text{año}$ - encajada desde hace casi 20 años. En los siguientes epígrafes se detallará la más reciente evaluación, realizada en este Libro.

3.1.4.1.5. El procedimiento de evaluación de los recursos hídricos

Expuestas ya las nociones básicas del ciclo hidrológico y los balances hídricos, y caracterizadas sus variables meteorológicas básicas, procede explicar con algún detalle el procedimiento de evaluación de los recursos hídricos en régimen natural que se ha seguido en este Libro y que ha consistido la modelación distribuida, masiva, de los componentes básicos del ciclo hidrológico a la escala global de todo el país.

En efecto, con motivo de la elaboración de este Libro y la preparación de datos para la elaboración del Plan Hidrológico Nacional, y con objeto de actualizar todas las series hasta el año hidrológico 1995/96 utilizando una metodología homogénea para todas las cuencas peninsulares, se ha puesto a punto un mode-

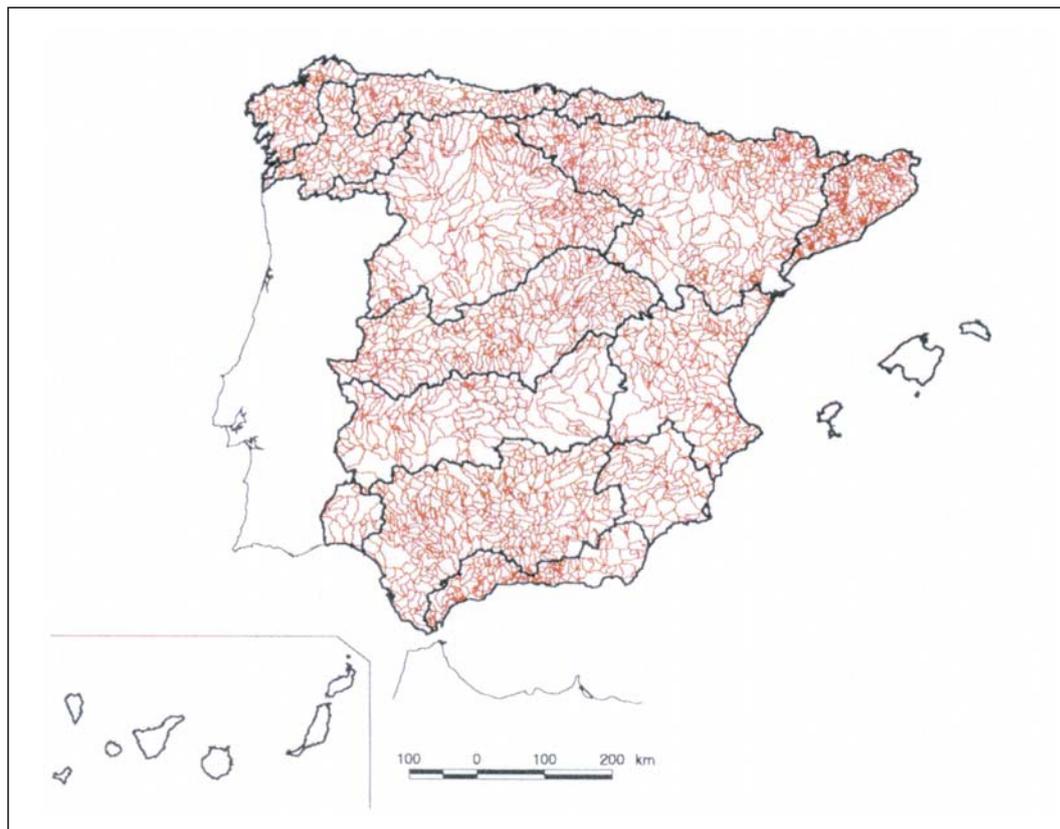


Figura 97. Mapa de subcuencas en la España peninsular

lo de simulación de las aportaciones naturales para su evaluación en cualquier punto del país (Estrela y Quintas, 1996b; Ruiz, 1999).

Este modelo utiliza los datos registrados en las estaciones de aforo, la información meteorológica, y las características de las cuencas y acuíferos. Es un modelo hidrológico conceptual y distribuido -considera la variabilidad espacial de toda la información hidrológica- que simula los flujos medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de España. Para ello reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico. En cada una de las aproximadamente medio millón de celdas de dimensiones 1.000 m. x 1.000 m. en que se ha discretizado el territorio español, plantea el principio de continuidad y establece, a escala mensual, leyes de reparto y transferencias de agua entre los distintos almacenamientos (ver figura 96).

Las entradas al modelo son los datos de precipitaciones y temperaturas mensuales en las estaciones meteorológicas y los datos de caudales históricos observados en los puntos de simulación o de calibración. Los mapas de precipitaciones se han obtenido por interpolación de los datos registrados en los pluviómetros, teniendo en cuenta la orografía. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial utiliza una combinación de los métodos de Thornthwaite y Penman-Monteith, e introduce

un coeficiente reductor por la vegetación. Otra información que precisa el modelo son datos sobre la geometría de las subcuencas consideradas que, teniendo en cuenta los primitivos trabajos de clasificación de los ríos realizados en los años 60 (MOP-CEH [1965]; MOP-CEH [1966]), han sido digitalizadas a partir de los planos del Servicio Geográfico del Ejército a escala 1:50.000, y se muestran en la figura 97.

Los parámetros del modelo son los mapas de capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, de capacidad máxima de infiltración y los coeficientes de recesión de los acuíferos.

En la figura 98 se muestra el mapa del parámetro de capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, estimado a partir de información sobre usos del suelo conforme al criterio de la tabla 13.

La figura 99 muestra el mapa del parámetro de capacidad de infiltración máxima.

Este parámetro se ha regionalizado en función de la litología, tal y como se muestra en la tabla siguiente. Inicialmente, a las clases litológicas del mapa digital de suelos de EUROSTAT se les asoció un valor de capacidad de infiltración máxima a partir de los estimaciones de infiltración por grupos litológicos recogidas en Sanz Pérez (1995). Estos valores de referencia fueron ajustados con posterioridad durante el proceso de calibración del modelo (tabla 14).

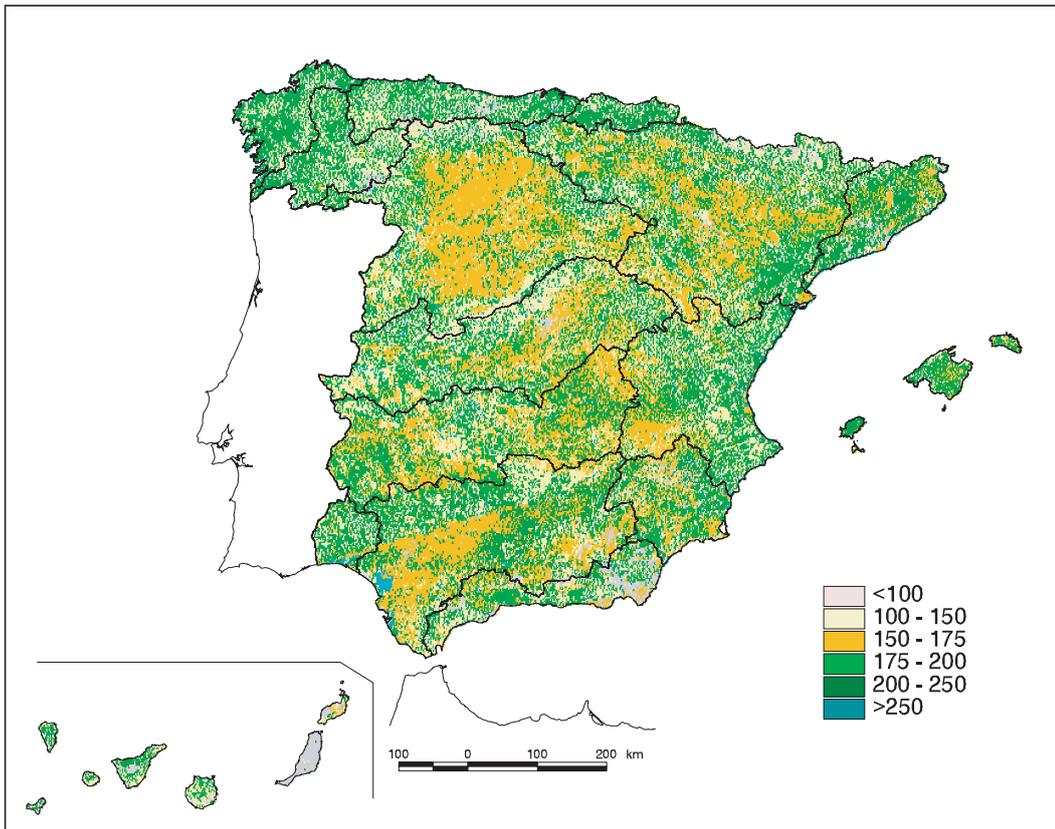


Figura 98. Mapa de capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

Finalmente, en la figura 100 se muestra el mapa de coeficientes de recesión de los acuíferos. El modelo estima la recarga a los acuíferos de forma distribuida, y obtiene un valor areal sobre la unidad hidrogeológica para cada mes. El intercambio de agua entre cada unidad hidrogeológica y la red fluvial se realiza mediante un modelo unicelular (López-Camacho, 1981), aplicado de forma agregada a toda la unidad, y cuyo parámetro es el coeficiente de recesión o descarga.

Este mapa se ha estimado introduciendo en cada unidad hidrogeológica unos valores iniciales en función de la extensión de los acuíferos y de sus características litológicas, y ajustándolos posteriormente en el proceso de calibración del modelo a partir de los hidrogramas de agotamiento registrados en las estaciones de aforo.

La calibración del modelo ha consistido en obtener los mapas de los parámetros que conducen a un buen ajuste entre los valores observados y los simulados por el modelo, entendiendo por tal la reproducción, en la medida de lo posible, de las aportaciones medias mensuales, anuales e interanuales, y de otras propiedades de las series, como la varianza o la persistencia de los caudales.

La mayoría de los datos de calibración corresponden a estaciones de aforo donde se miden caudales en régimen natural. También se han utilizado, como elemento de contraste, series restituidas a régimen natural procedentes de los Planes Hidrológicos de cuenca, fundamentalmente en zonas con una escasa cobertura espacial de las estaciones anteriores, y en las desembocaduras de los principales ríos lo que asegura el encaje global de las cuencas.

Uso del suelo	Capacidad máxima de humedad del suelo (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

Tabla 13. Regionalización de la capacidad máxima de humedad del suelo a partir de los usos del suelo

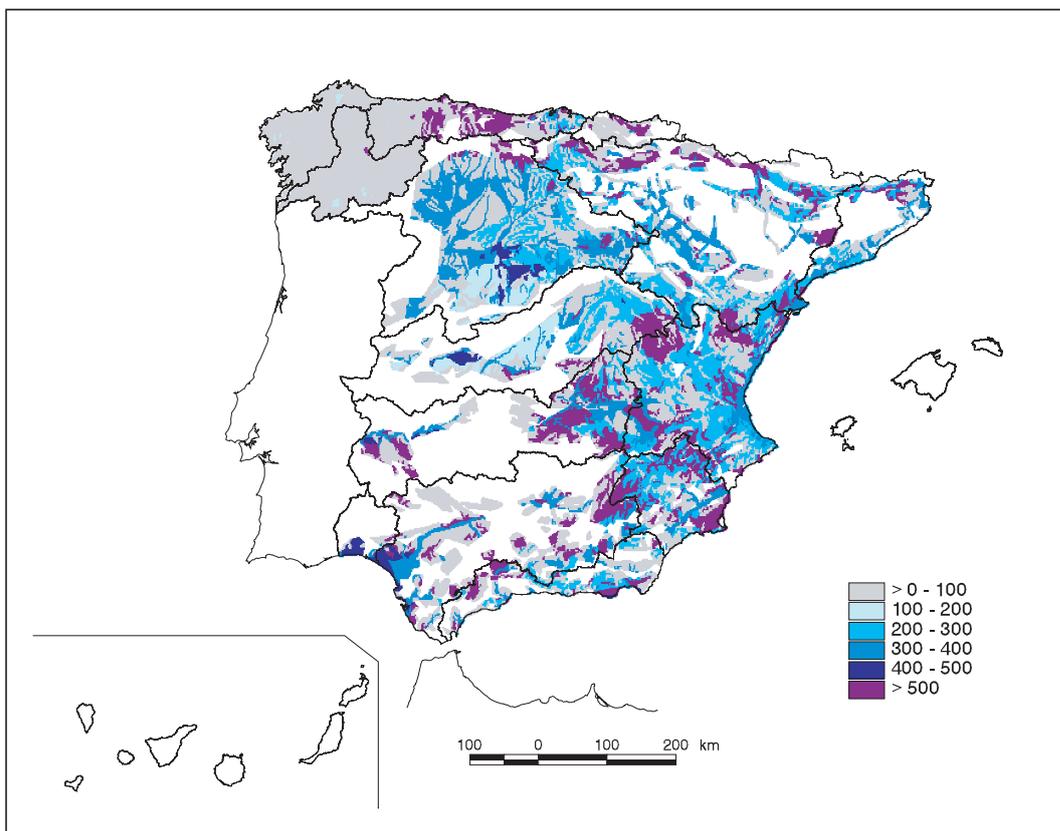


Figura 99. Mapa de capacidad máxima de infiltración (mm/mes)

En la figura 101 se muestran los puntos de control seleccionados para la calibración, así como la situación de los embalses y de las zonas de riego, información utilizada para realizar esa selección.

Como ya se ha mencionado, para lograr el ajuste del modelo no se han calibrado de forma matemática los parámetros de las cuencas aforadas sino que se han regionalizado sus valores para todo el territorio a partir de las características físicas de las cuencas (usos de suelo y litología). Aunque de esta manera es más difícil conseguir errores próximos a cero, se tiene la ventaja de que los parámetros estimados en las cuencas no

aforadas, que cubren un gran porcentaje del territorio, son consistentes con sus características y pueden estimarse con mayor fiabilidad. En el caso de las Islas Canarias la regionalización de parámetros efectuada no ha podido ser contrastada dada la ausencia de registros de caudales. De la misma manera tampoco se ha podido determinar con precisión el parámetro que regula el reparto entre aportación superficial y subterránea, por tratarse de un terreno volcánico con escasa representación en otras zonas del territorio español.

Los resultados de la simulación son los mapas de los distintos almacenamientos, humedad en el suelo y

Litología	Infiltración máxima (mm)
Material aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1.000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

Tabla 14. Regionalización de la capacidad máxima de infiltración a partir de la litología

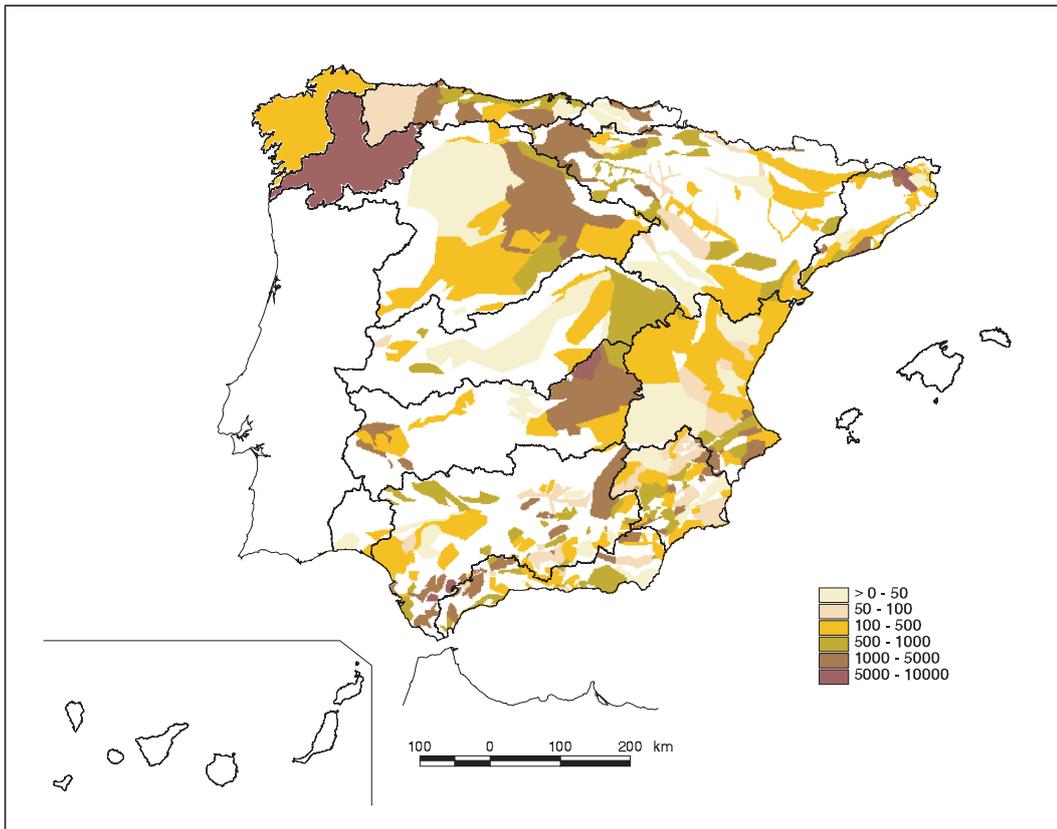


Figura 100. Mapa de coeficientes de recesión ($\text{días}^{-1} \times 100.000$)

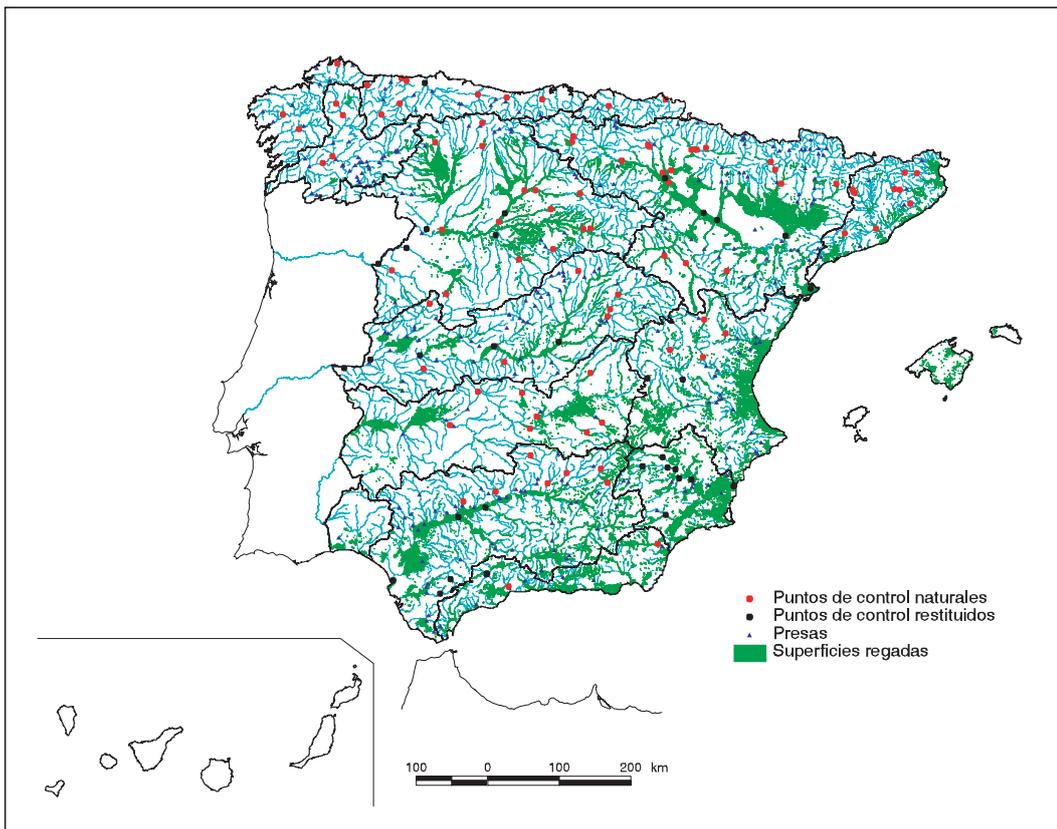


Figura 101. Mapa con la selección de puntos de control para la calibración del modelo

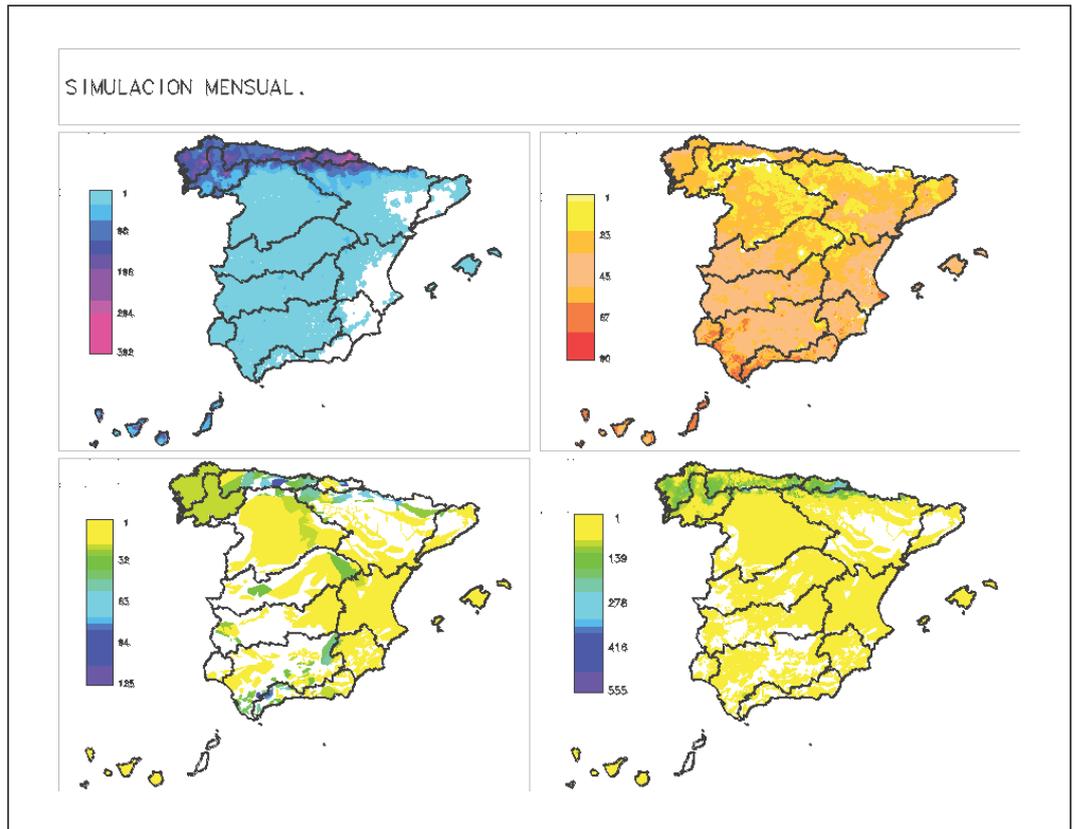


Figura 102. Ejemplo de mapas generados en la simulación de escorrentías en un intervalo de tiempo (febrero de 1970)

volumen de acuífero (drenable por gravedad conforme al modelo unicelular), y de las variables de salida del ciclo hidrológico, evapotranspiración real y escorrentía total, obtenida esta última como suma de escorrentía superficial y subterránea. La figura 102 muestra un ejemplo de simulación de escorrentías en milímetros en un mes determinado, para el que se generan los mapas de precipitación (sup. izq), evapotranspiración (sup.der.), escorrentía subterránea (inf. izq.), y escorrentía total (inf. der.). Los caudales mensuales, en

cada intervalo de tiempo, se obtienen integrando la escorrentía total en las cuencas vertientes a los puntos de simulación. Los caudales simulados se contrastan con los datos históricos, si estos existen.

Para ofrecer una idea del buen grado de ajuste conseguido, en la figura 103 se muestran los valores medios anuales de las aportaciones específicas, simuladas y observadas, en todos los puntos de control seleccionados.

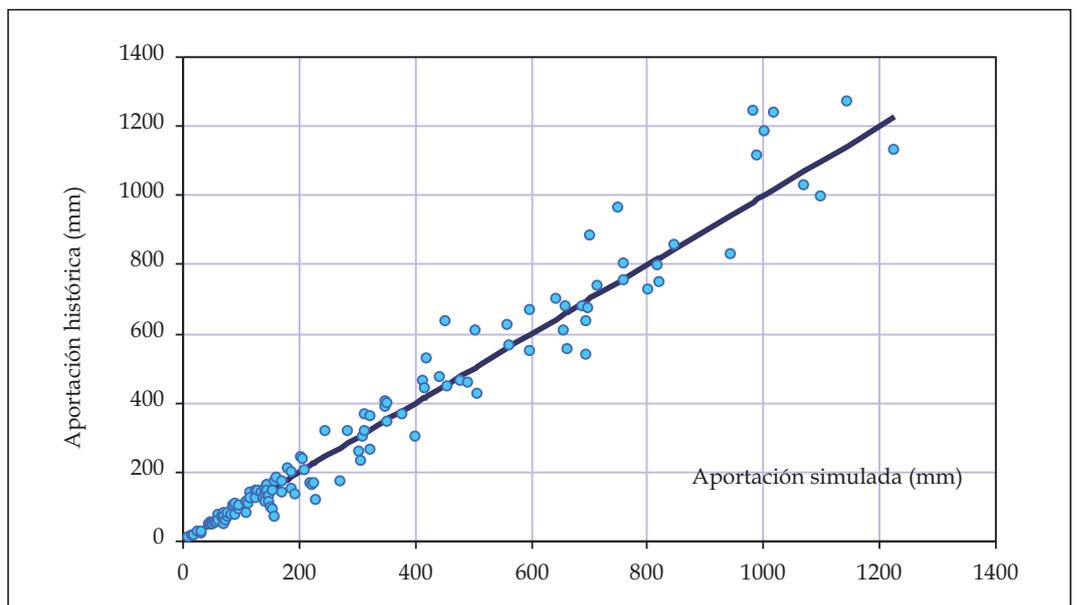


Figura 103. Contraste del modelo en valores medios anuales

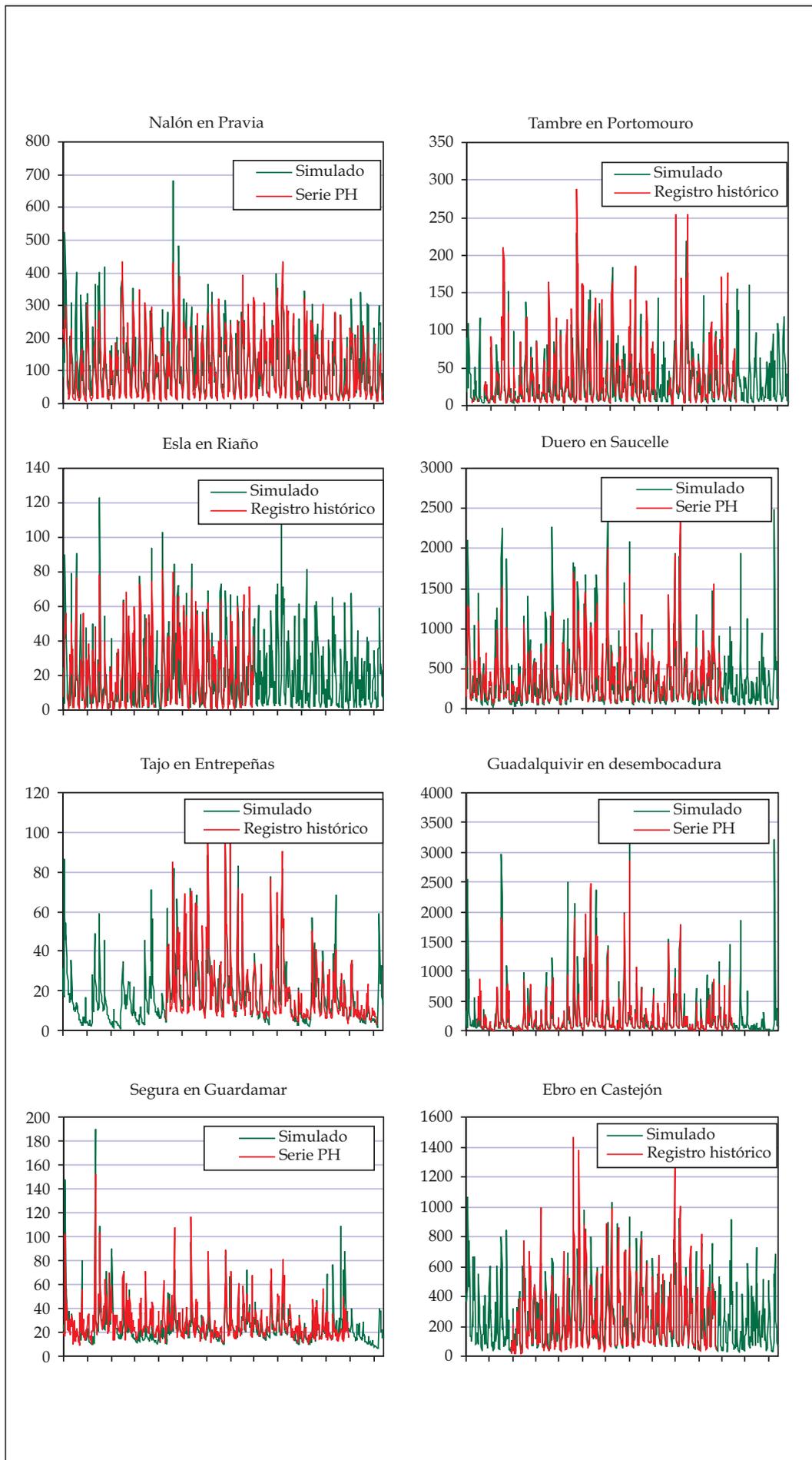


Figura 104.
Aportaciones mensuales simuladas y observadas (m³/s) en varios puntos de control en el periodo 1940/41-1995/96

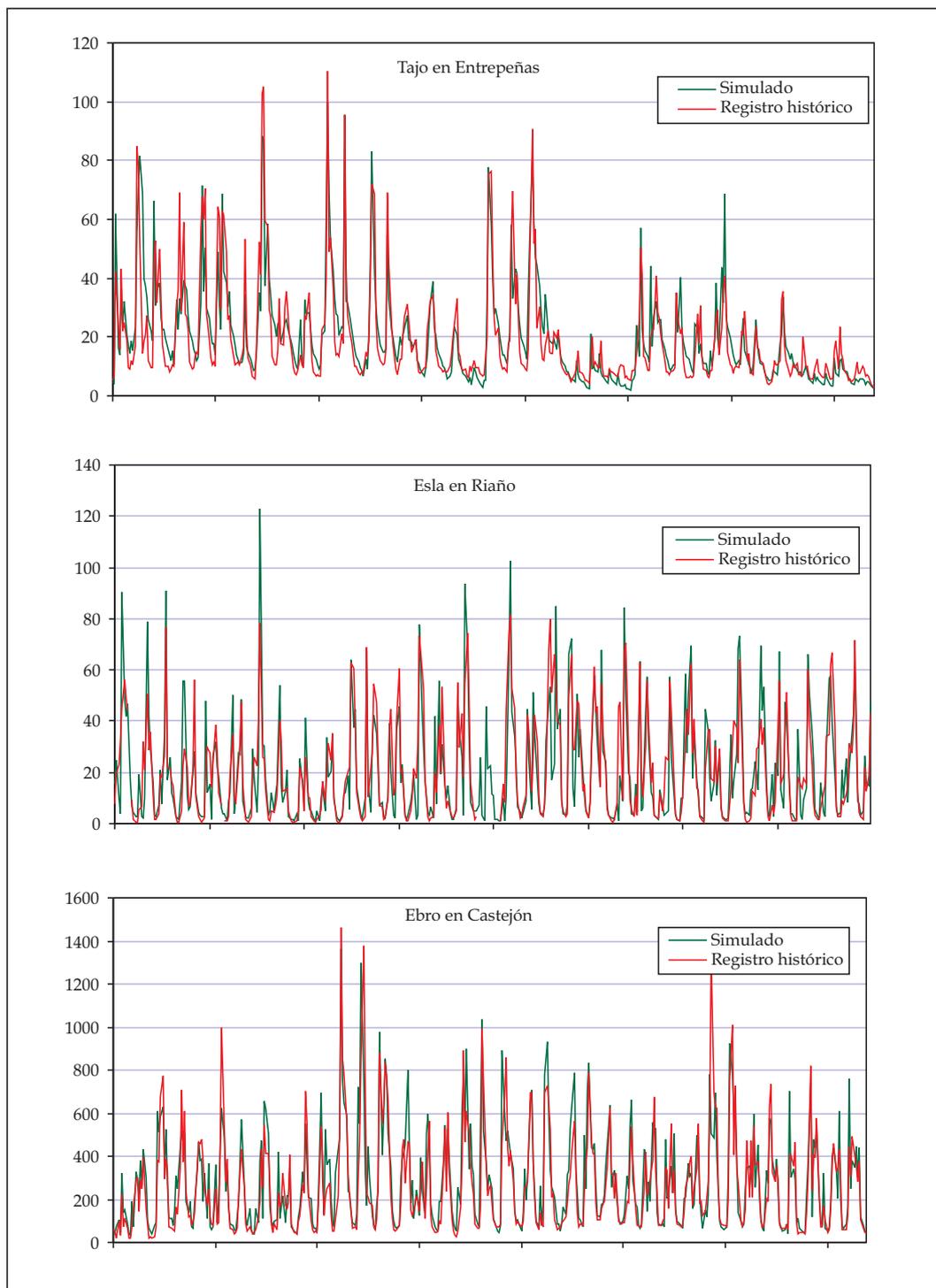


Figura 105. Detalle de aportaciones mensuales simuladas y observadas (m^3/s) en el periodo 1940/41-1995/96

También se representan en las figuras 104 y 105 las series completas de aportaciones mensuales (en m^3/s), simuladas y observadas, en distintos puntos de control. Se puede afirmar que la calibración es muy aceptable, y que es lo suficientemente fiable como para permitir la aplicación generalizada del modelo en todo el territorio.

Asimismo, se observa que aparentes tendencias a la disminución de los recursos naturales (como el Tajo en Entrepeñas) pueden explicarse simplemente por la variabilidad de las precipitaciones, pudiendo conside-

rarse estacionarios los parámetros controladores de la respuesta hidrológica, al menos en el periodo analizado, desde el año 40. Aceptar esta hipótesis supone admitir la invarianza de los usos de suelo. Aunque, como es obvio, se han producido ocasionalmente cambios de usos en las últimas décadas, su incidencia global sobre las aportaciones de los ríos es muy escasa, como demuestra el hecho de que los residuos no presenten derivas a lo largo del periodo de simulación. Los cambios de suelo son ciertamente significativos a la escala de la ladera, parcela o pequeña cuenca, pero

Ámbito	Superf. (km ²)	Precip. (mm)	Precip. (mm)	ETP (mm)	ET (mm)	Esc. tot. (mm)	Esc/Md (%)	C. Esc. (%)	Ap. tot. (hm ³ /año)	Ap. tot. (hm ³ /año) (1)
Norte I	17.600	1.284	1.316	709	563	721	328	56	13.147	12.689
Norte II	17.330	1.405	1.440	653	604	801	364	57	14.405	13.881
Norte III	5.720	1.606	1.650	695	673	933	424	58	5.614	5.337
Duero	78.960	625	631	759	452	173	79	28	14.175	13.660
Tajo	55.810	655	666	898	460	195	89	30	11.371	10.883
Guadiana I	53.180	521	531	977	438	83	38	16	4.624	4.414
Guadiana II	7.030	662	661	1.075	511	151	69	23	1.053	1.061
Guadalquivir	63.240	591	602	991	455	136	62	23	9.090	8.601
Sur	17.950	530	531	969	399	131	60	25	2.359	2.351
Segura	19.120	383	379	963	341	42	19	11	811	803
Júcar	42.900	504	500	881	424	80	36	16	3.335	3.432
Ebro (2)	85.560	682	692	792	472	210	95	31	18.647	17.967
C. I.Cataluña	16.490	734	727	792	565	169	77	23	2.728	2.787
Galicia Costa	13.130	1.577	1.590	737	644	933	424	59	12.245	12.250
Península	494.020	691	700	859	468	223	101	32	113.604	110.116
Baleares	5.010	595	603	896	463	132	60	22	696	661
Canarias	7.440	302	297	1.057	247	55	25	18	394	409
España	506.470	684	693	862	464	220	100	32	114.694	111.186

Tabla 15. Valores medios anuales simulados de la precipitación, evapotranspiración y escorrentía por ámbitos de planificación, correspondientes al periodo 1940/41-1995/96

(1) Estas cifras, a diferencia de las otras, corresponden al periodo 1940/41-1985/86

(2) Estas cifras no incluyen la escorrentía procedente de territorio francés, estimada en unos 300 hm³/año

resultan irrelevantes a la escala de las cuencas fluviales consideradas en este Libro, y su efecto queda ampliamente absorbido por las incertidumbres y ruidos propios de los modelos hidrológicos, aún de los más complejos y parametrizados.

La figura 105 muestra tres de estos ajustes con mayor detalle, al objeto de apreciar mejor los resultados conseguidos.

3.1.4.1.6. Resultados obtenidos

Concluida la validez global del modelo utilizado, se ha procedido a su aplicación masiva para el periodo 1940/41-1995/96, obteniéndose los resultados que se resumen en la tabla 15. Pueden verse los valores medios anuales de la precipitación (ya ofrecida anteriormente), la evapotranspiración potencial y real, la escorrentía total (que resulta igual a la lluvia útil), el porcentaje de esta escorrentía con relación a la media de toda España, el coeficiente de escorrentía, y la aportación total en cada uno de los ámbitos, y en el total del país. Asimismo se indican, a efectos comparativos, los valores de la precipitación y la aportación total obtenidos por el modelo para el periodo 1940/41-1985/86, que es el usualmente empleado en los Planes Hidrológicos de cuenca.

Las cifras de aportación total incluyen la correspondiente a la red fluvial (escorrentía superficial directa y recar-

ga a los acuíferos) y la escorrentía subterránea al mar. Esta última es proporcionalmente poco importante, del orden de 2.000 hm³/año incluyendo la de las islas, tal y como se verá en un epígrafe posterior.

Examinando esta tabla es interesante constatar que la consideración de los últimos 10 años -es decir, el empleo de las series 1940/41-1995/96 en lugar de las estándar 1940/41-1985/86- supone, por término medio, casi un 4% de disminución de los recursos naturales totales.

Esta disminución se produce, con distintos porcentajes, en casi todos los ámbitos excepto los de Galicia Costa y Guadiana II, donde es prácticamente igual, y en los del Júcar y Cuencas Internas de Cataluña, donde se produce un ligero aumento. Estas excepciones se explican analizando con detalle la distribución espacial de la sequía de principios de los noventa, que aunque tuvo un carácter bastante generalizado, no afectó por igual a todo el territorio nacional, como más adelante se muestra con claridad en los epígrafes de sequías.

En concreto, la aportación media en esos ámbitos en el periodo comprendido entre 1985/86 y 1995/96 fue algo mayor que la media de todo el periodo de análisis, aunque esas aportaciones elevadas se produjeron básicamente en las zonas litorales, donde no podían ser reguladas para paliar la sequía en esos territorios y los de aguas arriba. Es, por ejemplo, el caso del Júcar, con altas precipitaciones en las Marinas y muy bajas en las cabeceras y cursos medios de los ríos Júcar, Turia y Mijares.

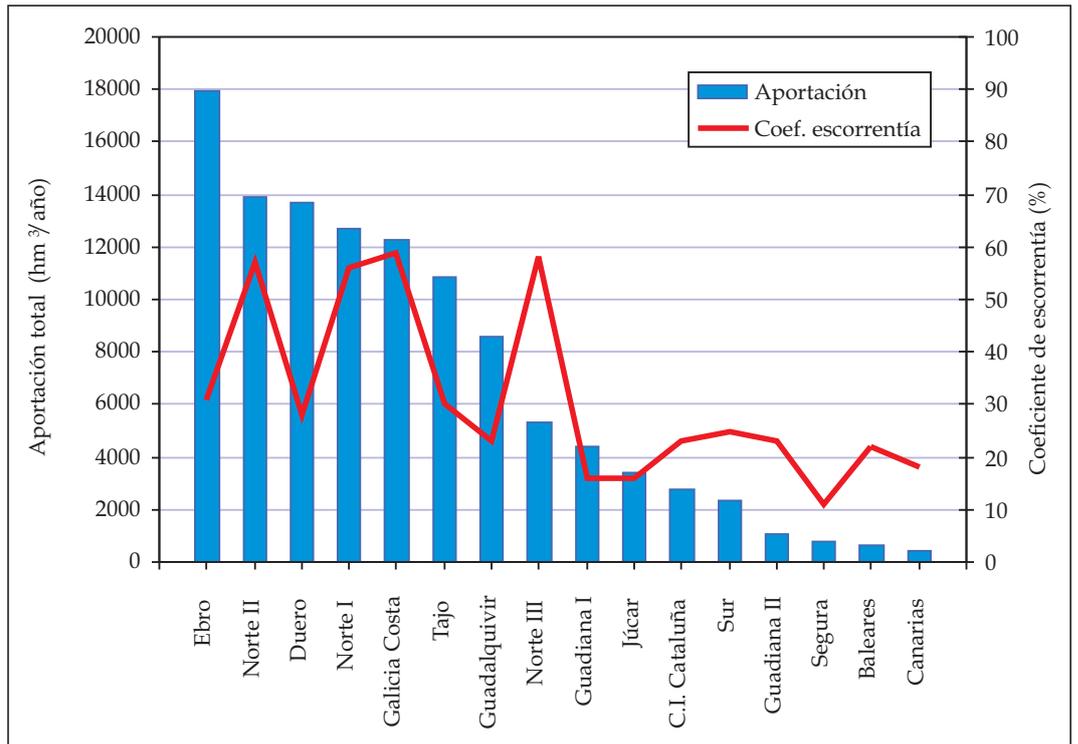


Figura 106. Aportaciones totales medias anuales (hm³/año) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos

Estos efectos pueden verse en los gráficos del análisis de rachas pluviométricas regionales, en los que se observa que el resultado global de la región pluviométrica de Levante fue muy húmedo en el periodo 1986-90 y, en menor medida, seco en el 1991-95.

En todo caso, y a escala global, debe constatararse la ya indicada reducción total de los recursos naturales, en torno al 4%, con respecto a los recursos correspon-

dientes a los periodos usualmente considerados por los Planes Hidrológicos.

Asimismo, como puede comprobarse, e ilustra la figura 106, la aportación total natural media anual varía enormemente de unas cuencas a otras, con valores entre los casi 18.000 hm³/año del Ebro (la mayor de España), los más de 10.000 de las cuencas del Norte I

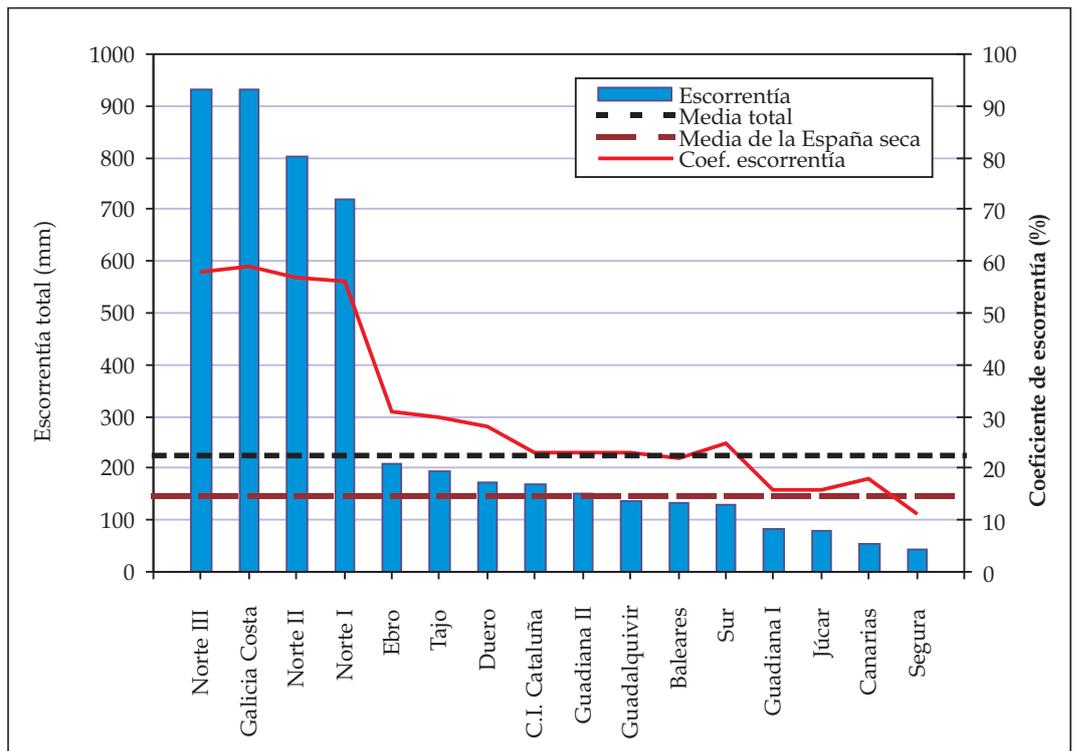


Figura 107. Escorrentías medias anuales (mm) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos

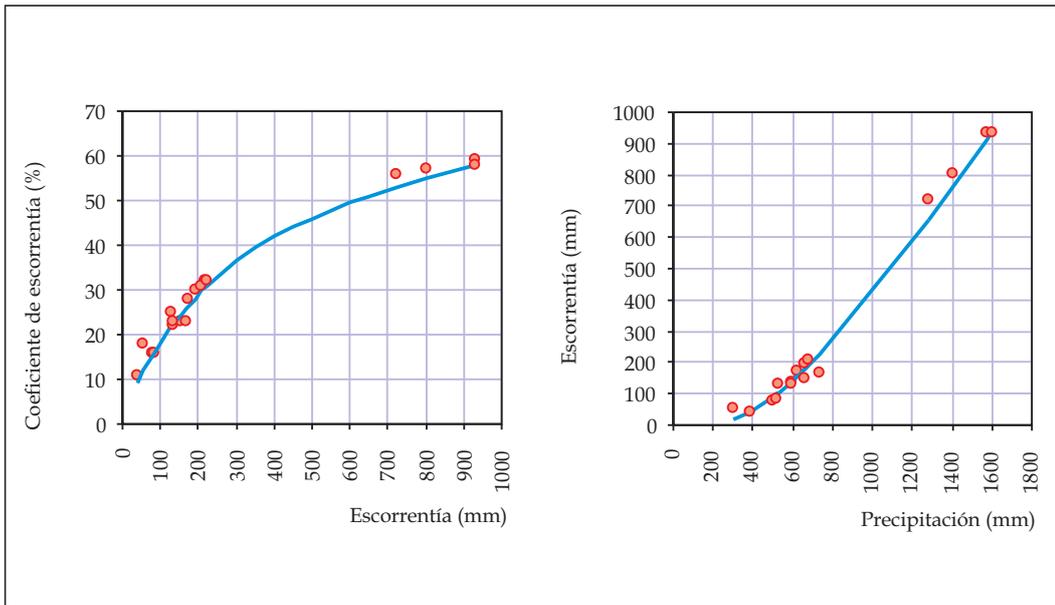


Figura 108. Relaciones entre precipitación, escorrentía total y coeficientes de escorrentía en los diferentes ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos

y II, Duero, Tajo y Galicia Costa, y los mínimos entre 400 y 800 de las islas y el Segura.

En la misma figura se ha representado el coeficiente global interanual de escorrentía (la relación entre aportación y precipitación) en cada ámbito. Como puede verse, los coeficientes de escorrentía globales varían entre cifras próximas al 60% en las cuencas del Norte, y el 11% del Segura, lo que, desde el punto de vista de los recursos, exagera aún más sus diferencias pluviométricas.

Las cifras de aportaciones totales son muy distintas, además de por razones hidrológicas, por las dimensiones relativas de las cuencas. La consideración de las escorrentías -aportación total dividida por el área de la cuenca- permite suprimir este efecto de escala, y da, por tanto, una mejor idea de la irregularidad de las aporta-

ciones en los distintos ámbitos. La figura 107 muestra estas escorrentías (también llamadas aportaciones específicas) junto con los coeficientes de escorrentía, y proporciona una imagen verdaderamente expresiva de la diversidad hídrica de España.

Puede verse que los territorios con mayor abundancia de agua por unidad de superficie son, a gran distancia del resto, los del Norte y Galicia (es decir, estrictamente la España húmeda) con valores superiores a los 700 mm/año, mientras que en el resto (la España seca) no superan los 250 mm/año. La menor aportación específica de España se produce en la cuenca del Segura, que no alcanza ni los 50 mm/año, es decir, unas 20 veces inferior a la de Galicia, 5 veces inferior a la media nacional, y 3 veces inferior a la media de la España seca.

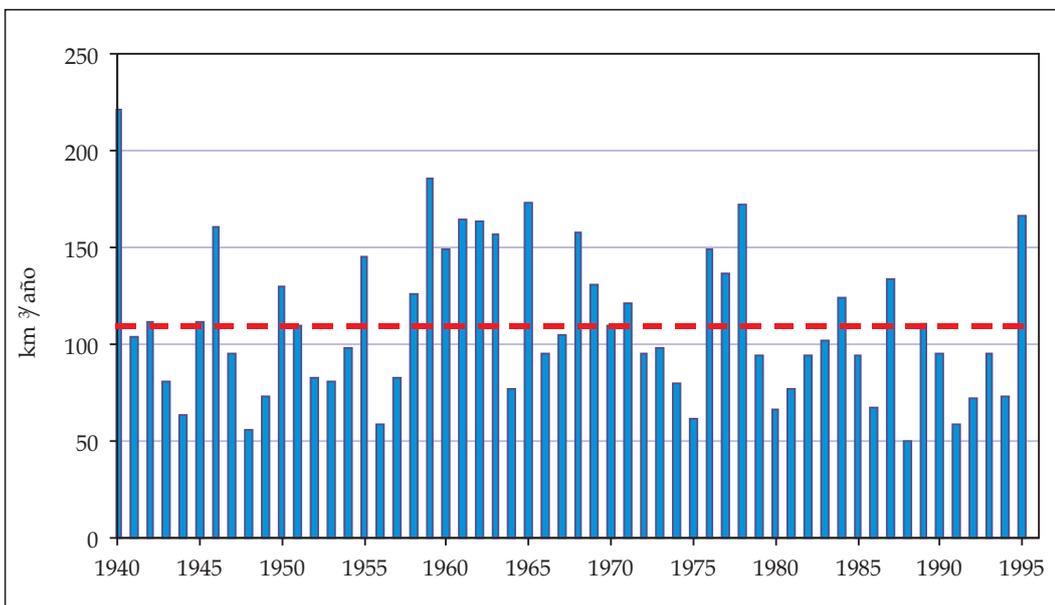


Figura 109. Serie de aportaciones totales anuales en régimen natural en la España peninsular (periodo 1940/41-1995/96)

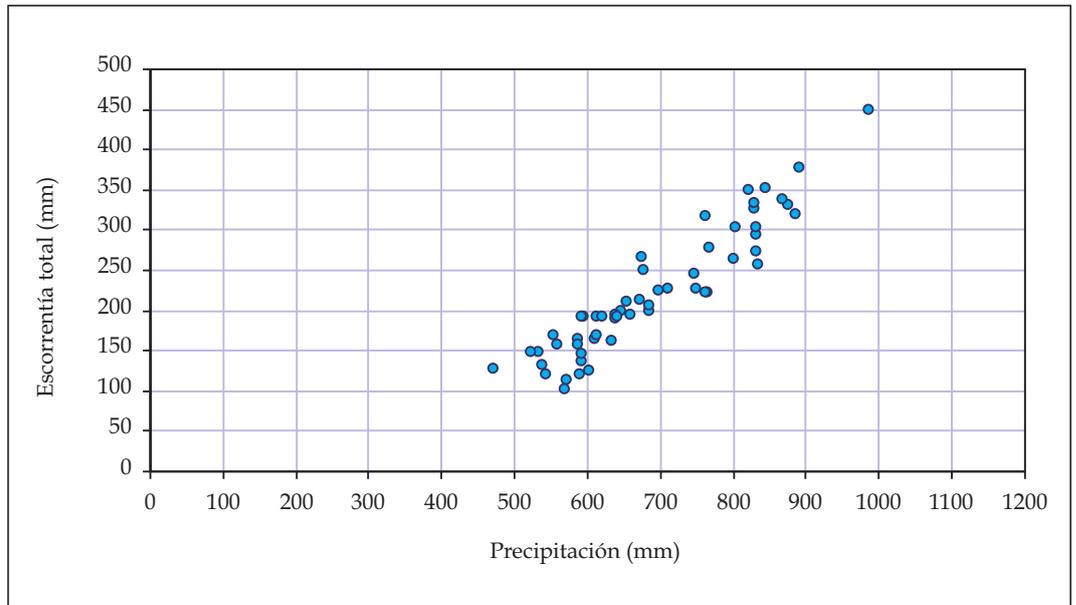


Figura 110. Relación precipitación-escorrentía total a escala anual en la España peninsular (años 1940/41 a 1995/96)

Asimismo se observa que, como era de prever, existe una clara relación -aunque no lineal- entre la escorrentía (o aportación específica) y el coeficiente de escorrentía, consecuencia evidente de la relación aproximadamente lineal a partir de cierto umbral, entre escorrentía y precipitación medias a largo plazo en los distintos ámbitos, tal y como se muestra en la figura 108. A estos datos se les ha ajustado la ley regional de Budyko, que tiene por expresión $E = P - ETP$, donde P es la precipitación, ETP es la evapotranspiración potencial y E es la escorrentía. En la expresión anterior se ha adoptado un valor constante de la ETP igual a la media de España.

Como sucede con la acusada variabilidad espacial de la escorrentía, la irregularidad temporal es también muy significativa. Paralelamente a como se hizo con la pre-

cipitación, en la figura 109 se muestran los valores anuales de la aportación total media en régimen natural para la España peninsular en el período de 56 años comprendido entre 1940/41 a 1995/96, junto con la media para ese periodo (unos 111 km³/año).

Como es lógico, esta aportación de cada año ha de tener una estrecha relación con la precipitación de ese mismo año, tal y como efectivamente se constata con claridad en la figura 110.

No obstante, las irregularidades temporales de las precipitaciones parecen estar amplificadas ahora, como efectivamente se comprueba al contrastar los coeficientes de variación de ambas series, que veremos más adelante.

Más aún, la relación entre ambas variables a escala global y con dato anual no parece presentar estructuras de

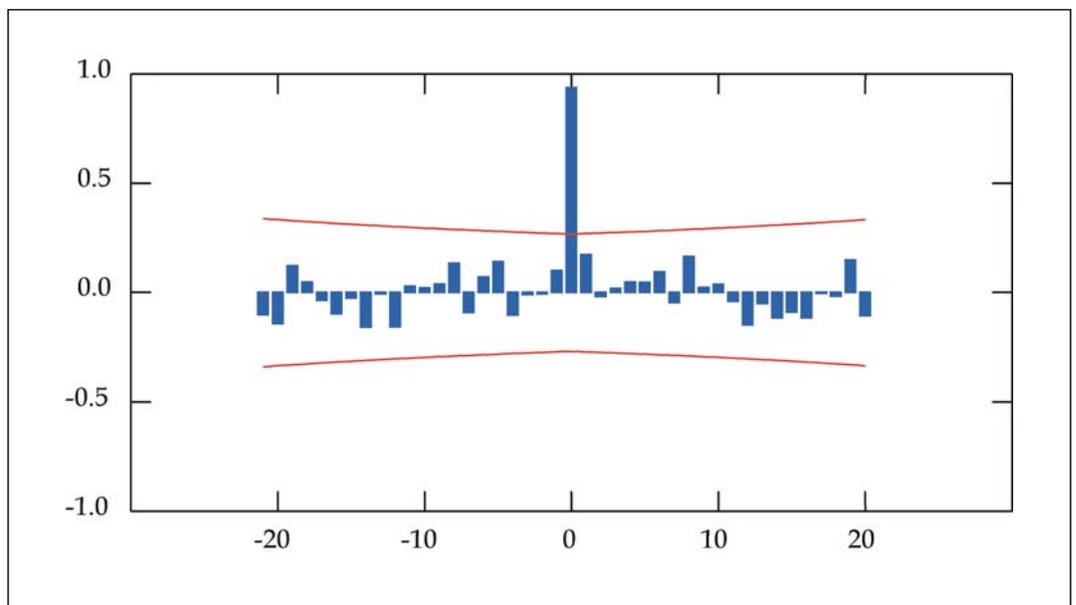


Figura 111. Correlación cruzada entre las precipitaciones y las aportaciones anuales en España en el periodo 1940/41-1995/96

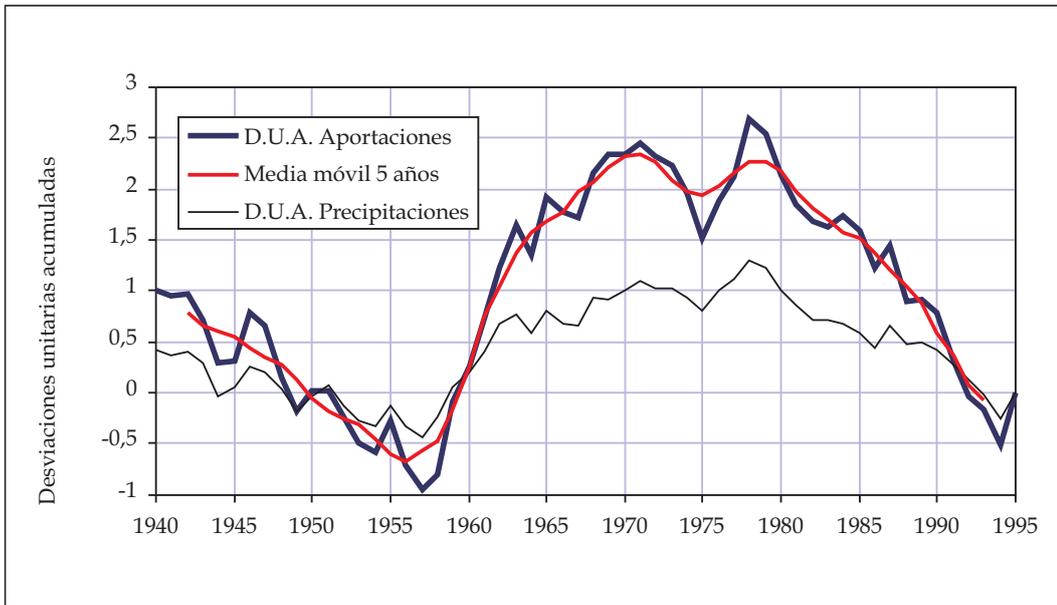


Figura 112. Rachas de la aportación total anual en España en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

dependencia temporal más allá del año, tal y como puede verse en la figura 111, en la que se representa la función de correlación cruzada entre ambas variables junto con su nivel de confianza del 95%.

Como puede verse, existe una altísima correlación en el mismo año (que es la correspondiente al gráfico anterior), pero la influencia de la precipitación de un año sobre la aportación del siguiente no llega a ser significativa, aunque no está lejos de serlo, y, como era de esperar, no existe ninguna otra correlación significativa de ciclo más largo.

Análogamente, es previsible que las rachas secas y húmedas de aportaciones a escala peninsular presenten patrones similares a los de las precipitaciones que las generan. Para comprobar esta hipótesis se ha construido el gráfico de la figura 112, similar al ya ofreci-

do para las precipitaciones, mostrando la serie de desviaciones unitarias acumuladas, junto con su media móvil centrada de 5 años, y las desviaciones anteriormente obtenidas para las precipitaciones.

Puede verse que, a escala peninsular, las rachas de aportaciones secas y húmedas son, como era de esperar, las mismas que las de las precipitaciones medias, sin perjuicio, como antes, de las posibles diferencias territoriales.

Asimismo, y como en el caso de las precipitaciones, un aspecto de interés es el de la estructura de autocorrelación de las aportaciones anuales (es decir, las relaciones de dependencia de la aportación de un año con respecto a las de los años pasados). Para su contraste, la figura 113 muestra las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la serie, junto con sus intervalos de confianza.

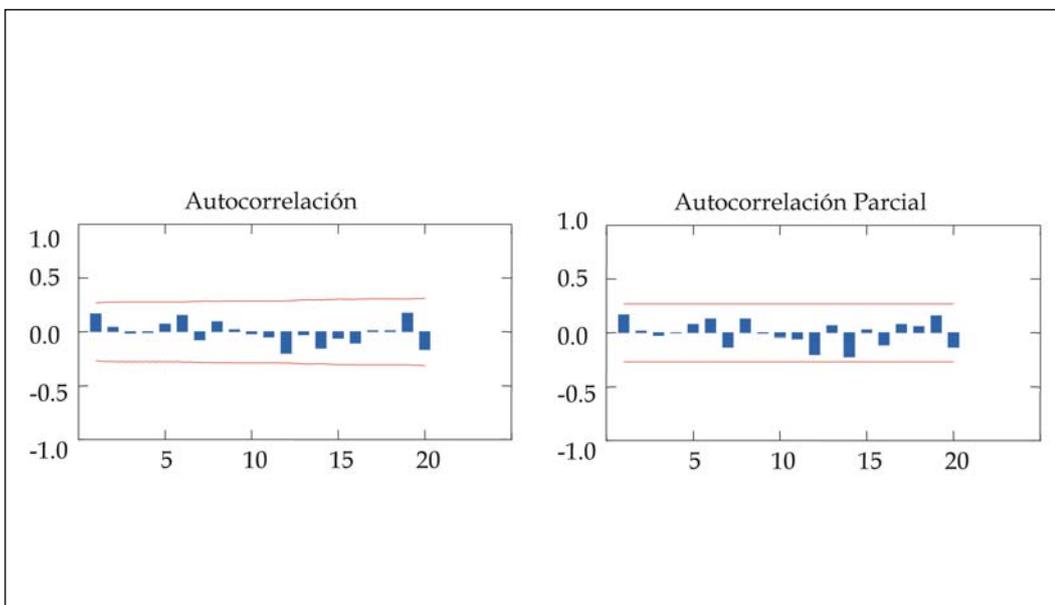


Figura 113. Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de las aportaciones medias anuales en España en el periodo 1940/41-1995/96

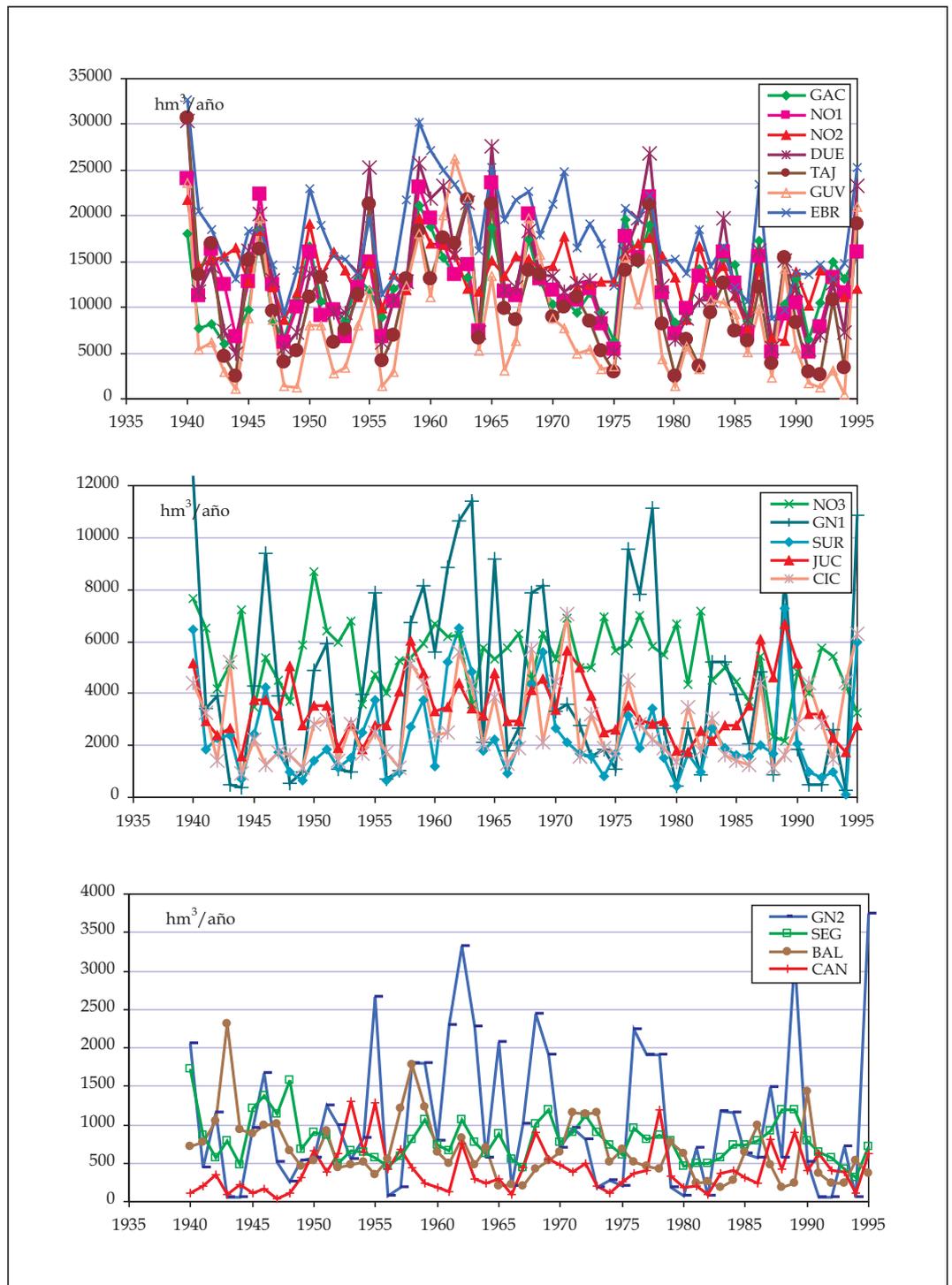


Figura 114. Series de aportaciones anuales en régimen natural (periodo 1940/41-1995/96) para los distintos ámbitos de la planificación hidrológica

Ambas funciones muestran la aparente inexistencia de dependencia temporal de las aportaciones totales anuales, lo que significa, como antes, que no puede mejorarse la predicción de la aportación total del año siguiente considerando la de los anteriores, pues cada año es independiente del anterior, y se trata de un fenómeno sin memoria. Físicamente esto significa que la componente hidrogeológica global en la península no es suficiente para generar persistencias significativas de caudales más allá de un año, o dicho de otra forma y simplificada, la España silíceo domina a la calcárea en la pro-

ducción de las escorrentías globales a escala anual. Como es lógico, y veremos más adelante, este resultado global presenta algunas diferencias territoriales.

Asimismo se confirma que, como en el caso de las lluvias, no hay ciclos de caudales plurianuales de naturaleza periódica, lo que resulta esperable considerando que, como ya hemos reiterado, las lluvias son las que los generan y controlan.

Entrando en el análisis de las diferencias territoriales de las series anuales, y con objeto de apreciar visual-

Ámbito de Planificación	Mínimo	Medio	Máximo	Máx/Mín	Coef. de variación	Coef. de sesgo	1 ^{er} coef. de autocorrelac.
Norte I	5.062	12.689	24.087	4,8	0,38	0,68	0,10
Norte II	6.286	13.881	21.704	3,5	0,22	-0,15	0,19
Norte III	2.195	5.337	8.710	4,0	0,24	-0,13	0,18
Duero	4.926	13.660	30.393	6,2	0,47	0,80	0,09
Tajo	2.475	10.883	30.690	12,4	0,56	0,75	0,14
Guadiana I	260	4.414	12.403	47,8	0,81	0,67	0,18
Guadiana II	46	1.061	3.734	80,6	0,88	1,01	0,09
Guadalquivir	436	8.601	26.157	60,0	0,77	0,91	0,30
Sur	122	2.351	7.271	59,6	0,71	1,35	0,20
Segura	294	803	1.725	5,9	0,36	1,00	0,40
Júcar	1.564	3.432	6.669	4,3	0,34	0,79	0,46
Ebro	8.815	17.967	32.771	3,7	0,29	0,57	0,39
C. I. Cataluña	912	2.787	7.033	7,7	0,54	0,93	0,00
Galicia Costa	5.360	12.250	21.087	3,9	0,33	0,35	0,10
Península	50.178	110.116	221.166	4,4	0,35	0,66	0,19
Baleares	175	661	2.320	13,2	0,63	1,59	0,45
Canarias	37	409	1.310	35,2	0,72	1,51	0,27
España	50.390	111.186	224.796	4,4	0,35	0,65	0,19

Tabla 16. Estadísticos básicos de las series de aportaciones totales anuales correspondientes al periodo 1940/41-1995/96, en cada uno de los ámbitos territoriales de la planificación hidrológica

mente los órdenes de magnitud relativos, la figura 114 muestra las series anuales de aportaciones ($\text{hm}^3/\text{año}$) en régimen natural para los distintos ámbitos de la planificación hidrológica.

Con objeto de hacerlas visibles, y percibir sus enormes diferencias relativas, se han separado en tres grupos, cada uno de cuyas escalas sucesivas es, como puede verse, del orden de la tercera parte de la anterior.

Asimismo, y como se hizo anteriormente con las precipitaciones, la tabla adjunta ofrece distintos estadísticos básicos de las series de aportaciones anuales, para el mismo periodo anterior, en cada uno de los ámbitos territoriales de la planificación hidrológica.

En esta tabla destaca la gran variabilidad temporal de las aportaciones anuales en las cuencas del Guadiana, Guadalquivir y Sur, muy superior a la de otras cuencas también semi-áridas como las del Júcar o Segura, donde -pese a que, como vimos, la variabilidad de las lluvias anuales es similar- la variabilidad de las aportaciones es menor debido a la mayor importancia de sus acuíferos, que actúan como filtros naturales reguladores de las lluvias. El examen visual de las series permite verificar este efecto (tabla 16).

En la figura 115 se representa la distribución espacial del coeficiente de variación de la escorrentía anual, expresado en tanto por ciento. Los valores correspondientes a las celdas del territorio mostrados en esta figura presentan, como es lógico, valores de este coeficiente superiores a los que se obtienen en el conjunto de cada uno de los ámbitos según la tabla anterior, pues al agregar territorialmente el efecto de variabilidad queda suavizado.

Los valores de los coeficientes de sesgo de la escorrentía anual mostrados en la tabla anterior adoptan en general valores positivos y mayores que los obtenidos para las precipitaciones, lo que indica que todavía es mayor que en éstas la asimetría y, por tanto, la probabilidad de presentación de valores anuales inferiores a la media que superiores.

En cuanto a la autocorrelación temporal, ya se dijo que no existía a la escala global, pero si se observan los coeficientes de autocorrelación de los distintos ámbitos se comprueba que existen cuatro cuencas donde resultan ser significativos, y son, por orden de persistencia, Júcar, Segura, Ebro y Guadalquivir. Lo que antes se dijo respecto a la España calcárea se manifiesta ahora con toda claridad, pues éstas son cuencas con una importante componente subterránea que filtra las precipitaciones y las rezaga en el tiempo, lo que genera mayor autodependencia temporal de sus series, y, en definitiva, persistencia y mayor predictibilidad.

En la figura 116 se muestra la autocorrelación de las series de aportaciones anuales totales en distintos ámbitos territoriales, pudiendo apreciarse la diferencia antedicha.

Obviamente, estos resultados corresponden a las escorrentías totales de los ámbitos territoriales, pero dentro de cada ámbito pueden darse diferencias significativas. Es el caso, por ejemplo, del río Tajo, en cuya cabecera domina un régimen pluvio-nival controlado por formaciones calizas que da lugar a máximos mensuales en marzo, autocorrelaciones significativas de sus aportaciones anuales y correlaciones cruzadas significativas con las aportaciones de la cabecera del

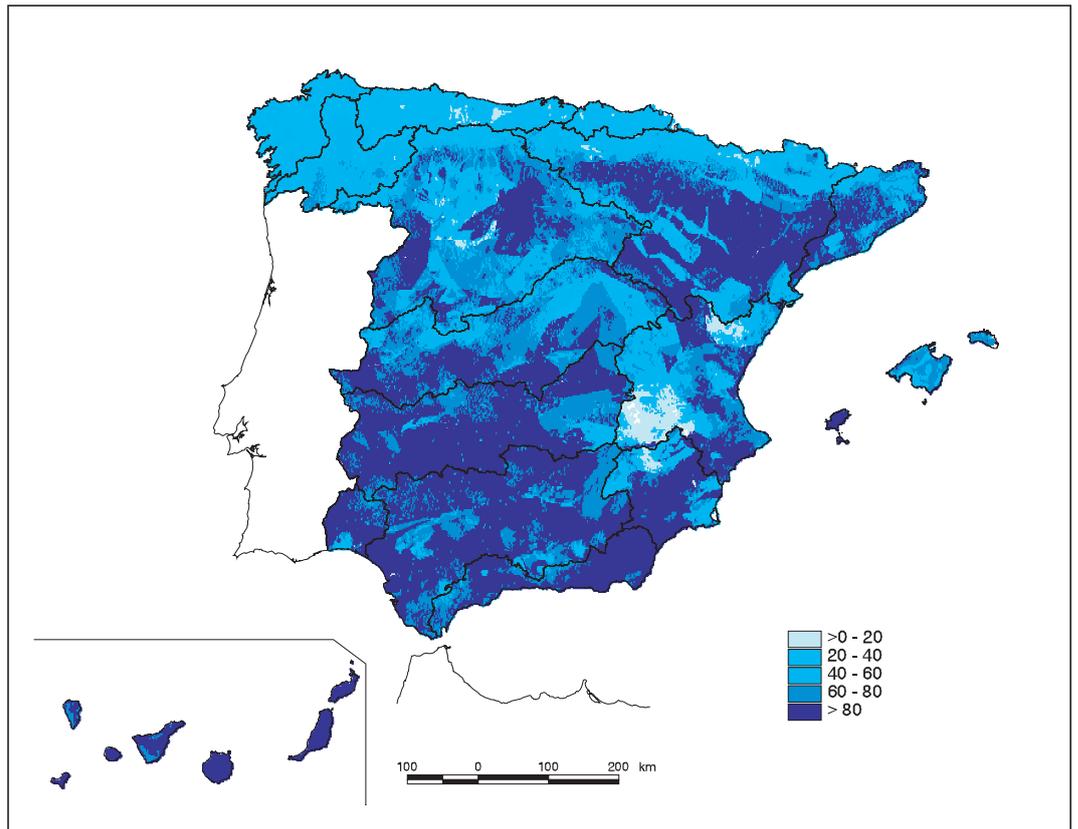


Figura 115. Mapa del coeficiente de variación (%) de la escorrentía anual en el periodo 1940/41-1995/96

Segura (Cabezas, 1986). En Toledo el río sigue mostrando el mismo régimen de máximos mensuales, pero con mayor variabilidad (quizá por la ausencia ya de los controles geológicos del curso alto). En Alcántara, la autocorrelación de cabecera se ha desvanecido y se presentan fuertes estiajes.

Avanzando en el estudio de la estructura espacio-temporal de las aportaciones, y análogamente a como se hizo en el análisis de las lluvias, la tabla 17 muestra la matriz

de correlación de las aportaciones anuales, para el periodo 1940/41-1995/96, en los distintos ámbitos. Como antes, de forma compacta en la mitad inferior y diagonal se muestran los coeficientes de correlación, y en la superior una estimación de las probabilidades asociadas a estos coeficientes (1 implica no correlación y 0 implica correlación significativa).

La comparación de esta tabla con la anteriormente ofrecida para las precipitaciones muestra, como era de

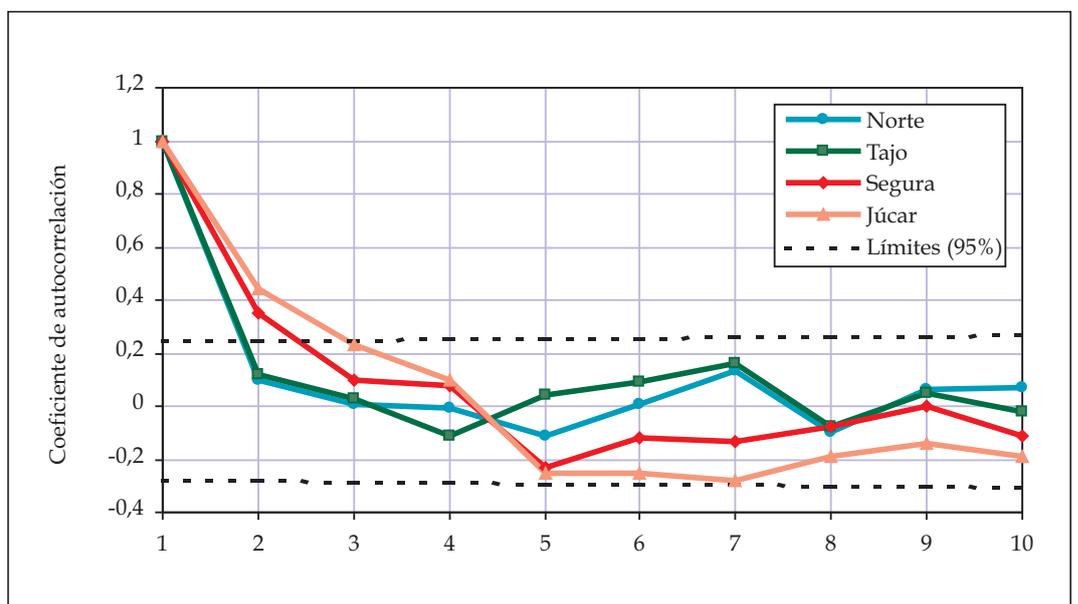


Figura 116. Correlogramas de las series de aportaciones anuales totales en distintos ámbitos territoriales

	GAC	NO1	NO2	NO3	DUE	TAJ	GN1	GN2	GUV	SUR	SEG	JUC	EBR	CIC	BAL	CAN
GAC	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0.28	1	1	0	1	1	1
NO1	0.88	1	0	1	0	0	0	0	0	0.01	1	1	0	1	1	1
NO2	0.58	0.67	1	0	0	0.05	0.35	1	0.35	1	1	1	0	1	1	1
NO3	0.25	0.21	0.76	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.03	1	1	1
DUE	0.78	0.89	0.54	0.1	1	0	0	0	0	0	0.75	1	0	1	1	1
TAJ	0.64	0.8	0.45	0.04	0.93	1	0	0	0	0	0.05	1	0	1	1	1
GN1	0.7	0.77	0.39	0.03	0.87	0.91	1	0	0	0	0.04	0.98	0	0.24	1	1
GN2	0.55	0.58	0.2	-0.13	0.73	0.8	0.9	1	0	0	0.99	0.47	0	0.11	1	0.08
GUV	0.67	0.73	0.39	0.01	0.81	0.84	0.95	0.88	1	0	0.02	0.55	0	0.03	1	1
SUR	0.4	0.5	0.2	-0.15	0.64	0.75	0.84	0.87	0.89	1	0.01	0.09	0.05	0.33	1	1
SEG	0.2	0.34	0.11	-0.09	0.36	0.46	0.46	0.35	0.48	0.51	1	0	1	1	1	1
JUC	0.22	0.2	-0.01	-0.12	0.28	0.35	0.35	0.38	0.37	0.44	0.68	1	1	1	1	1
EBR	0.68	0.77	0.74	0.48	0.77	0.72	0.67	0.53	0.67	0.46	0.24	0.27	1	0	1	1
CIC	0.3	0.32	0.25	0.06	0.3	0.33	0.4	0.43	0.47	0.39	0.14	0.32	0.58	1	1	1
BAL	-0.09	0.06	0.2	0.1	-0.05	0.05	-0.01	-0.05	0.04	0.05	0.22	0.3	0.15	0.34	1	1
CAN	0.15	0.07	0.04	-0.03	0.22	0.25	0.25	0.44	0.22	0.33	-0.03	0.14	0.07	0.16	-0.16	1

Tabla 17. Matriz de correlación de las aportaciones anuales por ámbitos de planificación hidrológica

esperar, grandes coincidencias, las agregaciones regionales resultan para las aportaciones son también las mismas que antes.

Asimismo, y como se hizo con la pluviometría, puede estudiarse ahora la interesante cuestión de las rachas húmedas y secas desde el punto de vista de los caudales, y a escala regional. Para ello, se han construido las curvas de desviaciones unitarias acumuladas de las aportaciones totales en régimen natural para las distintas regiones, ofrecidas conjuntamente en la figura 117.

Un primer examen de este gráfico muestra que, como sucedía con las lluvias, y en lógico paralelismo con aquéllas, existen en apariencia diferencias regionales que hacen que las secuencias de rachas de caudales en las distintas cuencas no resulten ser las mismas. Una

inspección más detallada permite diferenciar las situaciones mostradas en los gráficos de la figura 118, en los que se han representado también las curvas correspondientes a las precipitaciones regionales.

En total paralelismo con las lluvias, la mayoría de las cuencas (Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Sur, Ebro, C.I. de Cataluña, Norte I, Galicia Costa y Baleares) ha seguido un patrón muy similar, que es, sensiblemente, el que se ofreció antes como representativo de la media global del país, pero hay tres regiones (Levante, Norte y Canarias) que parecen haber seguido patrones diferentes a éste, y diferentes entre sí.

Asimismo, se observa cómo desde finales de los 70 hay una racha de caudales seca, más o menos exacerbada, en todas las regiones, y con algún altibajo en el periodo 1985-90, a partir del cual es completamente

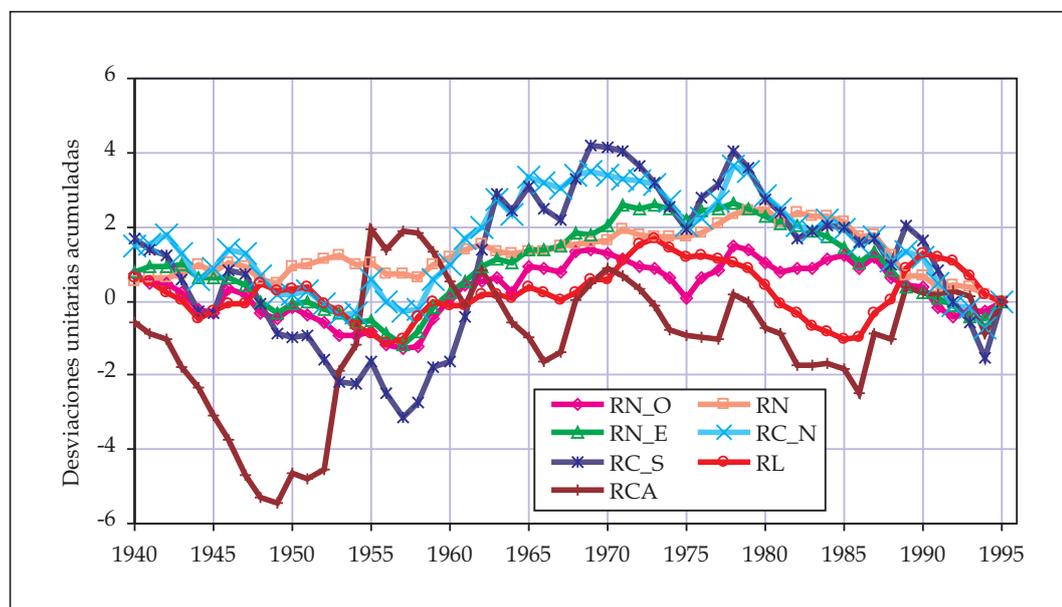


Figura 117. Rachas de la aportación total anual en régimen natural por regiones en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

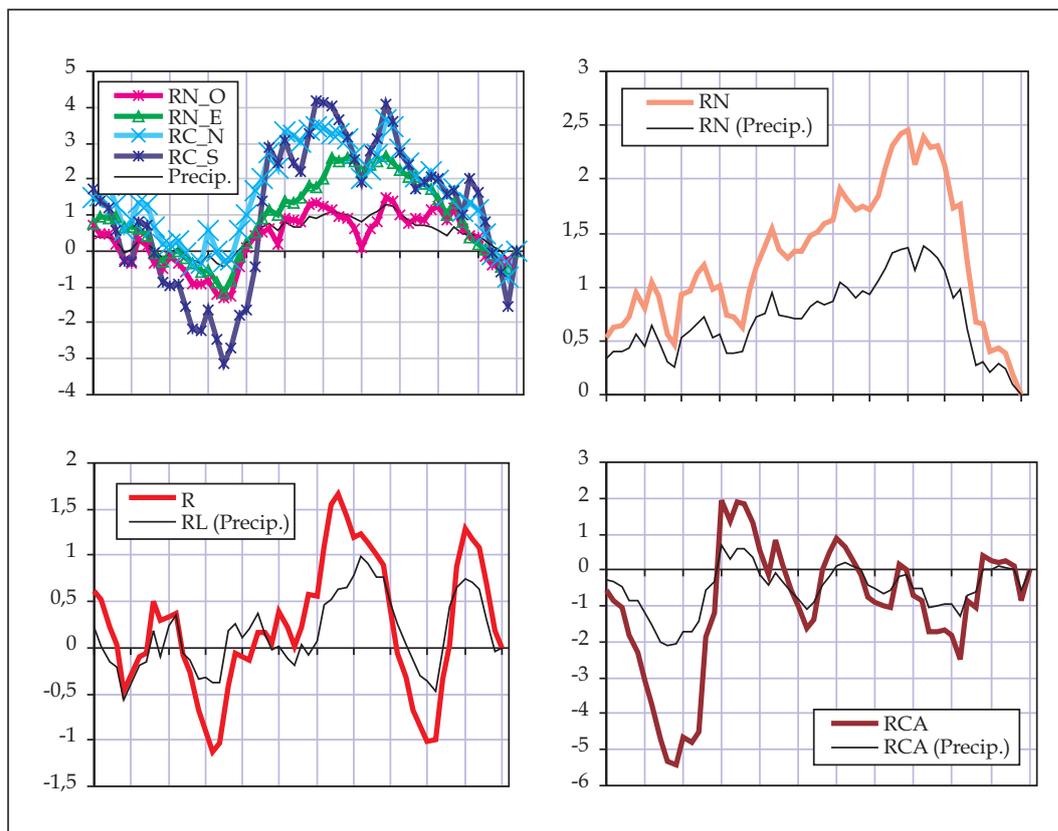


Figura 118. Distintas situaciones de las rachas de aportación total anual en régimen natural por regiones en el periodo 1940/41-1995/96, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

generalizada. Como se apuntó, es la constatación de la grave sequía que se vivió en muchos lugares de España en estos últimos años.

En definitiva, se confirma que, tal y como se avanzó anteriormente, la variabilidad pluviométrica se transmite, y de forma más acusada, amplificada, a los datos de escorrentía, efecto que se aprecia con toda nitidez en las series anteriores de desviaciones acumuladas. A estas escalas espacio-temporales, regiones de comportamiento pluviométrico similar son regiones con comportamiento hidrológico también similar, y rachas pluviométricas húmedas o secas se traducen en rachas de caudales de idéntico signo. Además, los rezagos de esta traslación son muy reducidos, como se vio también al estudiar la correlación cruzada de ambos fenómenos. Como situaciones representativas, en la región norte se observa que las respuestas son inmediatas y casi lineales, mientras que en el levante hay algún efecto de rezago y desajuste debido a la persistencia y redistribución hidrogeológica.

Si en lugar de datos anuales se empleasen datos a escalas más detalladas (por ejemplo mensuales, diarios u horarios), los efectos de irregularidad y no linealidad se verían aún más acentuados.

3.1.4.2. Fracción de origen subterráneo. Recarga natural

En epígrafes anteriores se ha expuesto la situación en España de los recursos hídricos totales en régimen natural. Estos flujos totales constan, como se dijo, de una componente de escorrentía superficial directa, y de una componente de origen subterráneo. Con objeto de avanzar en el conocimiento de los recursos hídricos, se describirá ahora esta componente subterránea de la escorrentía total, que básicamente coincide -dejando a salvo los efectos de transferencias subterráneas externas- con la recarga natural de los acuíferos.

La evaluación de estos flujos de recarga es una tarea compleja, para la que existen diversas aproximaciones técnicas y que, en definitiva, está sometida a incertidumbres que pueden en ocasiones ser muy significativas. Pese a estas dificultades, el conocimiento de la recarga resulta de gran interés teórico y práctico, pues viene a acotar las posibilidades máximas de explotación sostenible a largo plazo de las aguas subterráneas de un acuífero.

Como se dijo, la mayor parte del agua que recarga los acuíferos se descarga diferida en el tiempo a la red fluvial, de forma difusa o a través de manantiales, y en muchas cuencas es uno de los constituyentes básicos de la aportación de los ríos. Otra parte de la recarga, en general mucho más reducida, se transfiere subte-

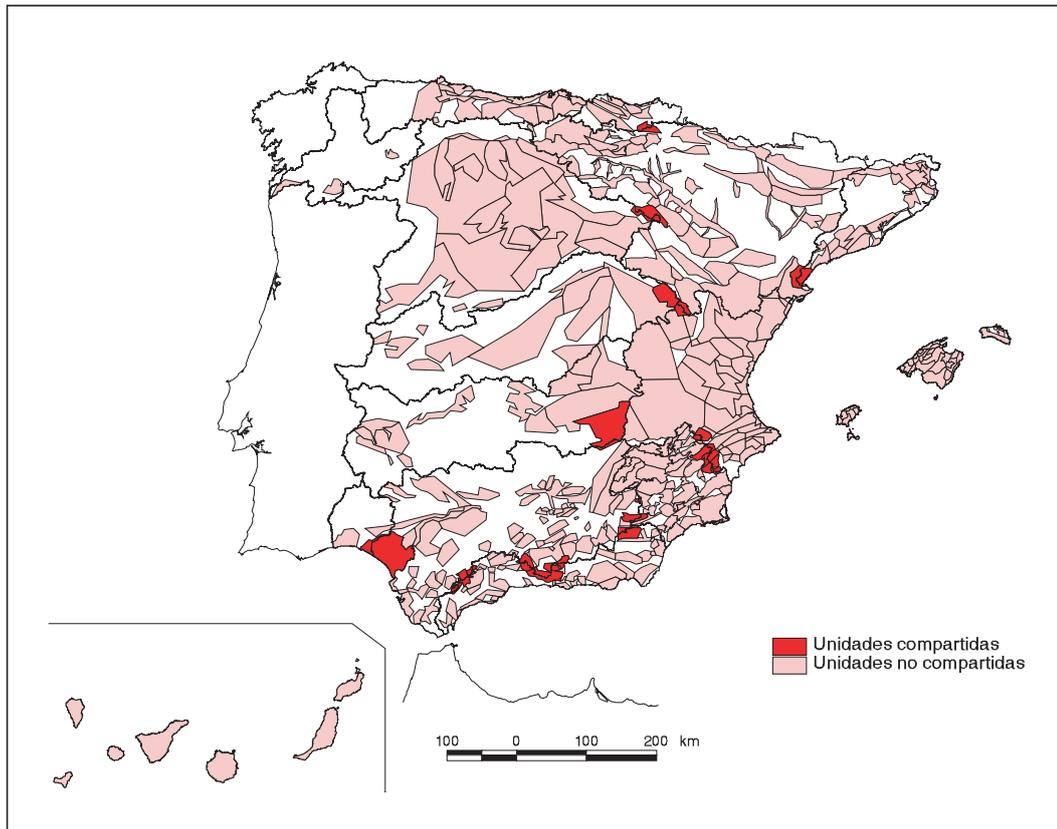


Figura 119. Mapa de unidades hidrogeológicas

rráneamente a otros acuíferos o, en el caso de los acuíferos costeros, descarga al mar.

Para estimar la recarga natural a los acuíferos se necesita conocer su delimitación geométrica. En España los acuíferos se han agrupado en distintas unidades hidrogeológicas. Es conveniente diferenciar aquí entre el concepto físico de acuífero, entendido como formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua, y el concepto administrativo de unidad hidrogeológica, formada por uno o más acuíferos, que se agrupan a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua y cuyos límites pueden incluir también porciones del territorio donde no existen acuíferos.

En el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MOPT-MA-MINER, 1995) se recogieron un total de 442 unidades hidrogeológicas en España. De ellas, 422 se situaban íntegramente dentro de un sólo ámbito territorial de planificación hidrológica, 19 eran compartidas por dos ámbitos, y una era compartida por tres.

Entre las unidades hidrogeológicas definidas para el territorio peninsular, hay cuatro en las que los acuíferos tienen una porción en territorio portugués. Son las siguientes: aluvial del Miño (UH 01.26) en la cuenca del Norte, Ciudad Rodrigo-Salamanca (UH 02.19) en el Duero, la Moraleja (UH 03.13) en el Tajo y Vegas Bajas (UH 04.09) en el Guadiana. Exceptuando la mencionada en primer lugar, en todos los casos el

afloramiento del acuífero en Portugal ocupa una superficie muy reducida, notablemente inferior a la correspondiente al lado español.

En algunos de los Planes Hidrológicos de cuenca (p.e. Segura y Ebro), y como consecuencia de mejoras del conocimiento hidrogeológico, se ha efectuado una nueva delimitación de las unidades hidrogeológicas en la que, aunque con carácter general hay bastante coincidencia con la delimitación antes citada, se observan diferencias importantes en algunas unidades concretas, cambios en la codificación, e incorporación de nuevas unidades. En algunas unidades compartidas, cuya definición es de ámbito nacional, también existen discrepancias entre los Planes Hidrológicos que las comparten, que son todavía más acusadas en las cifras sobre las características de las unidades (superficies permeables aflorantes, recargas, características hidrodinámicas, etc.). Ha de notarse que para que una unidad se considere compartida no es suficiente que el acuífero se extienda sobre el territorio de más de un ámbito de planificación.

Por las razones antedichas se ha elaborado, con motivo del presente Libro, una nueva delimitación y caracterización de las unidades, cuyo mapa se adjunta, conforme a los siguientes criterios (fig. 119):

- Se adoptan, con carácter general, la denominación y la poligonal de la unidad definida en los planes hidrológicos de cuenca, pues éstos son los Docu-

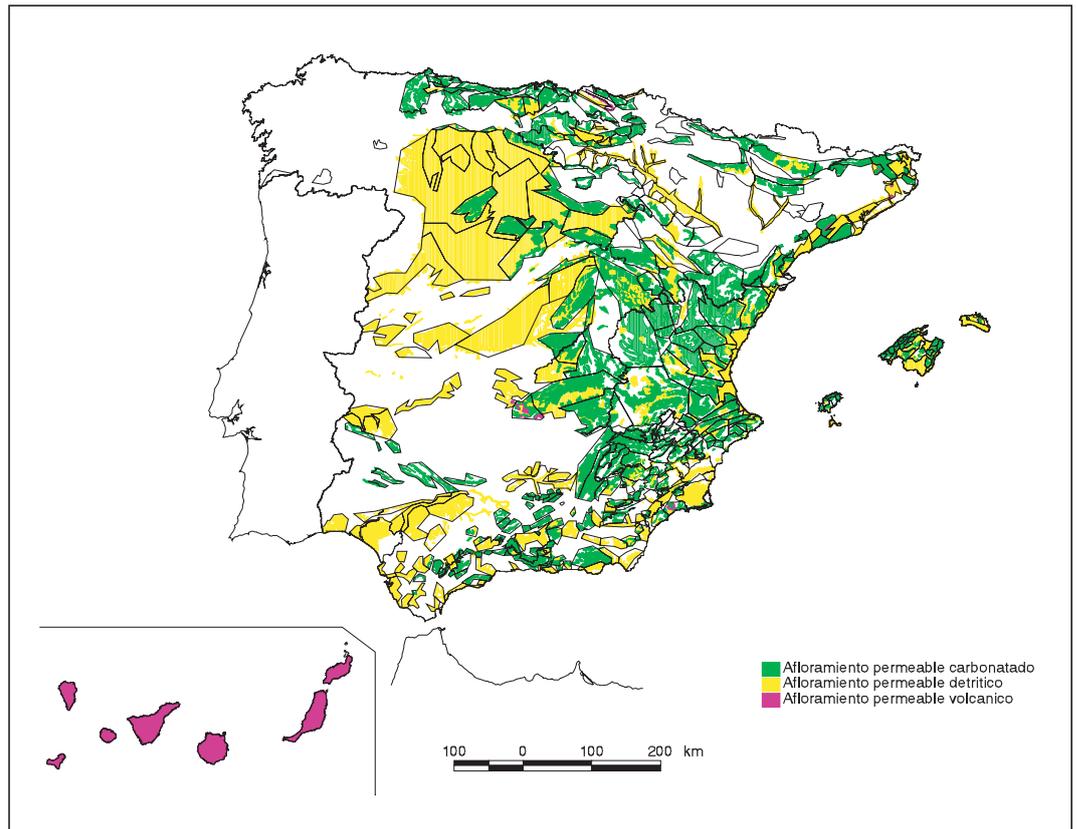


Figura 120. Mapa de afloramientos permeables

mentos técnico-administrativos adecuados y competentes para tal definición.

- Una excepción al criterio anterior son las unidades compartidas. En esas unidades existen acuíferos que se sitúan entre dos o más ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos de cuenca (PHC). En esas ocasiones es el Plan Hidrológico nacional (PHN) el que debe proceder a su delimitación y asignación de los recursos. Provisionalmente, y a la espera del PHN, se han adoptado las unidades reflejadas en el documento Delimitación y síntesis de las características de las unidades hidrogeológicas intercuenas (MOPT, 1993a).
- Cuando dos vértices contiguos de la poligonal que define la unidad se sitúan sobre la divisoria con otra cuenca o con la costa, la unión de dichos vértices no se efectúa mediante una línea recta, sino a lo largo del tramo de divisoria o costa que delimitan.
- En las Islas Canarias se ha definido una unidad por cada isla, según el borrador del Plan Hidrológico de Canarias, y en las Cuenas Internas de Cataluña se ha adoptado la delimitación reflejada en MOPTMA-MINER (1995), al no disponerse de información cartográfica adecuada sobre las poligonales delimitadas según Decreto 328/1988 del Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalidad de Cataluña.

- Las cifras de superficie permeable aflorante en cada unidad y su tipificación como carbonatada, detrítica y volcánica se han obtenido del inventario de MOPTMA-MINER-UPC (1993), tras calcular la superficie permeable de cada tipo incluida dentro de cada unidad hidrogeológica. Esta decisión obedece a las discrepancias metodológicas observadas en la determinación de la superficie permeable en los distintos Planes de cuenca, heterogeneidad que desaconsejaba su adopción directa.

La superficie cubierta por los afloramientos permeables dentro de las unidades hidrogeológicas es del orden de 176.000 km², que se reparten en 99.000 km² correspondientes a formaciones detríticas, 69.700 km² a formaciones carbonatadas y 7.800 km² a formaciones volcánicas. El mapa adjunto, elaborado a partir de MOPTMA-MINER-UPC (1993), muestra estos afloramientos permeables.

- Las cifras de características básicas de cada unidad (recarga por lluvia y cauces, retornos de riego y transferencias) se han extraído de los Planes Hidrológicos de cuenca, y en los casos en que no existía esa información, se adoptó la de MOPTMA-MINER (1995) (fig. 120).

En el territorio no cubierto por las unidades hidrogeológicas delimitadas también pueden existir acuíferos que son, en general, de baja o muy baja permeabilidad, y

Ámbito de planificación	Número de unidades no compartidas	Número de unidades compartidas	Superficie permeable aflorante (km ²)	Recarga por lluvia y cauces (km ³ /año)	Recarga por riesgos (hm ³ /año)	Transfer. de otras unidades (km ³ /año)	Transfer. a otras unidades (km ³ /año)
Norte I	3	-	-	-	-	-	-
Norte II	16	0	4.672	2.587	0	94	34
Norte III	7	1	946	410	0	0	0
Duero	20	1	52.799	1.840	1	249	383
Tajo	12	1	17.475	1.565	0	0	0
Guadiana I	10	1	13.834	646	20	60	60
Guadiana II	2	1	920	141	0	0	0
Guadalquivir	57	11	15.140	2.573	16	27	70
Sur	41	7	5.305	865	69	107	31
Segura	50	7	6.958	674	83	44	0
Júcar	46	6	23.781	3.011	480	514	468
Ebro	57	4	17.057	4.433	586	19	25
C.I. Cataluña	29	1	6.616	938	45	65	54
Galicia Costa	-	-	-	-	-	-	-
Baleares	34	0	3.674	517	69	26	23
Canarias	7	0	7.384	681	0	0	0
España	391	20 (1)	176.561	20.881	1.369	1.205	1.148

Tabla 18. Características de las unidades hidrogeológicas según ámbitos de la planificación

(1) El total no coincide con las sumas parciales, dado que distintos ámbitos pueden compartir una misma unidad

Nota: En el ámbito del Duero se ha contabilizado la U.H. 2.12. denominada Aluviales del Duero, aunque su poligonal y características asociadas no se definen en el Plan Hidrológico del Duero ni en MOPTMA-MINER (1995).

cuyas características y balances aún no han sido suficientemente evaluados. El análisis de flujos base revela, en efecto, su existencia. Estos acuíferos y unidades deberán irse incorporando a los inventarios de la planificación a medida que vayan siendo definidos y caracterizados.

Con los criterios antes descritos el nuevo número de unidades hidrogeológicas es de 411, de las cuales 391 se sitúan íntegramente dentro de un sólo ámbito de planificación, 19 son compartidas por dos ámbitos y una lo es por tres (CEDEX, 1998a). La diferencia respecto al número total de unidades reflejadas en MOPTMA-MINER (1995) se debe, básicamente, a que sólo se han considerado 7 unidades en las Islas Canarias, una en cada isla. Se ha aumentado, sin embargo, el número de unidades en las cuencas del Ebro y Segura, como consecuencia de la nueva delimitación reflejada en sus respectivos Planes de cuenca.

El resumen de las características básicas medias de estas unidades, agregadas por ámbitos de planificación, y con datos elaborados a partir de los Planes de cuenca y de MOPTMA-MINER (1995), se muestra en la tabla 18.

Como se observa, el total resultante de la recarga natural media (por lluvia e infiltración en cauces, y sin considerar los excedentes de riego, que no corresponden al régimen natural) en el conjunto de todas las unidades hidrogeológicas, según la información contenida en los Planes Hidrológicos de cuenca, asciende casi a 21.000 hm³/año. La recarga en el conjunto del terri-

torio nacional es, en realidad, mayor, ya que en esta estimación sólo se han considerado las zonas donde se han delimitado unidades hidrogeológicas y, sin embargo, en algunas otras zonas no catalogadas existen, como se dijo, acuíferos. En estas zonas sin acuíferos definidos, en ocasiones, la suma de las muchas pequeñas captaciones, junto con los aprovechamientos de los manantiales, alcanza una magnitud significativa, tal y como sucede en áreas de Galicia y Canarias. De hecho, como se explica posteriormente, para el ajuste del modelo de simulación, ha sido necesario incluir nuevas áreas de alimentación de las aguas subterráneas en los ámbitos de Galicia Costa, Norte I y Norte II.

Las unidades compartidas entre distintos ámbitos territoriales son las recogidas en la tabla adjunta, en la que se muestra también el ámbito al que se asignan (tabla 19).

Análogamente a como se hizo con las aportaciones totales, y con objeto de disponer de una evaluación de la recarga natural a los acuíferos en un período común (1940/41 a 1995/96) y con una metodología de cálculo homogénea, se ha realizado, para toda España, una estimación de la recarga debida a la lluvia caída sobre cada unidad, con el modelo distribuido de simulación de flujos antes citado. Esta estimación no tiene en cuenta, por tanto, las transferencias entre unidades que, aunque con carácter general son pequeñas, pueden ser importantes en algunas unidades concretas. En la figura 121 se muestran los valores medios anuales de recarga, en mm/año, obtenidos en cada unidad hidrogeológica.

Número	Unidad hidrogeológica	Ámbitos afectados
1	Aralar-Ulzama	Norte III y Ebro
2	Araviana-Moncayo	Duero y Ebro
3	Albarracín-Cella-Molina de Aragón	Tajo, Ebro y Júcar
4	Campo de Montiel	Guadiana I y Guadalquivir
5	Almonte-Marismas	Guadiana II y Guadalquivir
6	Sierra de Libar	Guadalquivir y Sur
7	Setenil-Ronda	Guadalquivir y Sur
8	Sierra de Cañete	Guadalquivir y Sur
9	Sierra Gorda-Zafarraya	Guadalquivir y Sur
10	Tejeda-Almijara-Las Guajaras	Guadalquivir y Sur
11	Sierra de Padul	Guadalquivir y Sur
12	Sierra de las Estancias	Guadalquivir y Sur
13	Orce-María	Guadalquivir y Segura
14	Sierra Zarza	Guadalquivir y Segura
15	Sierra de la Oliva	Segura y Júcar
16	Jumilla-Villena	Segura y Júcar
17	Serral-Salinas	Segura y Júcar
18	Quibas	Segura y Júcar
19	Sierra de Crevillente	Segura y Júcar
20	Cardó-Perelló	Ebro y C.I. Cataluña

Tabla 19. Unidades hidrogeológicas compartidas entre distintos ámbitos de planificación

Asimismo, las figuras 122, 123 y 124 muestran las series anuales de recarga por lluvia directa correspondientes a dos unidades hidrogeológicas concretas, la de la Mancha Oriental y la de Madrid-Talavera, así como la correspondiente a todo el territorio peninsular español, lo que permite apreciar su variabilidad interanual.

En la tabla 20 y la figura 125 se integran los valores medios anuales de esta recarga en cada uno de los ámbitos, y el porcentaje que representan respecto a la aportación total, ofrecida en el epígrafe anterior. Este porcentaje es, pues, una estimación muy encajada de la escorrentía subterránea o fracción de origen subterráneo de los caudales totales en cada ámbito.

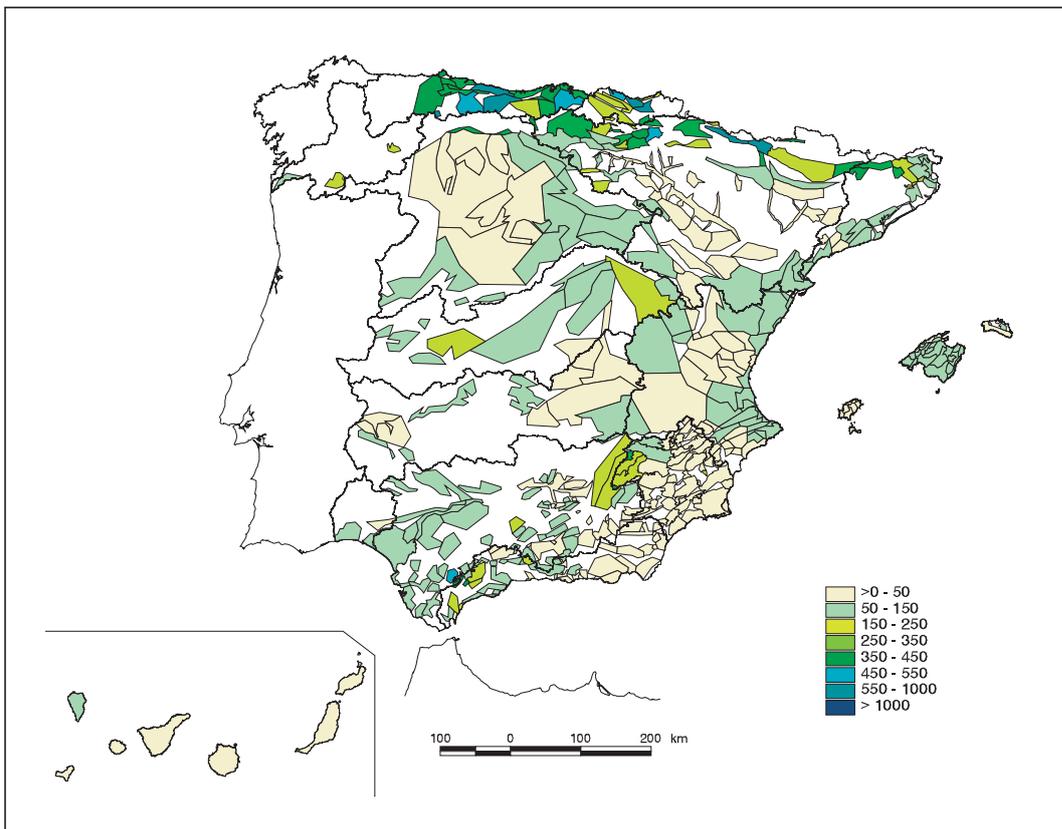


Figura 121. Mapa de recarga natural en las unidades hidrogeológicas (mm/año)

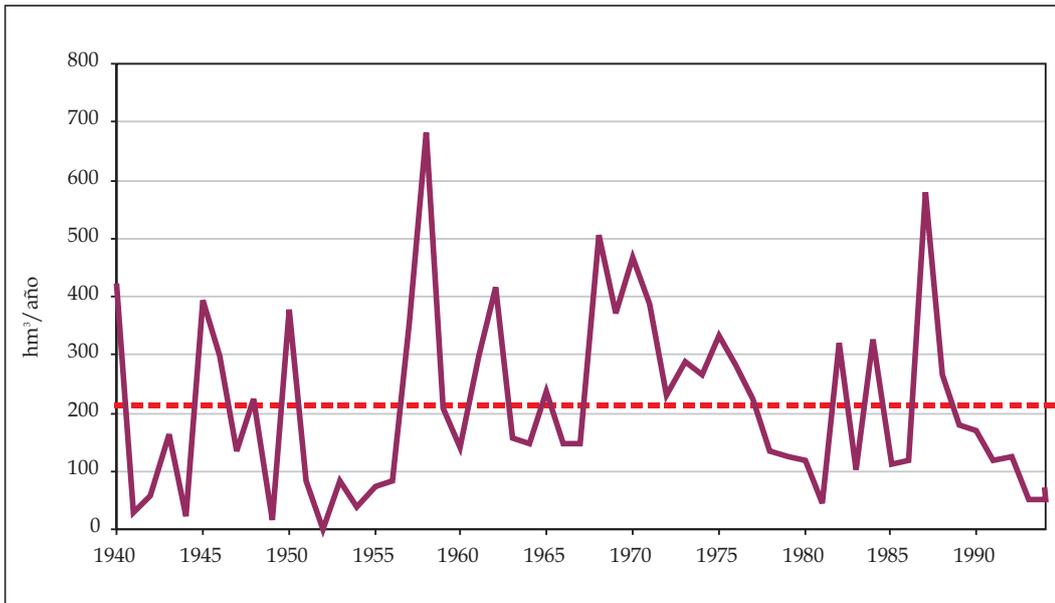


Figura 122. Recarga por infiltración de lluvia ($\text{hm}^3/\text{año}$) en la unidad hidrogeológica de la Mancha Oriental (periodo 1940/41 a 1995/96)

Los resultados obtenidos muestran, para el total de la Península, una cifra media global de componente subterránea (equiparada a recarga natural) del orden del 26% de la aportación total, pero con grandes variaciones territoriales que oscilan entre más del 70% en el Segura y Júcar (como ya vimos y ahora se vuelve a comprobar, los ámbitos peninsulares con mayor componente subterránea y autocorrelación, con diferencia sobre el resto) y menos del 10% en el Guadiana II. En términos absolutos, las mayores recargas naturales corresponderían al Norte II y Ebro (del orden de $5.000 \text{ hm}^3/\text{año}$), y la menor al Guadiana II (menor de $100 \text{ hm}^3/\text{año}$).

Ello revela, en definitiva, que aunque las aguas subterráneas no son global y cuantitativamente el principal recurso hídrico natural de España, son un recurso

muy significativo y, en algunos territorios, sin lugar a dudas, el más importante.

Como puede verse, la media global obtenida con el modelo de simulación (próxima a los $29.000 \text{ hm}^3/\text{año}$ en la península) es superior a la procedente de los Planes de cuenca (del orden de 20.000 en la península). Ello se debe, en buena parte, a que para poder reproducir con el modelo los periodos de estiaje de algunos ríos de Galicia Costa, Norte I y Norte II, se han incluido nuevas áreas de alimentación de las aguas subterráneas, no reflejadas en la figura anterior al no tener la consideración administrativa de unidades hidrogeológicas.

Por otra parte, aunque en términos cuantitativamente menores, en algunas unidades hidrogeológicas, la recarga natural reflejada en los Planes de cuenca es superior

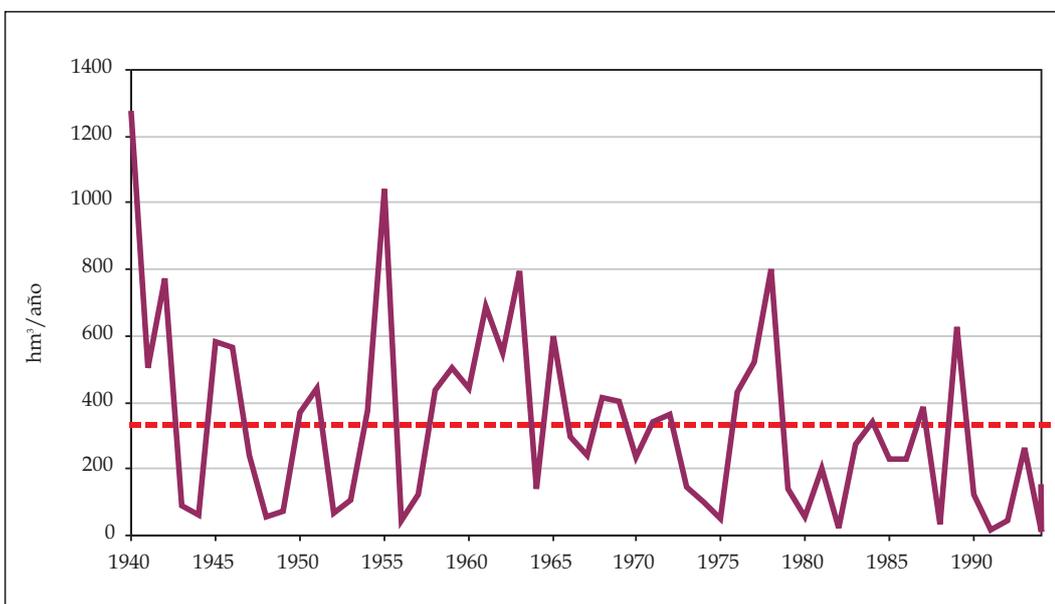


Figura 123. Recarga por infiltración de lluvia ($\text{hm}^3/\text{año}$) en la unidad hidrogeológica de Madrid-Talavera (periodo 1940/41 a 1995/96)

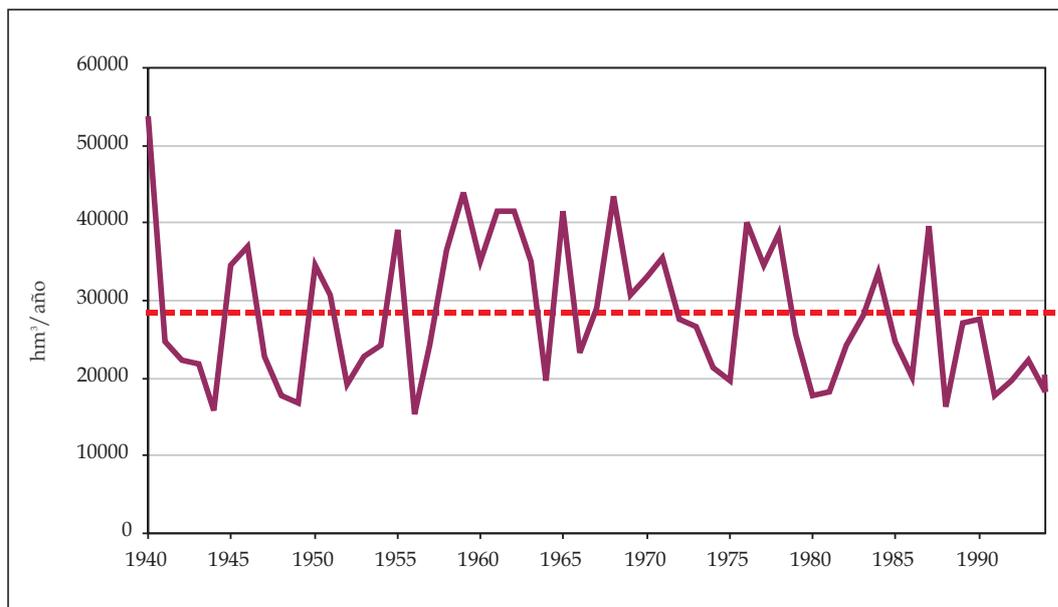


Figura 124. Recarga por infiltración de lluvia (hm³/año) en la Península (periodo 1940/41 a 1995/96)

a la esorrentía total obtenida con el modelo de simulación, lo cual puede ser debido a que: a) en ocasiones se producen situaciones muy complejas en las que no es fácil separar la recarga natural de los retornos de riego, transferencias subterráneas, etc. (en la mayoría de los Planes de cuenca sólo se recoge la cifra de recarga al acuífero, sin especificar si es natural o no y si incluye o no las transferencias de otras cuencas); b) no se conoce el periodo temporal de cálculo de las recargas y si éstas están sesgadas o si son representativas de la media anual; y c) como dijimos, la estimación de la recarga presenta unas incertidumbres y dificultades intrínsecas que hacen esperables tales divergencias.

La figura 126 muestra el contraste de datos de ambas fuentes pudiendo verse que, salvo en estos casos singulares, las diferencias no superan el 20%.

Con objeto de dar una perspectiva general de estas evaluaciones a lo largo del tiempo, la tabla 21 muestra los

datos de recarga o esorrentía subterránea en las cuencas ofrecidos por distintas fuentes.

Como puede apreciarse, todas las estimaciones realizadas hasta ahora ofrecen unos valores de recarga entre 15.000 y 20.000 hm³/año, lo que contrasta con los 30.000 obtenidos en la evaluación realizada para este Libro. Las razones de esta diferencia se detallarán posteriormente.

En todo caso, se pone de manifiesto la necesidad de profundizar más en el conocimiento de la recarga a los acuíferos y su reparto en la debida a lluvia y cauces, las transferencias subterráneas, los retornos de riegos, etc. Todo ello contribuiría a mejorar la comprensión y cuantificación del papel real de las aguas subterráneas en el conjunto de los recursos hídricos, papel que, como se ve, resulta de gran importancia en algunas de nuestras cuencas principales y constituye un recurso estratégico para mejorar la garantía de los abastecimientos.

Tabla 20. Recarga a los acuíferos y aportación total en régimen natural en los ámbitos territoriales de la planificación según el modelo de simulación utilizado

Ámbito de Planificación	Aportación total en reg. natural	Recarga en régimen natural	Relación Recarga/Aportación
Norte I	12.689	2.745	22
Norte II	13.881	5.077	37
Norte III	5.337	894	18
Duero	13.660	3.000	22
Tajo	10.883	2.393	22
Guadiana I	4.414	687	16
Guadiana II	1.061	63	6
Guadalquivir	8.601	2.343	27
Sur	2.351	680	29
Segura	803	588	73
Júcar	3.432	2.492	73
Ebro	17.967	4.614	26
C. I. Cataluña	2.787	909	33
Galicia Costa	12.250	2.234	18
Península	110.116	28.719	26

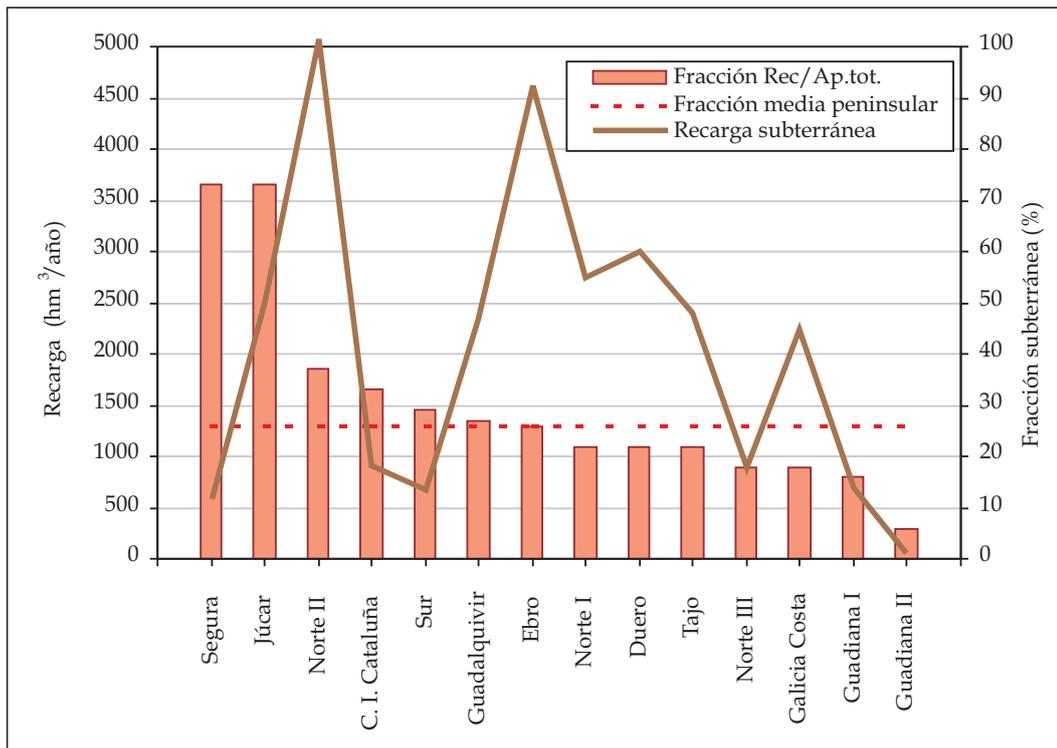


Figura 125. Fracción subterránea de la escorrentía total y recarga a los acuíferos en régimen natural en los ámbitos territoriales de la planificación

En cuanto a las salidas subterráneas al mar, se trata de una cantidad muy pequeña en términos relativos. Tienen cierta importancia en las islas, por la gran longitud del contacto perimetral de la costa en relación a su superficie. Pueden, también, existir singularidades de surgencias submarinas localizadas debidas a fenómenos kársticos, como los casos de la Sierra de Irta (Castellón) y la zona de Nerja-La Herradura (Málaga).

En la tabla 22 se reproducen distintas estimaciones de salidas subterráneas al mar (en hm³/año), por cuencas o ámbitos de planificación. Las más recientes son las de la DGOH (1995) obtenidas para la zona de costa ocupada por unidades hidrogeológicas identificadas, y las que proporciona el modelo de simulación puesto a punto con motivo de la elaboración de este Libro.

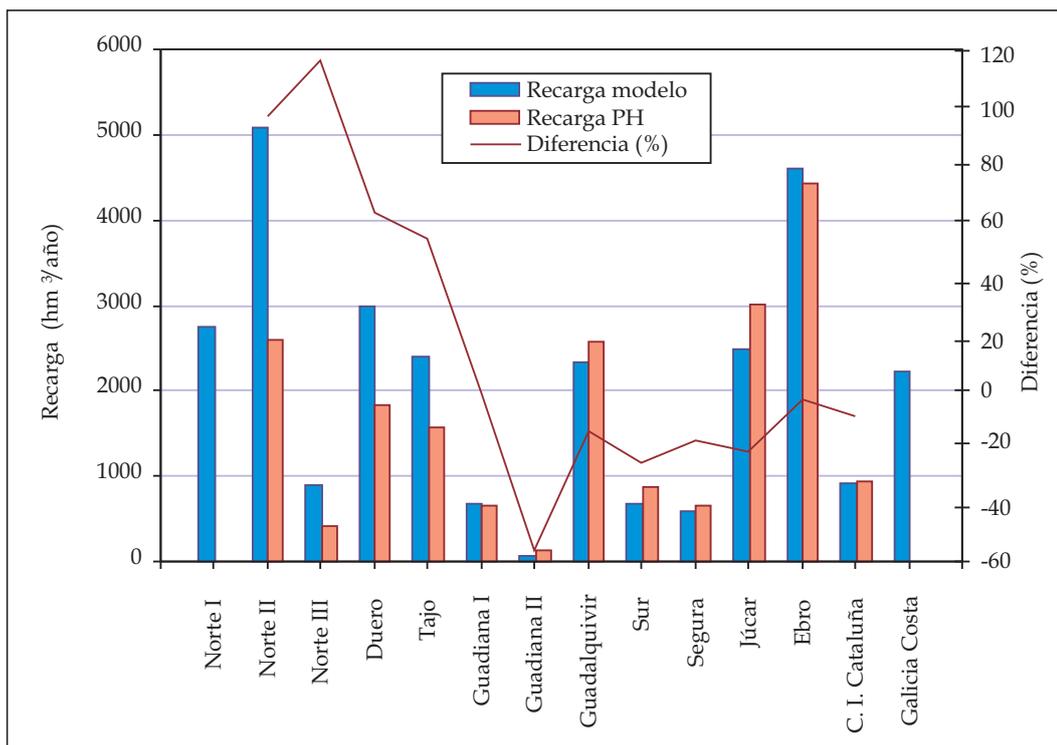


Figura 126. Contraste de datos de recarga de acuíferos en régimen natural en los ámbitos territoriales de la planificación

Ámbito de Planificación	1967 (a)	1974 (b)	1980 (c)	1986 (d)	1993 (e)	1998 (f)	1998 (g)
Galicia Costa					-	-	2.234
Norte I					-	-	2.745
Norte II					2.644	2.587	5.077
Norte III					331	410	894
Norte	5.500	5.480	4.100	4.100	2.975	2.997	10.950
Duero	3.000	1.430	1.450	1.450	1.875	1.840	3.000
Tajo	1.700	2.160	2.200	2.000	1.646	1.565	2.393
Guadiana I					656	646	687
Guadiana II					98	141	63
Guadiana	1.000	710	700	500	754	787	750
Guadalquivir	1.800	2.250	2.100	1.100	2.315	2.573	2.343
Sur	250	900	450	700	1.160	865	680
Segura	300	510	500	600	548	674	588
Júcar	700	2.460	1.200	1.700	3.505	3.011	2.492
Ebro	3.400	3.120	3.050	2.900	2.923	4.433	4.614
C.I. Cataluña	500	250	250	250	1.035	938	909
Total Península	18.150	19.270	16.000	15.300	18.736	19.683	28.719
Baleares			-	-	585	517	
Canarias			-	-	700	681	
Total España					20.021	20.881	

Tabla 21. Estimaciones de la recarga de acuíferos

(a) Elaborado por Llamas en 1967. Escorrentía subterránea a los ríos. Citado en Llamas (1995) pag. 133.

(b) Coma (1974). Escorrentía subterránea total (incl. flujo al mar). Citado en Llamas (1995) pag. 133.

(c) MOPU (1980). El agua en España.. CEH. DGOH. También en Heras (1977) y en otros.

(d) MOPU (1986) Panorama hidráulico de España, en Gallego Anabitarte et al. (1986), vol. II.

(e) MOPT (1993) Memoria del anteproyecto de Ley del PHN.. También en MOPTMA-MINER (1995)

(f) Datos de los Planes Hidrológicos de cuenca (1998)

(g) Datos de la evaluación realizada en este Libro Blanco (año 1998)

Notas: Norte comprende los ámbitos de Galicia Costa y Norte I, II, y III; Guadiana comprende los ámbitos Guadiana I y II.

Ámbito territorial	1967 (a)	1980 (b)	1995 (c)	1998 (d)
Galicia Costa	-	-	-	356
Norte I	-	-	-	-
Norte II	-	-	-	786
Norte III	-	-	-	161
Norte	1.100	1.500	100	1.303
Guadiana I	-	-	-	-
Guadiana II	-	-	-	8
Guadiana	60	50	25	8
Guadalquivir	600	200	70	56
Sur	300	440	100	65
Segura	160	10	5	16
Júcar	800	1.300	225	173
Ebro	80	100	40	-
C.I. Cataluña	250	700	125	83
Península	3.350	4.300	690	1.704
Baleares	-	480	150	-
Canarias	-	610	230	-
Total España	-	5.390	1.070	-

Tabla 22. Estimaciones de las salidas subterráneas al mar ($hm^3/año$) por ámbitos de planificación

(a) Llamas (1967). Citado en Llamas (1995) pag. 133.

(b) MOPU (1980) El agua en España. CEH. DGOH. También en Heras (1977) y en MOPU (1982).

(c) DGOH (1995) Estudio de la situación actual y programación de actuaciones futuras en el ámbito de las aguas subterráneas en España.

(d) Modelo de simulación de aportaciones utilizado en este Libro (año 1998).

Tabla 23. Estimación de las reservas de aguas subterráneas (hm³) en distintas cuencas

Cuenca	Reservas (hm ³)
Norte	7.700
Duero	43.600
Tajo	4.700
Guadiana	2.800
Guadalquivir	11.000
Sur	5.600
Segura	-
Júcar	79.100
Ebro	12.800
C.I. Cataluña	12.600

Como sugiere la dispersión de las magnitudes ofrecidas por los distintos autores, estas cifras han de contemplarse con cierta reserva, y deben valorarse como una acotación encajada del orden de magnitud del problema, dado que no se dispone de datos bien contrastados que permitan cuantificar con suficiente precisión las transferencias subterráneas de agua dulce al mar. En cualquier caso, las diferencias entre las cifras proporcionadas por los dos trabajos más recientes son moderadas, si se exceptúan las correspondientes a las cuencas del Norte.

En relación con las reservas de los acuíferos, el ITGE (1989) ha estimado que el volumen de agua subterránea almacenado en España, hasta los 200 m de profundidad, es del orden de 125.000 hm³. De estas reservas naturales subterráneas, aproximadamente 120.000 hm³ corresponden a la Península, 2.500 hm³ a Canarias y otros 2.500 hm³ a Baleares.

Otros trabajos, como el Inventario de MOPTMA-MINER-UPC (1993) estiman las reservas en unos 180.000 hm³ (sin incluir la cuenca del Segura ni los archipiélagos) con la distribución por cuencas que se muestra en la tabla 23.

Hay que destacar la incertidumbre asociada a la estimación de las reservas, pues no siempre existe acuerdo sobre su significado (consideración del estrato impermeable, accesibilidad técnica y económica, etc.), lo que se añade a las dificultades técnicas inherentes a su cuantificación. En cualquier caso, se trata de volúmenes muy importantes (del orden del triple del almacenamiento total disponible mediante presas), que pueden jugar un papel fundamental en situaciones de sequía.

En síntesis, los recursos en régimen natural de origen subterráneo, o recarga natural de los acuíferos, ascienden a un total superior a los 29 km³/año, de los que aproximadamente 27 son aportación subterránea a la escorrentía de los ríos, y los 2 restantes son transferencias subterráneas al mar o a otros territorios.

3.1.4.3. Variabilidad y diversidad hidrológica

En los epígrafes previos se han descrito los recursos hídricos en régimen natural y su composición relativa en escorrentía superficial directa y escorrentía subterránea. En esta descripción ya se señaló la gran irregularidad y

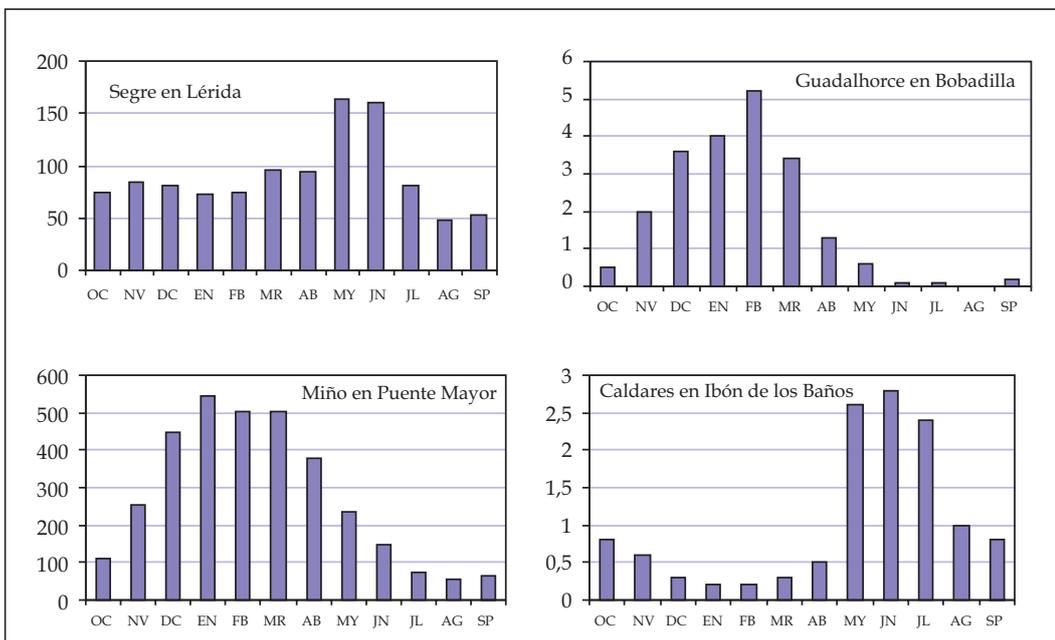


Figura 127. Caudales medios mensuales en ríos con distintos regímenes fluviales

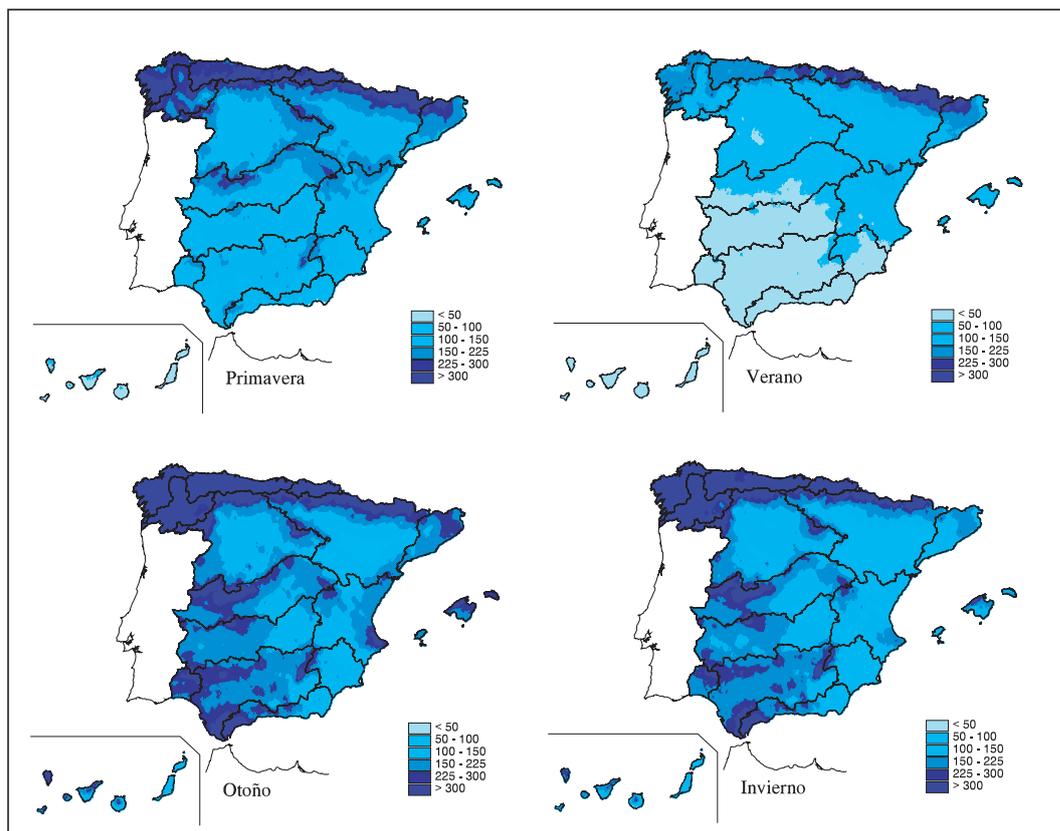


Figura 128. Distribución estacional de la precipitación (mm)

diversidad hidrológica del país, y puesto que éste es un rasgo muy significativo de nuestros recursos hídricos, le dedicaremos ahora alguna atención específica.

En efecto, la variabilidad hidrológica de España y la irregularidad de su régimen hídrico en el espacio y en el tiempo ha llegado a ser uno de los tópicos más insistentemente repetidos al hablar de los problemas del agua. Realmente, y como ya se ha mostrado, la variabilidad es uno de los aspectos más destacables de nuestra hidrología, de tal forma que, como veremos, la diferencia claramente de la de otros países de su entorno. Las razones para ello residen a su vez en la variabilidad del medio físico (clima, suelos, orografía, etc.), que se comentó en anteriores apartados.

Como se mostró, la precipitación es la variable que más influye en las fluctuaciones de las aportaciones de los ríos, pero hay otros factores, como los distintos tipos de suelos, la vegetación, la evapotranspiración y los acuíferos, que condicionan y controlan la respuesta de la cuenca frente a las entradas pluviométricas.

En función de las características del régimen de precipitaciones, pero también teniendo en cuenta otras características del clima, como, por ejemplo, las que originan la fusión de la nieve, se puede hablar de un régimen fluvial intraanual característico. En la figura 127 se muestran distintos ejemplos de caudales medios mensuales de ríos españoles (en m³/s) típicos de estos regímenes representativos (pluvio-nival del Segre en Lérida, plu-

vio-oceánico del Miño en Ponte Mayor, pluvio-mediterráneo del Guadalhorce en Bobadilla, y nival del Caldares en Ibón de los Baños).

En la figura 128 se muestra la variabilidad estacional de la precipitación, observándose que las estaciones del año con mayores valores de las precipitaciones son las de otoño e invierno y que en los meses de verano la precipitación total en una gran parte de la mitad meridional de España no alcanza siquiera los 50 mm. Un hecho que acentúa aún más esta variabilidad temporal de la lluvia es que los valores de precipitación medios que se observan en algunas cuencas se producen en apenas unos días (ver capítulo sobre crecidas).

A continuación se muestra la variabilidad estacional de la evapotranspiración potencial, observándose cómo, contrariamente a lo que sucedía con las precipitaciones, las estaciones con mayor valor de la evapotranspiración potencial son las de primavera y verano. Hay que tener sin embargo en cuenta, como ya se ha visto en apartados anteriores, que este es un valor potencial sujeto a la disponibilidad de agua en el suelo (fig. 129).

Finalmente, en la figura 130 se muestra la distribución estacional de la escorrentía, producto de los regímenes de precipitaciones y evapotranspiraciones y de la modulación que el suelo y los acuíferos suponen. Las reducidas lluvias y las elevadas evapotranspiraciones potenciales de los meses de primavera y verano determinan el que en una gran parte del territorio no se

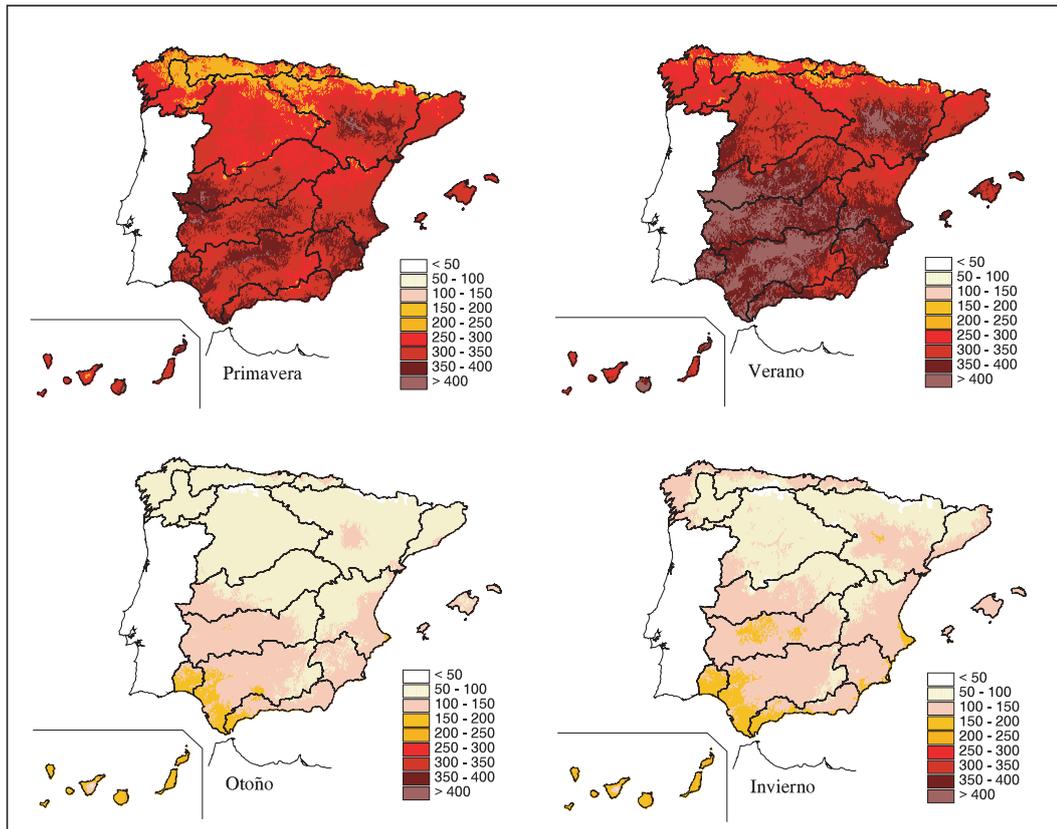


Figura 129.
Distribución
estacional de la
evapotranspiración
potencial (mm)

genere escorrentía en esos meses. El agua que por tanto circula por los ríos en esa época es la que procede de la descarga de los acuíferos y cuando éstos no existen la escorrentía es prácticamente nula. Con carácter general se puede decir que el agua que marca la abundancia hídrica de un determinado año en muchas regiones de España es la que precipita en otoño e invierno.

Puede alcanzarse una mejor comprensión de la relación entre la variabilidad temporal en precipitaciones, las características de la cuenca, y sus consecuencias en la variabilidad temporal en la escorrentía, al analizar la evolución de caudales en ciertas estaciones de aforo concretas.

Como ejemplo ilustrativo, en la figura 131 se refleja la evolución de caudales mensuales (en m³/s) en dos estaciones de aforo de la cuenca del Guadiana - río Guadiana en Torreblanca y río Zújar en Castuera - durante los 4 años hidrológicos 1946/47 a 1949/50, en los que se puede admitir un régimen poco afectado, prácticamente igual al natural.

Con una distribución de precipitaciones muy similar en ambas cuencas, se observa cómo en la primera estación, a la que drena la cuenca que comprende los acuíferos de la cabecera del Guadiana, disminuye pero no llega a agotarse el caudal circulante en los meses de estiaje. Por el contrario, en el río Zújar en Castuera, que drena una cuenca donde no hay acuíferos signifi-

cativos, el caudal base es inapreciable y en los meses de estiaje el río queda prácticamente seco.

Todas estos ejemplos abundan en mostrar cómo la diversidad y variabilidad de los factores que controlan la respuesta hidrológica hacen que se den situaciones extraordinariamente diversas, con regímenes hidrológicos muy distintos incluso en áreas relativamente próximas.

3.1.4.4. Comparación con el contexto europeo

Una vez descritos los recursos hídricos del país, sus fracciones superficial y subterránea, y mostradas sus magnitudes fundamentales y su variabilidad, resulta de interés preguntarse cuál es la situación respecto a los países de nuestro entorno inmediato.

En primer lugar cabe indicar que los flujos y reservas de agua en la Unión Europea (UE) suponen porcentualmente una muy pequeña cantidad de las existentes en la Tierra. La escorrentía que se genera internamente en la UE es de unos 1.200 km³/año, lo que representa un 3% de la de todo el planeta, tal y como muestra la tabla 24, de elaboración propia a partir de datos de EEA (1995).

En las costas más occidentales y en las cadenas montañosas de Europa, masas de aire extremadamente húmedas dan lugar a fuertes lluvias. En estos lugares, la precipitación anual se encuentra entre los 1.000 y

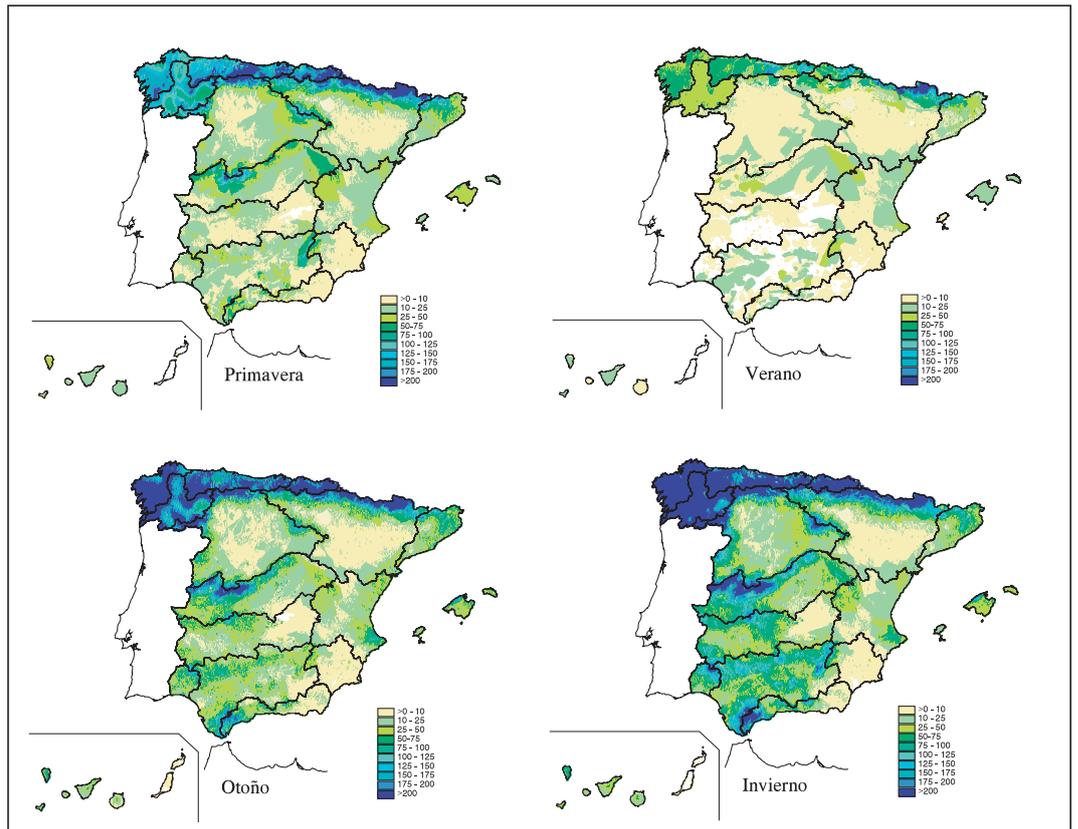


Figura 130. Distribución estacional de la escorrentía (mm)

2.000 mm, con áreas localizadas donde se pueden alcanzar mayores valores.

Aunque son comunes valores de precipitación anual entre 300 y 500 mm en el Sudeste de las penínsulas mediterráneas, en realidad no son exclusivos de estas zonas y pueden encontrarse valores por debajo de 500

mm en Suecia, Finlandia, Países Bálticos, Polonia y llanura central del Danubio.

La distribución anual de la precipitación media, evapotranspiración potencial según Penman, y escorrentía total en los países de la UE, se representa en las figuras 132, 133 y 134, de elaboración propia a partir de infor-

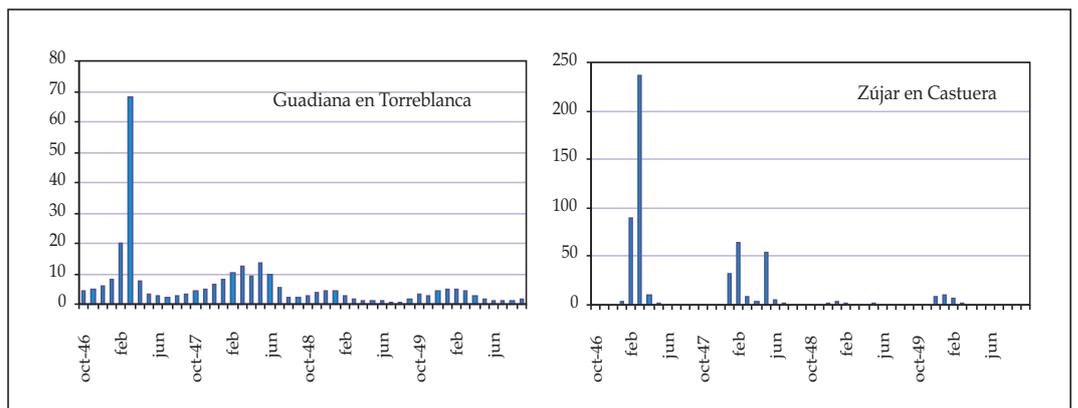
Tabla 24. Flujos hídricos medios anuales en la Tierra, Europa y España

Flujos medios anuales (fase terrestre)	Tierra	UE	España
Precipitación (km ³)	110.000	2.600	346
Evapotranspiración (km ³)	70.000	1.400	235
Aportación generada internamente (km ³)	40.000	1.200	111

mación de Eurostat. La última de estas figuras muestra la escorrentía de origen interno en cada país, es decir, la

generada exclusivamente en su territorio, sin tener en cuenta las aportaciones provenientes de países vecinos.

Figura 131. Caudales mensuales (m³/s) del Guadiana en Torreblanca y del Zújar en Castuera en el periodo 1946/47 a 1949/50



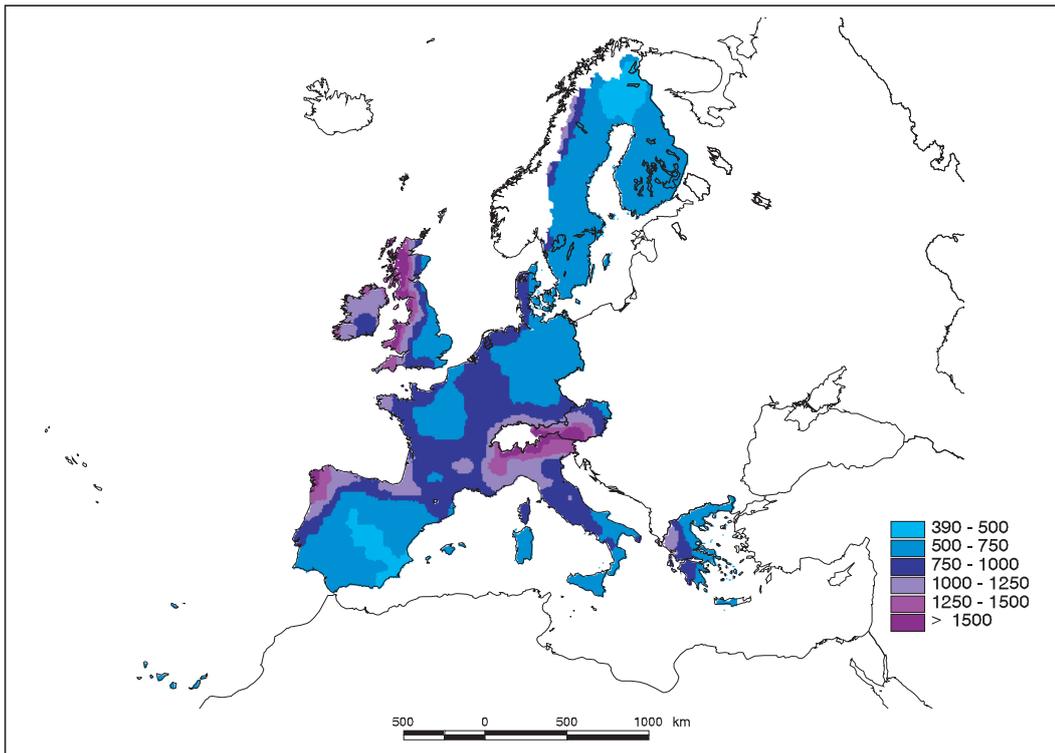


Figura 132. Mapa de precipitación media anual en la Unión Europea (mm)

Calculando el índice de humedad (cociente entre precipitación y evapotranspiración potencial según Penman) para los países de la UE (ver figura 135) se observa que la mayor parte del territorio español, así como el Sudeste de Italia y de Grecia, se encuentran en un rango de valores situado entre 0,2 y 0,5, propio de zonas semiáridas.

Los valores areales medios anuales de precipitación, evapotranspiración potencial y escorrentía generada internamente absoluta y per cápita se muestran, para cada país de la UE (excepto Luxemburgo, del que no se poseen datos), en la tabla 25 de elaboración propia a partir de información de Eurostat.

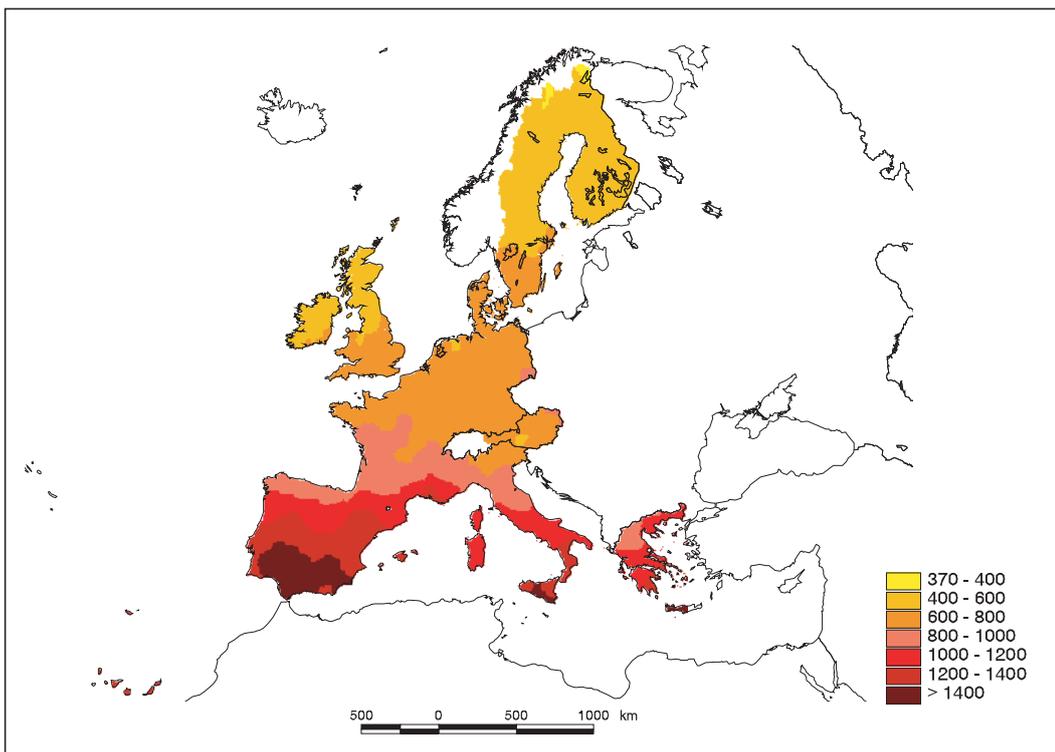


Figura 133. Mapa de evapotranspiración potencial media anual en la Unión Europea (mm)

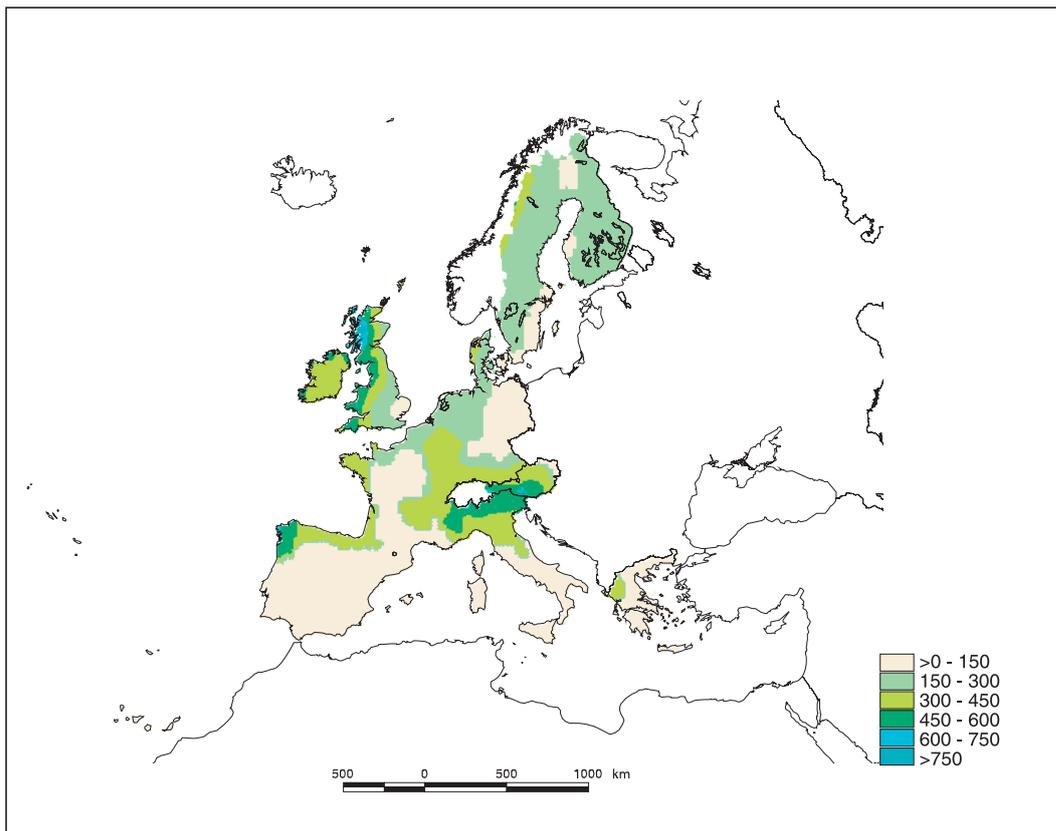


Figura 134. Mapa de escorrentía media anual en la Unión Europea (mm)

Como puede apreciarse, España presenta una precipitación que equivale al 85% de la precipitación media en la Unión, y una evapotranspiración potencial que es de las más altas del continente, lo que da lugar a uno de los valores de escorrentía más bajos de todos los países considerados (aproximadamente el 60% de la media europea). Si se analizan las aportaciones per cápita generadas internamente en cada país, España presenta un valor de unos 2.800 m³/hab/año, lo que

supone un 90% del valor medio para la Unión Europea, muy superior al de países de mayor densidad de población, como Alemania, Bélgica, Dinamarca y Países Bajos, y semejante a los valores de Italia, Francia y Reino Unido.

Estas cifras, sin embargo, pueden resultar engañosas. Las transferencias de agua que reciben muchos de los países en Europa suponen un porcentaje muy alto de sus recursos totales. De hecho, países como Holanda,

Estado de la UE	Superficie	Población	Precipitación		Evapotranspiración potencial		Escorrentía generada internamente		
	(km ²)	(mil hab)	mm	km ³	mm	km ³	mm	km ³	m ³ /hab/año
Alemania	356.954	82.400	768	274	493	176	266	95	1.153
Austria	83.850	7.968	1.169	98	477	40	656	55	6.903
Bélgica	30.518	10.141	885	27	459	14	393	12	1.183
Dinamarca	43.092	5.225	673	29	441	19	139	6	1.148
España	506.470	39.238	684	346	862	437	220	111	2.829
Finlandia	338.130	5.115	657	222	337	114	316	107	20.919
Francia	543.965	58.251	809	440	601	327	313	170	2.918
Grecia	131.957	10.480	849	112	765	101	356	47	4.485
Irlanda	70.285	3.575	1.152	81	398	28	697	49	13.706
Italia	301.277	56.126	982	296	704	212	554	167	2.975
Países Bajos	41.863	15.534	717	30	454	19	263	11	708
Portugal	92.389	9.915	877	81	898	83	444	41	4.135
Reino Unido	244.410	58.204	1.080	264	413	101	593	145	2.491
Suecia	449.960	8.852	700	315	367	165	380	171	19.318
UE	3.235.120	371.024	808	2.615	568	1.836	367	1.187	3.199

Tabla 25. Valores areales medios anuales de precipitación, evapotranspiración potencial y escorrentía total generada internamente en la UE

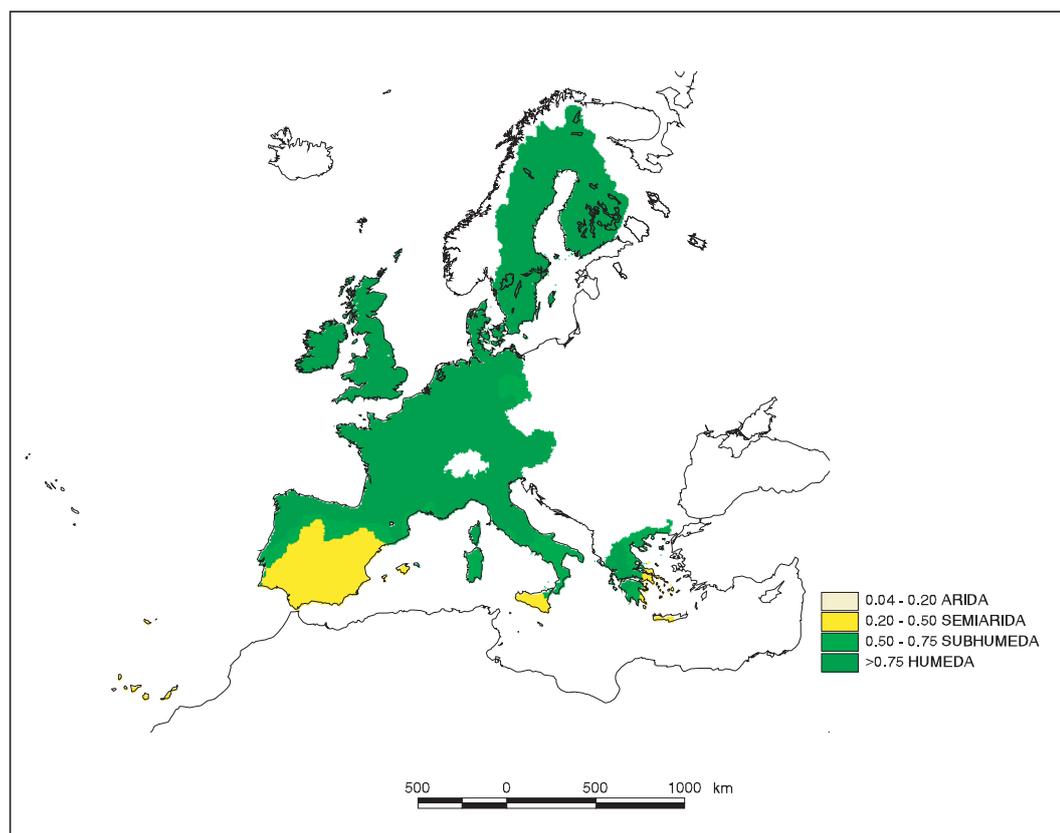


Figura 135. Mapa del índice de humedad en la Unión Europea

Luxemburgo o Alemania reciben entre el 40% y el 90% de sus recursos de otros países vecinos, de tal forma que si no se consideraran estas transferencias, su demanda superaría los recursos hídricos de origen interno. Un caso elocuente es el de España y Portugal. Los recursos totales per cápita en España son menores del 50% de los de Portugal, que recibe un 38% de su agua de España.

Teniendo en cuenta las transferencias de agua procedentes de otros países, en la tabla adjunta -de elabora-

ción propia a partir de datos de EEA (1998)- se muestran los recursos totales anuales per cápita de los países de la UE, diferenciándose los recursos hídricos generados en cada país (origen interno) y las transferencias de países vecinos (origen externo) (tabla 26).

En cuanto al grado de utilización de recursos superficiales y subterráneos, éste varía grandemente de unos países a otros, desde extremos singulares como Dinamarca, donde prácticamente el 100% de los

Estado de la UE	Superficie (km ²)	Población (1995) (mil. hab.)	Escorrentía generada int..		Transferencias de otros países		Escorrentía total		
			mm	km ³	mm	km ³	mm	km ³	m ³ /hab/año
Alemania	356.954	82.400	266	95	193	69	459	164	1.990
Austria	83.850	7.968	656	55	346	29	1002	84	10.542
Bélgica	30.518	10.141	393	12	131	4	524	16	1.578
Dinamarca	43.092	5.225	139	6	0	0	139	6	1.148
España	506.470	39.238	220	111	0	0	220	111	2.829
Finlandia	338.130	5.115	316	107	9	3	325	110	21.505
Francia	543.965	58.251	313	170	33	18	346	188	3.227
Grecia	131.957	10.480	356	47	99	13	455	60	5.725
Irlanda	70.285	3.575	697	49	43	3	740	52	14.545
Italia	301.277	56.126	554	167	27	8	581	175	3.118
Países Bajos	41.863	15.534	263	11	1911	80	2174	91	5.858
Portugal	92.389	9.915	444	41	271	25	714	66	6.657
Reino Unido	244.410	58.204	593	145	0	0	593	145	2.491
Suecia	449.960	8.852	380	171	7	3	387	174	19.657
UE	3.235.120	371.024	367	1.187			367	1.187	3.199

Tabla 26. Valores medios anuales de escorrentía interna, transferencias externas, y recursos totales y per cápita en distintos países de la UE

recursos proviene de extracciones subterráneas, hasta Holanda, Bélgica o Finlandia, donde el aprovechamiento de aguas subterráneas significa menos de un 10% del total. En España el porcentaje de uso de las aguas subterráneas es inferior al 20 % (ver figura 136, de elaboración propia a partir de datos de EEA 1995).

3.1.5. Recursos disponibles

3.1.5.1. Introducción. Conceptos previos

Cuanto se ha dicho hasta ahora se ha referido a los recursos en régimen natural, es decir, desde un punto de vista hidrológico, y no funcional. Procede ahora estudiarlos desde una nueva perspectiva, considerando las condiciones que los configuran como una oferta que puede servir para atender una demanda de agua y las limitaciones para su utilización, pues, como es lógico, no todo el recurso natural puede -ni debe- realizar tal función. Para la introducción de esta nueva perspectiva y la mejor comprensión del sistema de utilización es necesario introducir algunos importantes conceptos previos (v., p.e., Erhard-Cassegrain y Margat, 1983).

Así, debe notarse que algunas de las limitaciones o restricciones que configuran los recursos naturales como una oferta inserta en el sistema de usos son externas al propio sistema de utilización del agua y tienen un carácter previo y superior, por lo que limitan la potencialidad real de utilización del agua. En este sentido cabe hablar de un recurso potencial, que podría definirse como la parte del recurso natural que

constituye un potencial de oferta una vez que se han tenido en cuenta dichas restricciones exteriores. Estas restricciones pueden ser de carácter ambiental, socio-económico o geopolítico.

1. Las restricciones de carácter ambiental tienen como objetivo la protección, en determinados territorios y periodos de tiempo, de las funciones naturales del agua (ecosistemas acuáticos, fundamentalmente) mediante la preservación de flujos, de velocidades, de niveles, de volúmenes, o de sus características físico-químicas. Ante la ausencia de conocimientos y estudios detallados que cubran todo el territorio nacional, una forma simplificada de abordar esta restricción consiste en reservar cautelarmente una determinada fracción del recurso natural que no se incorpora al sistema de explotación, quedando así preservada de una posible utilización económico-productiva y continuando su función natural. Esta fundamental cuestión se volverá a tratar en el capítulo relativo al sistema de utilización actual del agua, pero debe retenerse ya el enfoque conceptual que se propone dar al problema de los llamados caudales ecológicos: no un uso más de los contemplados en el sistema de utilización, sino una restricción externa y previa que opera sobre los recursos naturales para configurar el recurso potencial, o, dicho de otra forma, un supuesto previo a la gestión del dominio público hidráulico.

Es importante comprender que solo cabe hablar de oferta o disponibilidad de recursos tras haber satisfecho -entre otras- estas restricciones ambientales, y sólo en la medida en que la utilización del agua no

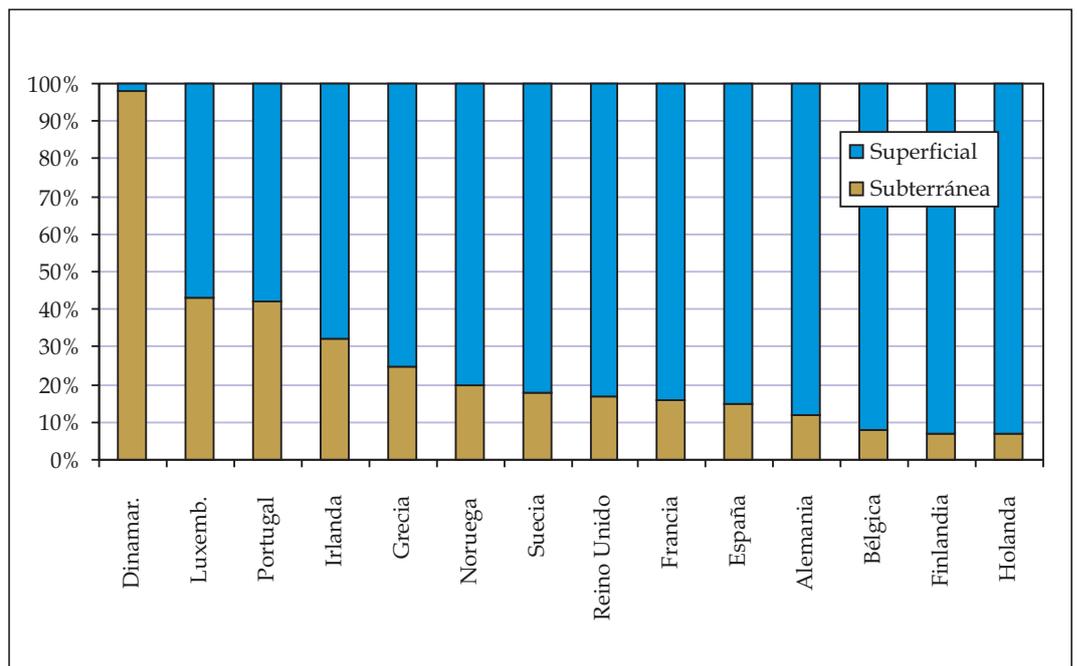


Figura 136. Porcentajes de utilización de recursos superficiales y subterráneos en distintos países de la UE

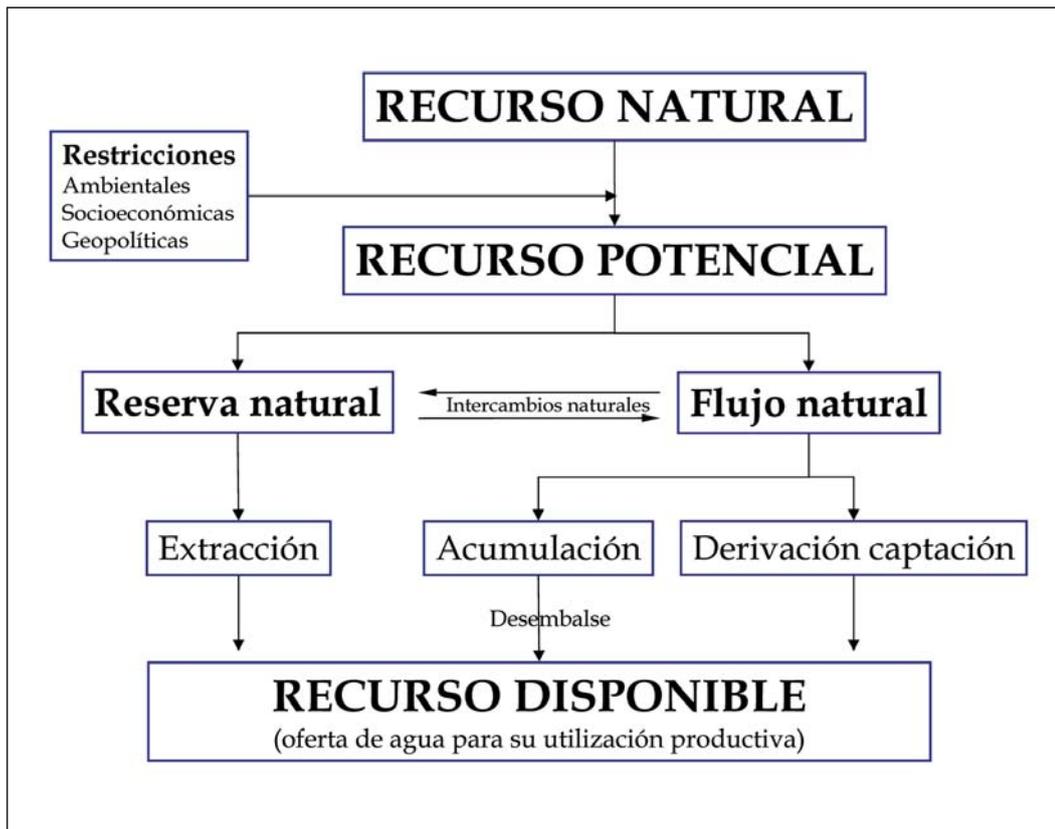


Figura 137. Esquema conceptual de movilización de recursos naturales y su transformación en recursos disponibles

distorsione sensiblemente su función ambiental (biológica, climática, ...) podrá aceptarse su carácter de bien económico-productivo al servicio del bienestar y el desarrollo.

2. Las restricciones de carácter social o socioeconómico pueden proceder de servidumbres derivadas de actividades consideradas prioritarias y que resultan incompatibles con la utilización del recurso, como consecuencia, por ejemplo, de determinadas opciones de ordenación territorial. Este sería el caso de aquellos equipamientos que, aun siendo técnica y económicamente factibles, pueden entrar en conflicto con determinados criterios de ocupación del suelo.
3. Finalmente, las restricciones de carácter geopolítico suelen referirse al caso de ríos internacionales. Desde el punto de vista del país situado aguas arriba pueden existir determinados compromisos de mantenimiento de ciertos caudales en la frontera que reducen su recurso potencial al no poder utilizar dichos caudales. En el caso del país situado aguas abajo, sus recursos potenciales podrían disminuir, hasta el umbral establecido, a medida que aumentase la utilización del agua en el país situado aguas arriba.

Además de estas restricciones exteriores que determinan el recurso potencial, existen otras restricciones de carácter técnico que pueden limitar el aprovechamiento

de las aguas del medio natural. En este sentido cabe hablar de unos recursos realmente disponibles para su utilización productiva como consecuencia del conjunto de restricciones técnicas que limitan el posible aprovechamiento del recurso natural o potencial. La cuantía de estos recursos disponibles depende, fundamentalmente, de las características del recurso natural y del nivel tecnológico del sistema de utilización. Así, por ejemplo, los recursos de agua subterránea de un acuífero pueden ser potencialmente aprovechables, pero estarán realmente disponibles en función de la tecnología de perforación y bombeo existente en cada momento.

El concepto de recurso disponible está pues ligado a las posibilidades de movilización de los recursos naturales o potenciales, y de ahí que algunos autores se refieran al recurso disponible como movilizable. En este sentido, movilizar el agua para que se encuentre en disposición de ser usada, consiste en, partiendo del medio natural, ponerla en circulación en la estructura técnica del sistema de utilización.

En la práctica, la movilización y consiguiente disponibilidad de los recursos puede obtenerse mediante diversos procedimientos:

- Captación directa de una parte del caudal regulado de forma natural: toma directa de un río o captación de agua subterránea.

- Transformación de una parte del caudal natural más o menos irregular en una reserva para su utilización posterior: regulación de un río por medio de un embalse o recarga artificial de un acuífero.
- Obtención de un caudal a partir de una reserva natural preexistente: aprovechamiento del agua de un lago o extracción de las reservas de agua subterránea, renovables o no.
- Transformación en caudal movilizable de un flujo no aprovechable directamente: reducción de la evaporación.

Estas ideas se esquematizan gráficamente en la figura 137.

Un aspecto que incide de manera muy importante en la disponibilidad de recursos es la gestión del sistema de explotación, es decir, el conjunto de normas y reglas de actuación sobre los elementos naturales y las obras e instalaciones de infraestructura hidráulica que transforman el régimen de los recursos naturales para adaptarlos a la satisfacción de las demandas o para evitar riesgos naturales. Una gestión deficiente del sistema puede reducir apreciablemente la disponibilidad de recursos, mientras que, por el contrario, una adecuada gestión puede incrementarla.

Desde el punto de vista cualitativo, los recursos disponibles dependen de las posibilidades técnicas de tratar las aguas y corregir, en caso de que sea necesario, las características que no se adapten al uso al que se pretenden destinar. Sobre esta cuestión, y sobre las limitaciones que pueden derivarse de las condiciones de calidad del agua, se volverá a insistir posteriormente con detalle.

Otro aspecto que condiciona de manera muy importante la disponibilidad de recursos es su fiabilidad, es decir, la garantía con la que se dispone de ellos. Contar con altos niveles de garantía o seguridad en el suministro supone disponer de menores recursos, mientras que una menor exigencia de garantía permitiría contar con una mayor disponibilidad. En este sentido, para una correcta valoración de la disponibilidad es fundamental especificar el nivel de garantía correspondiente a los recursos que se estiman disponibles.

A la escala de los sistemas de explotación es importante también contar con las posibilidades de emplear el agua procedente de los retornos de suministros previos que se restituyen al medio natural. Estos retornos representan la posibilidad de removilizar parte de los recursos y constituyen un potencial de oferta secundario que debe añadirse al resto de los recursos disponibles procedentes de una sola utilización o movilización. Esta cuestión adquiere especial relevancia en nuestro país, donde el regadío, que da lugar al retorno

de importantes volúmenes, constituye, con diferencia, la mayor demanda.

Como ya se ha señalado, el nivel de las tecnologías existentes en cada momento también influye en la cuantía de los recursos disponibles. En este sentido, es frecuente distinguir entre recursos convencionales, obtenidos mediante la ejecución de técnicas de movilización clásicas y suficientemente probadas, y recursos no convencionales, obtenidos mediante el desarrollo de técnicas nuevas, a menudo de carácter experimental o que se llevan a cabo de forma excepcional. Suelen considerarse tradicionalmente como recursos no convencionales los procedentes de la desalación de aguas marinas y salobres, la reutilización directa de aguas residuales y la modificación de las condiciones climáticas, entre otros.

Sin embargo, el grado de convencionalidad de los recursos, al estar asociado al nivel tecnológico, constituye un concepto dinámico que evoluciona en el tiempo. Así, en el momento actual algunas de estas técnicas, como la desalación o la reutilización, podrían sin duda considerarse como convencionales en la práctica.

En este punto conviene hacer constar que, a diferencia del recurso natural, sobre cuyo significado técnico hay un acuerdo relativamente generalizado, el concepto de recurso disponible ha sido tradicionalmente objeto de interpretaciones muy diferentes. Ello resulta perfectamente explicable teniendo en cuenta los muy distintos factores que lo configuran y de los que depende, y que algunos -como las reglas de gestión- no suelen estar definidos de modo explícito ni son de fácil formulación en sistemas hidráulicos complejos.

Una prueba de estas diferencias son las distintas estimaciones que han venido realizándose en los últimos años en España (donde se les llama en ocasiones recursos regulados o garantizados). En la tabla 27 se presentan algunas de las más importantes de estas estimaciones (expresadas en $\text{hm}^3/\text{año}$), incluyendo las realizadas en los Planes Hidrológicos de cuenca. En este caso es necesario realizar una interpretación prudente de los resultados relativos, pues no en todos los Planes se utiliza el mismo concepto de recurso disponible, ni se han seguido los mismos criterios y procedimientos para su obtención. En consecuencia, y pese a que se ofrecen en una tabla común, las cifras correspondientes a los diversos Planes no son directamente comparables entre sí.

Algo similar sucede si se pretende comparar unas estimaciones con otras, pues en general se han empleado criterios diferentes en cuanto a modulación de demandas, evaluación de volúmenes regulados en embalses, utilización de aguas subterráneas,

consideración de caudales ambientales y retornos, garantías de suministro, consideración de todo el ámbito o solo de algunos ríos principales, inclusión o no de las aguas trasvasadas, gestión conjunta o unitaria de los embalses, etc.

En la tabla puede apreciarse la disparidad de los resultados obtenidos. Descontando la estimación realizada en 1967, que corresponde a una situación muy diferente de la actual (p.e. en cuanto a embalses), el resto de las estimaciones proporcionan unos recursos disponibles que varían entre el 38 y el 47% de los recursos naturales. Sin embargo, en el ámbito de algunos Planes concretos estas diferencias son muy acusadas, como consecuencia de la diversidad de criterios ya mencionada.

Todo ello pone de manifiesto la necesidad de unificar conceptos y criterios con objeto de obtener resultados

que permitan realizar análisis de tipo comparativo, que ayuden a determinar la evolución temporal de las disponibilidades, y que faciliten una evaluación de la eficacia de las diversas medidas destinadas a mejorar la disponibilidad de recursos.

3.1.5.2. Caudales fluyentes y regulación natural

De acuerdo con el régimen de variación en el tiempo de los flujos de agua, y desde la perspectiva de sus posibilidades de uso, es frecuente considerar los recursos subdivididos en dos grandes categorías:

- Permanentes, o casi permanentes, regulados de forma natural.
- Variables, según diversos grados de irregularidad.

	1967 (a)	1980 (b)	1980 (c)	1990 (d)	1991 (e)	1993 (f)	1998 (g)
Galicia Costa					1.302	1.302	
Norte I				1.100		5.515	691
Norte II				1.807		1.518	587
Norte III				943		493	468
Norte	8.525	10.123	7.448		4.967	8.828	
Duero	6.405	7.713	9.111	9.465	9.269	7.797	10.229
Tajo	4.356	6.496	8.343	6.281	6.233	6.233	5.063
Guadiana I				2.610		2.592	2.591
Guadiana II				407		371	345
Guadiana	2.252	1.428	2.462	3.017	2.385	2.963	2.936
Guadalquivir	3.564	2.965	2.810	4.780	3.255	3.416	3.451
Sur	538	717	785	533	861	1.109	1.007
Segura	665	675	1.317	1.742	700	1.125	1.500
Júcar	1.850	2.665	3.104	2.003	2.564	3.052	3.437
Ebro	8.502	11.164	14.133	9.289	9.337	10.727	9.898
C.I. Cataluña	697	1.139	1.656		1.358	1.358	1.587
Total Península	37.354	45.085	51.169		40.929	46.608	
Baleares	-	224	313		312	312	300
Canarias	-	496	496		496	420	417
Total España		45.805	51.978		41.737	47.340	

Tabla 27. Distintas estimaciones de los recursos hídricos disponibles en España

(a) Recursos Hidráulicos. II Plan de Desarrollo Económico y Social. Presidencia del Gobierno, PG (1967)

(b) El agua en España. MOPU-DGOH-CEH (1980)

(c) Planificación Hidrológica Nacional. (Avance 80). Comisión Interministerial de Planificación Hidrológica. MOPU-CIPH (1980). Incluye retornos, evaluados en 6007 hm³/año para todo el territorio nacional.

(d) Plan Hidrológico. Síntesis de la Documentación Básica. MOPU-DGOH (1990). Estas cifras se presentan bajo la denominación recursos garantizados y se refieren solo a las cuencas intercomunitarias.

(e) El agua en España. Instituto de la Ingeniería de España IIE-ITGE-UNESA. (1991). Incluye los recursos regulados por los embalses y los procedentes de una explotación equilibrada de los acuíferos en una primera aproximación. No se incluyen retornos o recursos importados de otras cuencas. Basado principalmente en la Documentación Básica de los Planes Hidrológicos.

(f) Memoria del PHN. MOPT (1993). Incluye los acuíferos sobreexplotados: Guadiana I (280 hm³/año), Guadalquivir (25 hm³/año), Sur (60 hm³/año), Segura (325 hm³/año), Júcar (125 hm³/año), C.I. Cataluña (50 hm³/año), Baleares (30 hm³/año) y Canarias (160 hm³/año). Total 1055 hm³/año. No incluye retornos (8.000 hm³/año), ni reutilización y desalación (115 hm³/año)

(g) Planes Hidrológicos de cuenca (1998). La cifra del Norte solo incluye la regulación conseguida en los embalses destinados exclusivamente a atender demandas consuntivas. Las cifras del Tajo y el Ebro corresponden a la demanda interna satisfecha, inferior al recurso disponible. El Tajo incluye lo que denomina demanda ambiental y el Ebro incluye 3150 hm³/año de caudal mínimo medioambiental en la desembocadura. Se incluyen las transferencias máximas previstas al Sur (10 hm³/año), Segura (540 hm³/año) y Cataluña (100 hm³/año). La cifra del Júcar incluye reutilización, transferencias y retornos.

El concepto de recurso permanente, o regulado en régimen natural, está estrechamente relacionado con el caudal de base de los ríos que, en nuestro país, depende fundamentalmente de las ya estudiadas aportaciones subterráneas debidas al drenaje de los acuíferos y, en menor medida, del deshielo.

Es habitual interpretar estos recursos regulados de forma natural como aquéllos que, en situación de libre apropiación y de ausencia de infraestructuras de almacenamiento, podrían ser utilizados para la satisfacción de las demandas, es decir, el agua que podría ser utilizada en forma fluyente. Era éste el valor que se buscaba cuando, desde el siglo XVIII, comienzan a realizarse mediciones puntuales y esporádicas del caudal de los ríos con vistas a determinar sus posibilidades de aprovechamiento. Puesto que en los países hidráulicamente maduros -como el nuestro- ya existen numerosas obras de regulación superficial y captaciones subterráneas, los recursos regulados de forma natural no son más que un concepto teórico, pero que resulta útil fundamentalmente a efectos comparativos, y como descriptor de la irregularidad hídrica.

Para su estimación es preciso definir previamente la variación estacional de las demandas que podrían ser atendidas con estos caudales fluyentes y las garantías exigidas a su suministro. Tradicionalmente se han considerado dos tipos de modulación de la demanda: uno con distribución uniforme a lo largo del año, asimilable a la situación habitual de las demandas de abastecimiento a poblaciones estables, y otro variable, con el máximo en los meses de verano, asimilable a las demandas de riego.

En estudios anteriores (MOPU, 1980) se estimó la regulación natural en la Península en 9.190 hm³/año para demandas uniformes y en 4.445 hm³/año para demandas variables de riego. Esta estimación se realizó a partir de los datos del pionero Inventario de Recursos Hidráulicos (CEH, 1971), considerando embalses con capacidad nula en las desembocaduras de los ríos importantes o en la frontera portuguesa. Quedaban así excluidos algunos ríos de menor importancia en el contexto general y las intercuencas costeras. Las cifras indicadas corresponden a un nivel de garantía del 96%, definida eliminando el 4% de los años de menor aportación y calculando las demandas que podrían atenderse sin fallos con la serie de años restante.

Para la elaboración de este Libro se ha procedido a una nueva evaluación de los recursos regulados de forma

natural. Para ello se ha utilizado la configuración del sistema de explotación actual, descrito en otros epígrafes de este Libro, y se han empleado dos grupos de series de aportaciones mensuales en régimen natural. El primero de ellos corresponde a las series empleadas por los Planes Hidrológicos de cuenca en los análisis de sus sistemas de explotación. Estas series cubren periodos de tiempo diferentes y en general no incluyen el último periodo de sequía. El segundo grupo está constituido por las series calculadas para la elaboración de este Libro, que cubren el periodo 1940/41-1995/96. Estas series se han obtenido mediante el modelo de simulación de aportaciones que ya ha sido descrito en epígrafes previos. Las series se han generado en un conjunto de puntos de cálculo seleccionados (unos 350) que se muestran en un capítulo posterior.

Se han supuesto dos distribuciones de demanda: una uniforme con garantía 100% y otra variable con el criterio de garantía estándar de déficit anuales acumulados del 50, 75 y 100% de la demanda anual para 1, 2 y 10 años, respectivamente. Estos valores son los adoptados de forma estándar en este Libro, tal y como se comentará en relación con el modelo analítico.

La distribución mensual adoptada para caracterizar esta demanda variable media representativa -o demanda tipo- es la indicada en la tabla 28, cuyos valores se han obtenido como promedio de una extensión representativa de zonas de riego en España.

En el caso de demanda uniforme no se ha considerado ningún tipo de retorno, mientras que en el caso de la demanda variable se ha supuesto que se producen unos retornos del 20% de la demanda atendida. La razón para ello es que, con estos criterios, los resultados obtenidos para el caso de demanda uniforme con garantía del 100% (es decir, sin admitir fallo alguno con las series de aportaciones utilizadas) y sin retornos representan la máxima detracción que se podría realizar de los ríos de forma continua sin ninguna infraestructura de almacenamiento, no debiendo interpretarse esta cifra como un posible suministro para abastecimiento. Por su parte, los resultados relativos a demanda variable con déficit admisibles del 50, 75 y 100% y retornos del 20% se aproximan a las posibilidades reales de movilización de recursos superficiales para regadío si no se dispusiera de infraestructuras de almacenamiento, es decir, de forma fluyente. Es en este sentido teórico -como un sofisticado indicador de

OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	TOTAL
3	0	0	0	0	1	4	11	18	27	25	11	100

Tabla 28. Distribución porcentual mensual de la demanda variable tipo

comportamiento- como han de interpretarse tales evaluaciones, y no en el de disponer de una cuantificación de disponibilidades hídricas.

El volumen regulado se ha estimado con ayuda de un modelo matemático de gestión de recursos con ciclo de optimización anual. Se han estudiado un total de unos 500 puntos de demanda, distribuidos por la red hidrográfica del territorio peninsular. En cada tramo de río se ha definido una demanda de agua que toma del extremo de aguas arriba del tramo y retorna al extremo de aguas abajo. Con objeto de representar la situación de libre apropiación en la asignación de recursos, las demandas se ordenan desde aguas arriba hasta aguas abajo por niveles homogéneos. Se ha asignado una prioridad máxima a las demandas de los tramos situados en las cabeceras de los ríos. A los tramos situados inmediatamente aguas abajo de éstos se les ha asignado el siguiente nivel de prioridad, y así sucesivamente hasta la frontera con Portugal o hasta la desembocadura del río en el mar.

El recurso regulado en cada punto se ha calculado mediante un algoritmo iterativo de bipartición que comprueba al final de cada ejecución del modelo el cumplimiento del criterio de garantía establecido para cada demanda y aumenta o disminuye el valor estimado de la demanda en consecuencia. El valor de modificación se reduce a la mitad en cada iteración, por lo que, al final del proceso se obtiene una estimación de la demanda regulada con una precisión conocida. En cada punto se ha supuesto inicialmente un valor de demanda igual a la aportación media en régimen natural en dicho punto y se ha trabajado con una precisión del 1 por 1.000 del valor de dicha aportación. El valor inicial adoptado supone lógicamente un límite supe-

rior de la máxima demanda que se puede atender en ese punto. A partir del valor inicial se han acotado los valores de las demandas hasta que se cumple el criterio de garantía establecido.

Con objeto de reducir el número de ejecuciones del modelo de optimización, el algoritmo ajusta simultáneamente las demandas de un mismo nivel de prioridad. Según el criterio de ordenación de niveles de prioridad, procediendo de esta manera se garantiza que no hay conflictos en la asignación del recurso, ya que (si no hay bucles cerrados en la red hidrográfica) las demandas de un mismo nivel de prioridad no pueden compartir el mismo recurso.

Operativamente, se procede desde aguas arriba hacia aguas abajo por niveles homogéneos de prioridad, ajustando en una primera fase las demandas de máxima prioridad (más aguas arriba). Las demandas del siguiente nivel de prioridad se ajustan en una segunda fase, y así sucesivamente. En cada fase se supone que las demandas situadas aguas abajo de las del nivel de prioridad estudiado son nulas, para no interferir con la asignación de recursos. En las demandas situadas aguas arriba de las del nivel de prioridad estudiado se mantiene la estimación realizada en las fases previas.

De esta forma, los resultados obtenidos con las series de aportaciones empleadas en los análisis de los sistemas de explotación realizados en los Planes de cuenca son los que se muestran en la tabla 29 y figura 138. En la tabla se incluyen, como referencia, las cifras de aportación natural indicadas en los Planes y las aportaciones de cálculo empleadas en el análisis de los sistemas de explotación. Las diferencias son debidas a

Ámbito	Aportación natural total (hm ³ /año)	Aportación de cálculo (hm ³ /año)	Regulado con demanda uniforme (hm ³ /año)	Regulado con demanda uniforme (%)	Regulado con demanda variable (hm ³ /año)	Regulado con demanda variable (%)
Norte I	11.235	10.489	640	6	411	4
Norte II	13.000	10.950	546	5	708	6
Norte III	5.381	4.211	180	4	248	6
Duero	15.168	13.558	2.006	15	1.656	12
Tajo	12.230	12.230	644	5	505	4
Guadiana I	4.875	4.714	18	0	128	3
Guadiana II	1.293	825	0	0	0	0
Guadalquivir	7.978	8.021	192	2	233	3
Sur	2.483	1.076	15	1	41	4
Segura	1.000	857	299	35	226	26
Júcar	4.142	2.580	524	20	484	19
Ebro	18.217	18.217	2.661	15	2.638	14
C. I. Cataluña	2.780	1.544	282	18	284	18
Galicia Costa	12.642	8.137	591	7	619	8
Península	112.424	97.408	8.599	9	8.179	8

Tabla 29. Volúmenes regulados en régimen natural con las series de aportaciones empleadas en los Planes de cuenca

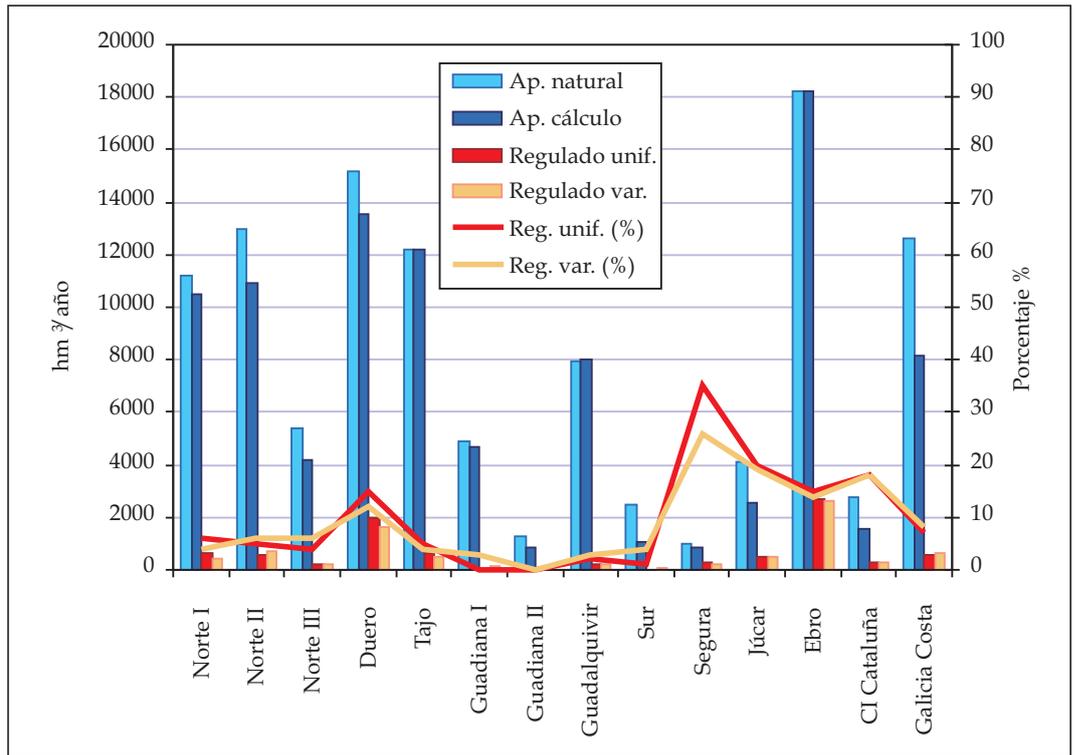


Figura 138. Volúmenes regulados en régimen natural por ámbitos de planificación. Series de los Planes Hidrológicos

discrepancias en el ámbito territorial analizado, más reducido que el de los Planes en algunos ámbitos, al excluir algunas pequeñas cuencas vertientes directamente al mar, o a actualizaciones de las series realizadas con posterioridad a la redacción de los Planes de cuenca. Los resultados se expresan tanto en valor absoluto como en porcentaje respecto a la aportación de cálculo empleada.

Los mismos resultados pero correspondientes a las series obtenidas en este Libro son los que se muestran en la tabla 30 y la figura 139.

Puede llamar la atención el hecho de que los resultados en régimen variable sean, en algunos casos, superiores a los del régimen constante. Ello se explica considerando los diferentes regímenes hidrológicos, la

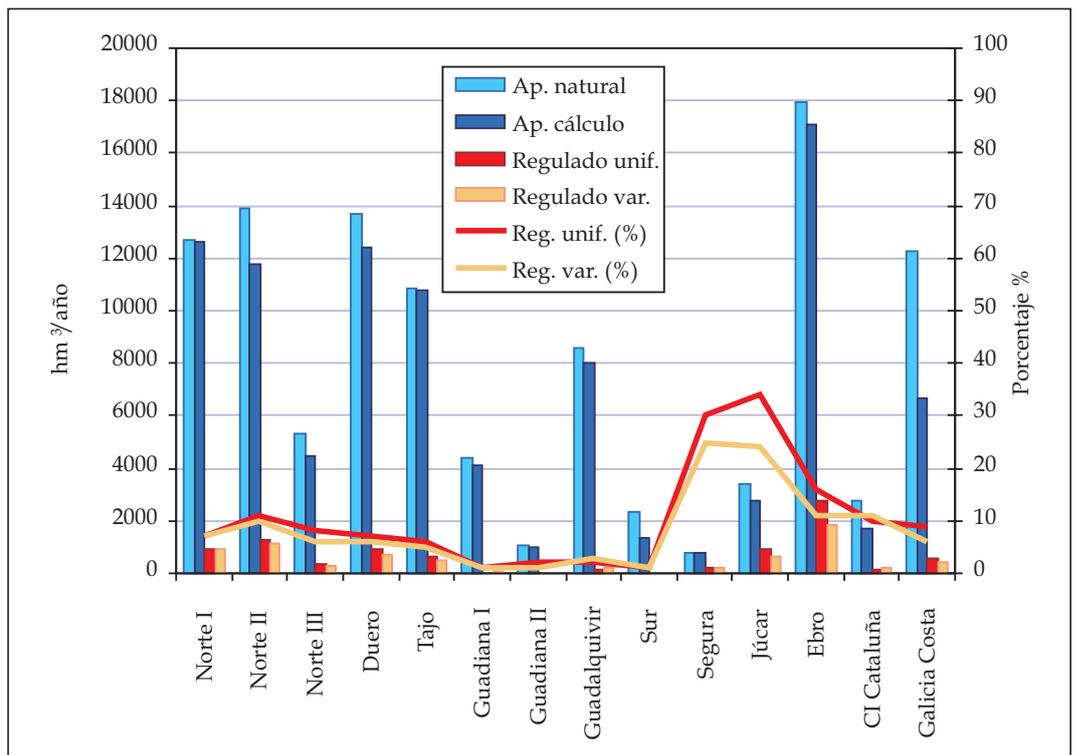


Figura 139. Volúmenes regulados en régimen natural por ámbitos de planificación. Series obtenidas en este Libro

Ámbito	Aportación natural total (hm ³ /año)	Aportación de cálculo (hm ³ /año)	Regulado con demanda uniforme (hm ³ /año)	Regulado con demanda uniforme (%)	Regulado con demanda variable (hm ³ /año)	Regulado con demanda variable (%)
Norte I	12.689	12.603	935	7	916	7
Norte II	13.881	11.799	1.263	11	1.146	10
Norte III	5.337	4.437	352	8	251	6
Duero	13.660	12.422	892	7	742	6
Tajo	10.883	10.782	605	6	490	5
Guadiana I	4.414	4.097	26	1	44	1
Guadiana II	1.061	998	15	2	7	1
Guadalquivir	8.601	7.988	132	2	208	3
Sur	2.351	1.379	16	1	18	1
Segura	803	757	225	30	192	25
Júcar	3.432	2.745	924	34	656	24
Ebro	17.967	17.089	2.795	16	1.827	11
C. I. Cataluña	2.787	1.722	177	10	190	11
Galicia Costa	12.250	6.633	569	9	426	6
Península	110.116	95.451	8.926	9	7.112	7

Tabla 30. Volúmenes regulados en régimen natural con las series obtenidas en este Libro

introducción de retornos, y la adopción de un criterio de garantía sensiblemente más laxo.

Estas cifras, que como puede verse son básicamente coincidentes en las dos hipótesis de aportaciones realizadas, sugieren distintas conclusiones de interés.

1. En primer lugar, se pone de manifiesto que sólo una pequeña fracción de los recursos naturales totales, del orden del 8 o el 9%, podría ser aprovechada en la satisfacción de las diferentes necesidades de agua si no se alterase artificialmente el régimen natural. Ello significa, grosso modo, que en la actualidad solo podría regarse en la península un máximo absoluto próximo al millón de hectáreas, lo que viene a ser la superficie existente a comienzos de siglo cuando, efectivamente, el régimen hidrológico de los ríos y acuíferos era sensiblemente igual al natural.
2. También puede constatarse la bondad de las estimaciones realizadas en los años ochenta. En efecto, la cifra de 9.190 hm³/año correspondiente a demanda uniforme obtenida entonces es similar a los 8.600-8.900 hm³/año resultantes de la nueva estimación. La menor disponibilidad obtenida ahora se debe, fundamentalmente, a la utilización de un nivel de garantía del 100%, más exigente que el utilizado en las determinaciones anteriores. En el caso de demanda variable la diferencia es más apreciable (4.445 frente a 7.200-8.200 hm³/año), pues se han utilizado criterios muy diferentes para su obtención. Por una parte, ahora ha sido contemplada la posibilidad de aprovechamiento de los retornos, estimados con carácter general en un 20% de los suministros. Además, ahora se ha utilizado un criterio de garantía diferente, limitando los déficit acumulados en 1, 2 y 10 años al 50,

75 y 100% de la demanda, respectivamente. Este criterio, en general menos exigente que el anterior, conduce a un mayor valor de los volúmenes disponibles para su aprovechamiento.

3. Los valores alcanzados con los dos grupos de series empleados son básicamente coincidentes, aunque se perciben algunas discrepancias, no muy significativas, en las cuencas del Júcar, Cataluña y Duero. Ello reafirma la validez general de las nuevas series como instrumento para la realización de análisis globales homogéneos.
4. Tal y como se comprobó al examinar los correlogramas de aportaciones y la fracción de origen subterráneo, las cuencas que disponen de una mayor regulación natural (del orden del 30% de la aportación total), debido a su importante componente subterránea, son el Segura y el Júcar, lo que históricamente propició el asentamiento de poblaciones y el desarrollo de extensos y antiguos regadíos tradicionales en sus vegas. Les sigue el Ebro con cuantías relativas del orden del 15%, aunque con volúmenes muy superiores en términos absolutos. En el otro extremo se sitúan las cuencas del Guadiana, Guadalquivir y Sur, que disponen de una menor fracción de sus aportaciones regulada de forma natural (inferior al 3%).

3.1.5.3. Las obras de regulación y los sistemas de explotación

Como ya se ha indicado, los recursos regulados de forma natural descritos en el epígrafe anterior son tan solo un concepto teórico, ciertamente útil a efectos comparativos y como descriptor de la variabilidad hídrica,

Plan Hidrológico	Número de sistemas de explotación
Norte I	6
Norte II	15
Norte III	7
Duero	4
Tajo	5
Guadiana I	4
Guadiana II	1
Guadalquivir	17
Sur	5
Segura	1
Júcar	9
Ebro	27
C. I. Cataluña	4
Galicia Costa	20
Total	125

Tabla 31. Número de sistemas de explotación por ámbitos de planificación hidrológica

pero alejado de la actual realidad de madurez hidráulica del país, en el que se dispone de numerosas obras de regulación superficial y captaciones subterráneas que alteran dicho régimen natural y permiten un aprovechamiento más regular y fiable de los recursos naturales.

A lo largo del tiempo, y a medida que se alcanzaba dicho nivel de madurez, el papel de las obras de regulación y las formas de abordar su estudio han evolucionado de modo importante. En su clásica obra *La regulación de los ríos*, Becerril (1959) definió la regulación como el mecanismo por el cual la técnica armoniza la irregularidad fluvial con la permanencia de la disponibilidad; se consigue por almacenamiento de las aguas en un embalse durante las épocas en que haya exceso de caudal y utilización de estas aguas acumuladas en aquellos periodos en que la demanda supera el caudal del río. Esta definición tradicional, que asocia la obra de regulación a la atención de una determinada demanda, se enmarca en etapas de desarrollo hidráulico caracterizadas por una relativa abundancia de recursos frente a la demanda, en las que los problemas hidráulicos de una cuenca se tratan de forma independiente y los aprovechamientos se desarrollan con carácter aislado. En estas condiciones, las obras de regulación se programan para cada utilización concreta que se plantea, sin interconexión alguna. Son las etapas que el II Plan de Desarrollo Económico y Social (1967) denominaba de aprovechamiento inconnexo o de oportunidad.

A medida que la utilización del agua aumenta, comienzan a producirse interdependencias entre los problemas hidráulicos de las distintas zonas de las cuencas, y adquiere mayor importancia la disponibilidad de recursos que la realización de aprovechamientos concretos. Se posibilita la satisfacción de las demandas con recursos procedentes de fuentes alternativas y se producen

interconexiones entre diferentes zonas. En esta etapa, denominada de aprovechamiento integral, los embalses se convierten en elementos de un sistema más amplio territorialmente y de mayor complejidad técnica, en el que la hipótesis de funcionamiento independiente de cada embalse no resulta adecuada.

Para hacer frente a esta nueva realidad surge la figura técnica del sistema de explotación de recursos, que en nuestro país ha adquirido incluso regulación normativa tras la promulgación del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica (RAPAPH). En este texto se define el concepto de sistema de explotación de recursos como el conjunto de elementos naturales, obras e instalaciones de infraestructura hidráulica, normas de utilización del agua derivadas de las características de las demandas y reglas de explotación que, aprovechando los recursos hidráulicos naturales, permiten establecer los suministros de agua que configuran la oferta de recursos disponibles del sistema de explotación.

Cada sistema de explotación de recursos ha de referirse a un horizonte temporal y su estudio debe permitir definir y caracterizar los recursos hidráulicos disponibles, de acuerdo con las normas de utilización del agua consideradas, determinar los elementos de la infraestructura precisa y las directrices fundamentales para su explotación, así como los recursos naturales no utilizados en el sistema y, en su caso, los procedentes de ámbitos territoriales externos.

Posteriormente, la Orden del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de 24 de setiembre de 1992, por la que se aprueban las instrucciones y recomendaciones técnicas complementarias para la elaboración de los Planes Hidrológicos de cuenca, detalló el papel que deben desempeñar los sistemas de explotación de recursos en la planificación hidrológica. Concretamente se

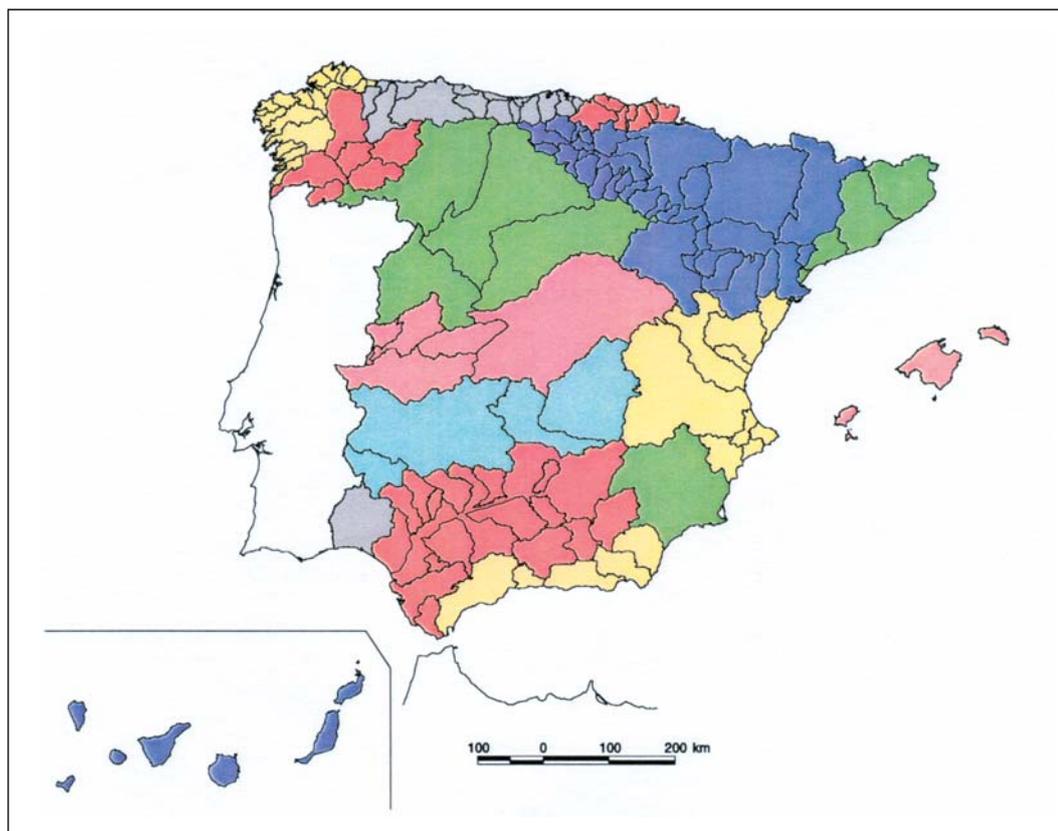


Figura 140. Mapa de sistemas de explotación básicos definidos en los Planes Hidrológicos de cuenca

especifica que la simulación de los sistemas de explotación de recursos debe tener en cuenta la explotación de los embalses y de los acuíferos, las relaciones río-acuífero, la modulación de las demandas, las garantías de suministro, los retornos, los resguardos en embalses para laminación de avenidas, las zonas húmedas y su régimen hídrico, los caudales mínimos por razones medioambientales u otras, el régimen de explotación de los aprovechamientos hidroeléctricos y, en su caso, las condiciones de tipo concesional, en particular la garantía de suministro para la refrigeración de centrales termoeléctricas existentes o previstas, así como aquellos otros elementos o características que tengan influencia en la disponibilidad de recursos.

Se recomienda, además, que, cuando en una cuenca se consideren varios sistemas de explotación de recursos, se elabore un único sistema de la totalidad de la cuenca en el que queden incluidos los sistemas parciales, con objeto de efectuar el análisis global de su explotación. Si el ámbito de un Plan Hidrológico comprende varias cuencas hidrográficas con un grado relevante de interconexión entre los sistemas de explotación de sus recursos, se debe elaborar, asimismo, un único sistema en el que se incluyan esas cuencas.

En el conjunto de los Planes de cuenca peninsulares se han considerado 125 sistemas básicos de explotación, distribuidos según se indica en la tabla 31 y en la figura 140.

Contemplar la irregularidad de los distintos Planes en la definición de sus sistemas de explotación (algunos con un número reducido, y otros con un número muy elevado, casi por subcuencas) puede servir para ofrecer algún criterio de homogeneización en el futuro.

Con objeto de disponer de un esquema general de representación y análisis de los sistemas de explotación de las distintas cuencas, de forma global, y con criterios y métodos homogéneos, entre los trabajos para la elaboración de este Libro se decidió también acometer la construcción de un modelo de Sistema Unificado de Explotación de Recursos Hídricos como instrumento básico para la elaboración de los balances de recursos y demandas con la necesaria homogeneidad, rigor metodológico, y resolución adecuada a la escala de trabajo propia de un Plan Hidrológico Nacional.

Con este Sistema, que se describe posteriormente, se ha procedido a evaluar las disponibilidades resultantes de la regulación obtenida en los principales embalses, incluyendo los que actualmente se hallan en construcción. En el epígrafe siguiente se describen los resultados teóricos obtenidos.

3.1.5.4. Disponibilidades teóricas obtenidas mediante regulación en embalse

La situación real de funcionamiento de las cuencas se describe en epígrafes posteriores. En este aparta-

Ámbito	Aport. natural total (hm ³ /año)	Aport. de cálculo (hm ³ /año)	Capacidad de embalse total (hm ³)	Capacidad de embalse de cálculo (hm ³)	Regulado demanda uniforme (hm ³ /año)	Regulado demanda uniforme (%)	Regulado demanda variable (hm ³ /año)	Regulado demanda variable (%)
Norte I	11.235	10.489	3.040	2.427	3.891	37	3.442	33
Norte II	13.000	10.950	559	384	1.579	14	1.475	13
Norte III	5.381	4.211	122	79	337	8	307	7
Duero	15.168	13.558	7.667	6.691	6.829	50	8.128	60
Tajo	12.230	12.230	11.135	9.887	5.860	48	7.071	58
Guadiana I	4.875	4.714	8.843	7.550	2.029	43	2.711	58
Guadiana II	1.293	825	776	522	207	25	264	32
Guadalquivir	7.978	8.021	8.867	7.835	2.904	36	3.632	45
Sur	2.483	1.076	1.319	1.042	388	36	504	47
Segura	1.000	857	1.223	737	610	71	725	85
Júcar	4.142	2.580	3.349	2.417	1.650	64	1.985	77
Ebro	18.217	18.217	7.702	6.860	11.017	60	12.998	71
C. I. Cataluña	2.780	1.544	772	709	768	50	1.115	72
Galicia Costa	12.642	8.137	688	451	1.777	22	1.493	18
Península	112.424	97.408	56.063	47.591	39.846	41	45.850	47

Tabla 32. Volúmenes regulados en la situación teórica considerada, con las series empleadas en los Planes Hidrológicos de cuenca

do se muestra el resultado orientativo obtenido de la simulación del funcionamiento de las cuencas bajo supuestos teóricos de modelación y que, por tanto, no necesariamente se corresponden con los vigentes condicionantes de explotación.

Por ello, los resultados que se obtienen en algunos casos difieren de las situaciones observadas de funcionamiento real de las cuencas.

Las hipótesis teóricas de diseño empleadas en este análisis son las mismas que las utilizadas al evaluar la regulación natural, es decir, demanda uniforme con garantía 100% y sin considerar retornos, y demanda variable, con la distribución entonces indicada, déficit admisibles del 50, 75 y 100% de la demanda anual y retornos del 20% de la demanda atendida. En ambos casos los volúmenes regulados se han determinado disminuyendo un 5% la capacidad de los embalses para tener en cuenta el efecto de los volúmenes mínimos y resguardos destinados al control de avenidas.

Además, se ha supuesto una utilización libre de todos los embalses existentes, ignorando cualquier limitación concesional o de explotación que condiciones su operación, lo que sería particularmente importante en los embalses hidroeléctricos, que se han supuesto de libre utilización para cualquier uso. Esto puede dar lugar a apreciables desviaciones en aquellas cuencas en las que la capacidad de embalse hidroeléctrica es una fracción muy importante del total. Es el caso de los Planes del Norte I, Duero, Tajo y Ebro, en los que esta capacidad supera al almacenamiento para usos consuntivos.

Los cálculos se han realizado para los dos mismos grupos de series de aportaciones naturales que en el caso de la regulación natural, es decir, las empleadas

por los Planes Hidrológicos de cuenca en los análisis de sus sistemas de explotación y las calculadas al elaborar este Libro.

El algoritmo de cálculo es similar al empleado en el caso de regulación natural, ligeramente modificado para tener en cuenta el efecto de los recursos almacenados al final de cada año hidrológico. Cuando existe infraestructura de regulación en la cuenca, la aparición de nuevas demandas aguas abajo, incluso teniendo un nivel de prioridad menor que el de las existentes, hace que puedan fallar éstas, puesto que el agua almacenada en los embalses al final de cada ciclo de optimización anual modifica la disponibilidad de recursos en un caso y otro.

Para resolver el problema se realiza una segunda ejecución del algoritmo de optimización, esta vez manteniendo el valor de las demandas situadas aguas abajo, cuya finalidad es la de ajustar definitivamente las demandas que comparten la regulación de un mismo embalse. Como en este caso las modificaciones que se introducen son ya pequeñas, al final de este bucle las demandas resultado cumplen ya el criterio de garantía establecido.

Debe hacerse notar que las cifras resultantes son tan solo meramente ilustrativas, al haberse obtenido en un supuesto teórico de utilización apropiatoria y exclusiva de aguas superficiales, sin considerar la existencia de ningún bombeo de aguas subterráneas, sin ninguna limitación derivada de las concesiones existentes y supeditado a la estrategia de gestión de embalses de ciclo anual supuesta en el modelo de optimización utilizado. Los valores obtenidos constituyen, en ausencia de limitaciones por la calidad de las aguas, un límite inferior de los recursos disponibles, que podrían, si

Ámbito	Aport. natural total (hm ³ /año)	Aport. de cálculo (hm ³ /año)	Capacidad de embalse total (hm ³)	Capacidad de embalse de cálculo (hm ³)	Regulado demanda uniforme (hm ³ /año)	Regulado demanda uniforme (%)	Regulado demanda variable (hm ³ /año)	Regulado demanda variable (%)
Norte I	12.689	12.603	3.040	2.427	4.735	38	3.937	31
Norte II	13.881	11.799	559	384	2.180	18	1.870	16
Norte III	5.337	4.437	122	79	471	11	353	8
Duero	13.660	12.422	7.667	6.691	5.253	42	6.095	49
Tajo	10.883	10.782	11.135	9.887	4.587	43	5.845	54
Guadiana I	4.414	4.097	8.843	7.550	1.678	41	1.922	47
Guadiana II	1.061	998	776	522	188	19	228	23
Guadalquivir	8.601	7.988	8.867	7.835	2.161	27	2.819	35
Sur	2.351	1.379	1.319	1.042	284	21	359	26
Segura	803	757	1.223	737	519	69	626	83
Júcar	3.432	2.745	3.349	2.417	1.766	64	2.095	76
Ebro	17.967	17.089	7.702	6.860	10.145	59	11.012	64
C. I. Cataluña	2.787	1.722	772	709	615	36	791	46
Galicia Costa	12.250	6.633	688	451	1.372	21	1.223	18
Península	110.116	95.451	56.063	47.591	35.954	38	39.175	41

Tabla 33. Volúmenes regulados en la situación teórica considerada, con las series obtenidas en este Libro

bien no necesariamente en todos los casos, incrementarse con estrategias de gestión plurianuales, técnicas de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, o empleo de recursos no convencionales. Por otra parte, se dan casos singulares, como el del Duero, en los que gran parte de la capacidad de almacenamiento (del orden de 2/3 del total) se encuentra en los importantes embalses hidroeléctricos próximos a Portugal, que no son utilizables en la parte española. Ello hace que las estimaciones realizadas deban corregirse sensiblemente a la baja.

Por todo ello, y como antes se indicó, las hipótesis asumidas y, en consecuencia, los resultados obtenidos, no son comparables con los que se observan en la realidad.

En cualquier caso, y con las peculiaridades indicadas, las magnitudes ofrecidas resultan bien indicativas del incremento de disponibilidad, obtenido por efecto de la regulación, respecto a la situación original en régimen natural.

Los resultados obtenidos con las series de aportaciones empleadas en los Planes de cuenca son los que se

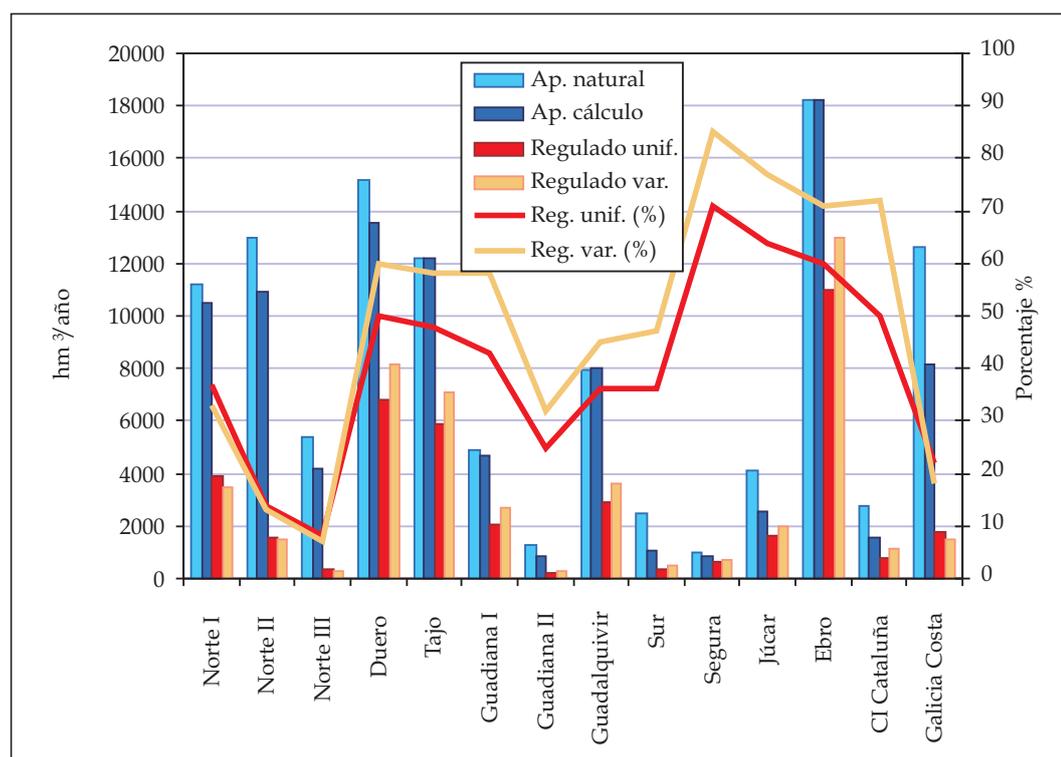


Figura 141. Volúmenes regulados en la situación teórica considerada. Series de aportaciones de los Planes Hidrológicos

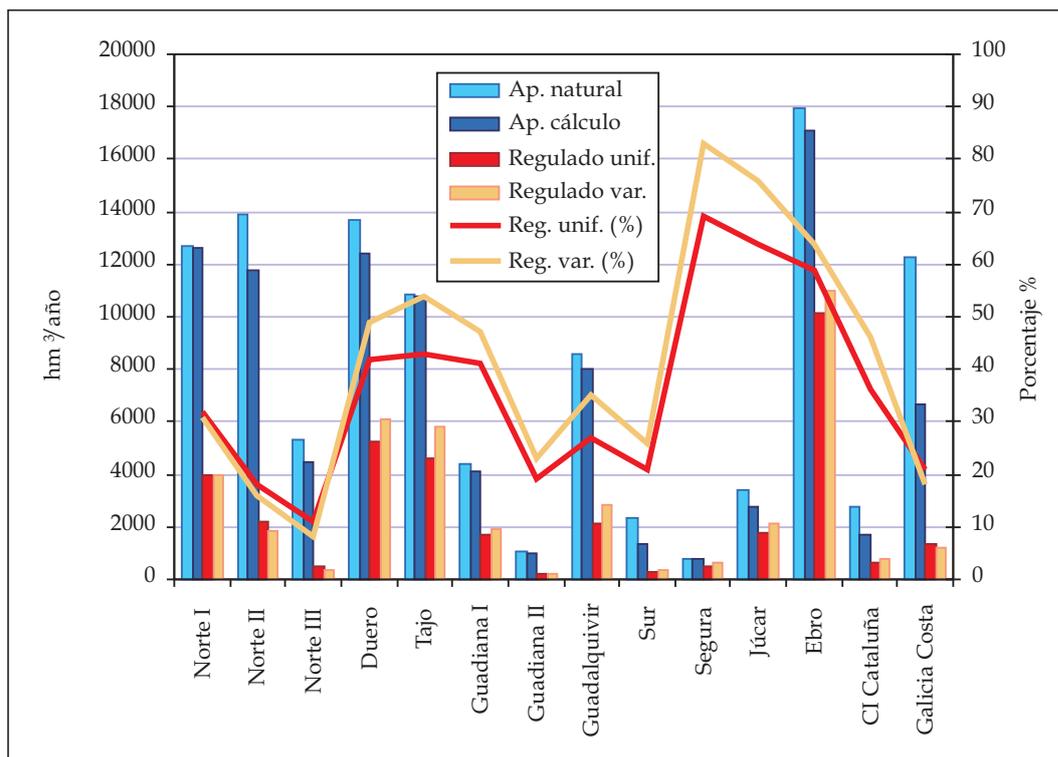


Figura 142. Volúmenes regulados en la situación teórica considerada. Series de aportaciones obtenidas en este Libro

muestran en la tabla 32 y en la figura 141. En la tabla se incluyen, a modo de referencia, las cifras de aportación natural indicadas en los Planes y las aportaciones de cálculo empleadas en el análisis de los sistemas de explotación, así como la capacidad de embalse total actual (incluyendo los embalses en construcción) y la capacidad de cálculo empleada, inferior por considerar solo los principales embalses y descontar los volúmenes para laminación de avenidas. Los resultados obtenidos se expresan tanto en valor absoluto como en porcentaje respecto a la aportación de cálculo empleada.

Análogamente, los resultados correspondientes a las series obtenidas en este Libro son los que se muestran en la tabla 33 y la figura 142.

Los resultados muestran el apreciable incremento de los volúmenes aprovechables como consecuencia de la infraestructura de regulación, que se situarían ahora en torno al 38-47% de las aportaciones naturales frente al 7-9% anterior. Debe señalarse que en el análisis se han considerado todos los embalses con efectos importantes en la regulación, incluidos aquéllos cuyo uso exclusivo es la generación de energía. Esto, en algunos ámbitos como el Norte I, el Duero o el Tajo -y en particular el segundo-, con importantes aprovechamientos energéticos, conduce, como se comentó, a volúmenes regulados muy superiores a los que resultarían si exclusivamente se consideraran los embalses destinados a atender usos consuntivos.

Los valores obtenidos con cada grupo de series son, en líneas generales, muy similares y las discrepancias observadas se hallan dentro de los márgenes que cabría esperar como consecuencia de los diferentes procedimientos de cálculo empleados y de abarcar periodos de tiempo diferentes.

La figura 143 resume los valores de volúmenes regulados obtenidos en condiciones naturales y con la dotación de embalses de regulación en servicio o en ejecución para el caso de demanda variable, déficit admisibles del 50, 75 y 100% de la demanda anual, y retornos del 20% (es decir, una demanda tipo de regadíos, que es la consuntiva claramente dominante), empleando las series de aportaciones obtenidas para este Libro, que, como se ha indicado, abarcan un periodo común e incorporan la última sequía.

Como puede verse, el incremento de los recursos aprovechables obtenido como consecuencia de las infraestructuras de regulación es francamente elevado en algunas cuencas. En el caso del Guadiana I, por ejemplo, que cuenta con el mayor embalse de España (La Serena, con 3.230 hm³ de capacidad) el volumen regulado en régimen natural se multiplica por más de cuarenta, llegando a alcanzar un volumen aprovechable del orden del 45% de las aportaciones naturales, porcentaje similar al de ámbitos como el Duero o el Tajo.

En las cuencas del Segura, Júcar y Ebro se alcanzan los mayores porcentajes de regulación superficial, destacando la primera de ellas, que regula más del 80% de su aportación natural. En el otro extremo se

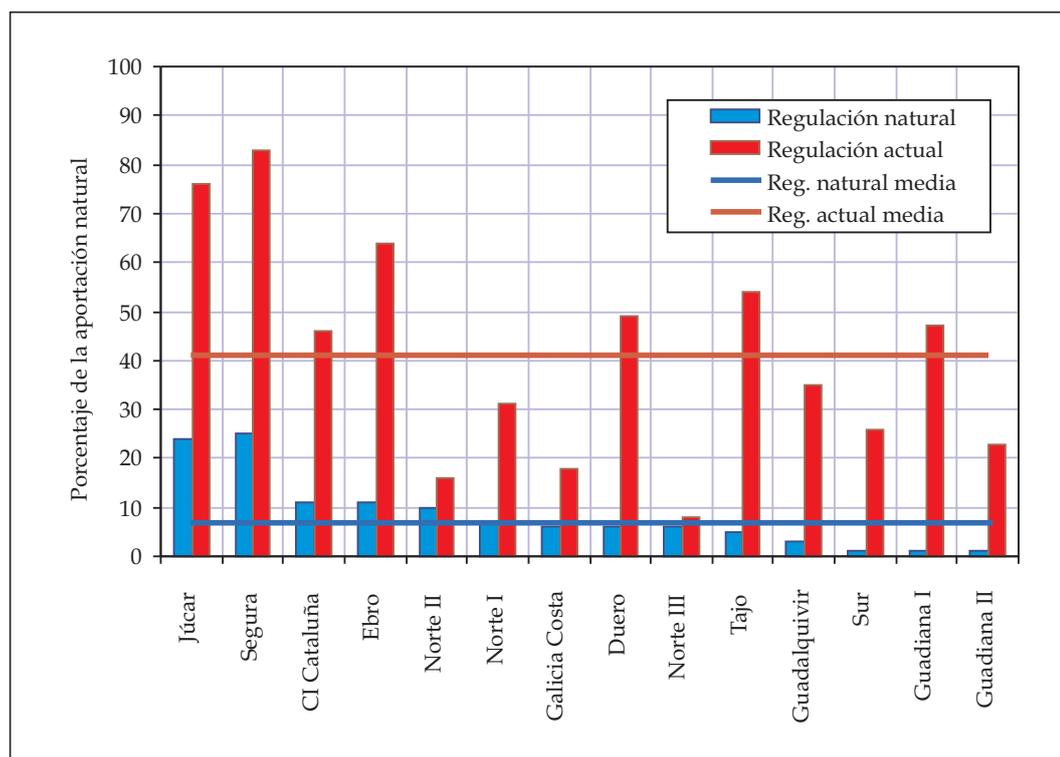


Figura 143. Regulación en régimen natural y en la situación teórica considerada (en porcentajes de la aportación total en régimen natural)

hallan las cuencas del Norte, Sur y Guadiana II con volúmenes regulados en embalses muy inferiores, particularmente el Norte III, donde no llega a regularse ni el 10% de la aportación natural.

Debe repetirse que, en rigor, estas cifras y evaluaciones tienen tan solo un valor indicativo, pues se han obtenido bajo determinados supuestos teóricos y simplificaciones. Pese a ello, ofrecen la ventaja de su total homogeneidad, que permite comparaciones objetivas entre cuencas, mostrando su situación relativa.

En posteriores epígrafes se irá prescindiendo de algunas de estas simplificaciones e introduciendo progresivos niveles de complejidad (como la consideración de otras fuentes de recursos además de la regulación superficial), aunque siempre bajo la perspectiva global y a la escala de todo el país. Los análisis de mayor detalle, finura descriptiva, y consideración de circunstancias locales, corresponden, lógicamente, a la planificación hidrológica de cada cuenca.

3.1.5.5. Las aguas subterráneas y su explotación

Las aguas subterráneas satisfacen una porción importante de las demandas consuntivas en España, explotándose del orden de 5.500 hm³/año tal y como se muestra en la tabla 34, elaborada con datos de bombeos tomados de los Planes Hidrológicos de cuenca y de MOPTMA-MINER (1995), y con datos de recargas propios y ofrecidos en anteriores secciones de este Libro. También hay que tener en cuenta, como se

expuso anteriormente, que en los ámbitos de Norte I y Galicia Costa no se dispone de estimaciones oficiales respecto a los bombeos de aguas subterráneas.

Es necesario precisar que cuando nos referimos a explotación de aguas subterráneas nos estamos refiriendo a aguas extraídas mediante bombeo de los acuíferos, y no a la fracción de origen subterráneo de la escorrentía total. Puede haber gran explotación por bombeos en cuencas con muy escasa fracción de escorrentía subterránea, y, a la inversa, no haber ninguna explotación por bombeos en cuencas con gran componente de escorrentía subterránea. La confusión entre ambos conceptos ha dado lugar, en ocasiones, a erróneas interpretaciones técnicas.

Por otra parte, hay que notar que, en algunos casos, las cifras de bombeos de la tabla ofrecida pueden incluir también salidas por manantiales, al no venir reflejadas ambas salidas, de forma separada, en todos los Planes de cuenca.

La figura 144 muestra asimismo, de forma visual, los porcentajes de bombeo/recarga, y de fracción de bombeo con respecto al total de España, en cada uno de los ámbitos territoriales de la planificación hidrológica.

Como puede verse, en los ámbitos del Guadiana I y Guadiana II las extracciones son, en valor medio global para el ámbito, superiores a la recarga natural, lo que revela una insostenibilidad global a largo plazo. En el caso del Guadiana II esta afirmación debe matizarse que esa insostenibilidad global es muy sensible a los

Ámbito de Planificación	Recarga en régimen natural (hm ³ /año)	Bombeo (hm ³ /año)	Porcentaje de bombeo respecto a la recarga natural	Porcentaje de bombeo respecto al total de España
Norte I	2.745	-	-	-
Norte II	5.077	19	0,4	0,3
Norte III	894	33	3,7	0,6
Duero	3.000	371	12,4	6,7
Tajo	2.393	164	6,9	3,0
Guadiana I	687	738	107,4	13,3
Guadiana II	63	76	120,6	1,4
Guadalquivir	2.343	507	21,6	9,2
Sur	680	420	61,8	7,6
Segura	588	478	81,2	8,6
Júcar	2.492	1.425	57,2	25,8
Ebro	4.614	198	4,3	3,6
C.I. Cataluña	909	424	46,6	7,7
Galicia Costa	2234	-	-	-
Península	28.719	4.853	16,9	87,7
Baleares	508	284	55,9	5,1
Canarias	681	395	58,0	7,1
España	29.908	5.532	18,5	100

Tabla 34. Explotación de las aguas subterráneas por ámbitos de planificación

datos de la unidad hidrogeológica de Ayamonte-Huelva, para la cual la estimación de la recarga aquí realizada es inferior a la que viene reflejada en el Plan de cuenca de Guadiana II. Asimismo, Guadiana I está muy influido por la estimación de extracciones en la cuenca alta de finales de los 80, superiores a las actuales. En el ámbito del Segura, la relación bombeo/recarga supera el 80%, y en otros ámbitos, como los del Sur, Júcar, C.I. Cataluña y las Islas, esta relación alcanza valores elevados, entre el 45 y el 80%.

Es interesante observar también cómo existen otros ámbitos, como los del Duero, Ebro o Guadalquivir,

donde, a pesar de tener acuíferos importantes, el aprovechamiento global mediante bombeos de las aguas subterráneas es relativamente reducido (menor del 25% de la recarga). Como es obvio, ello no implica necesariamente que deba incrementarse apreciablemente tal uso para mejorar las disponibilidades globales, ya que ello dependerá tanto de la existencia o no de almacenamientos superficiales que recojan las descargas subterráneas -como parte de la escorrentía total entrante- y sean capaces de regularlas adecuadamente, como de los costes relativos, de los efectos ambientales, y de la situación geográfica de los usos a atender.

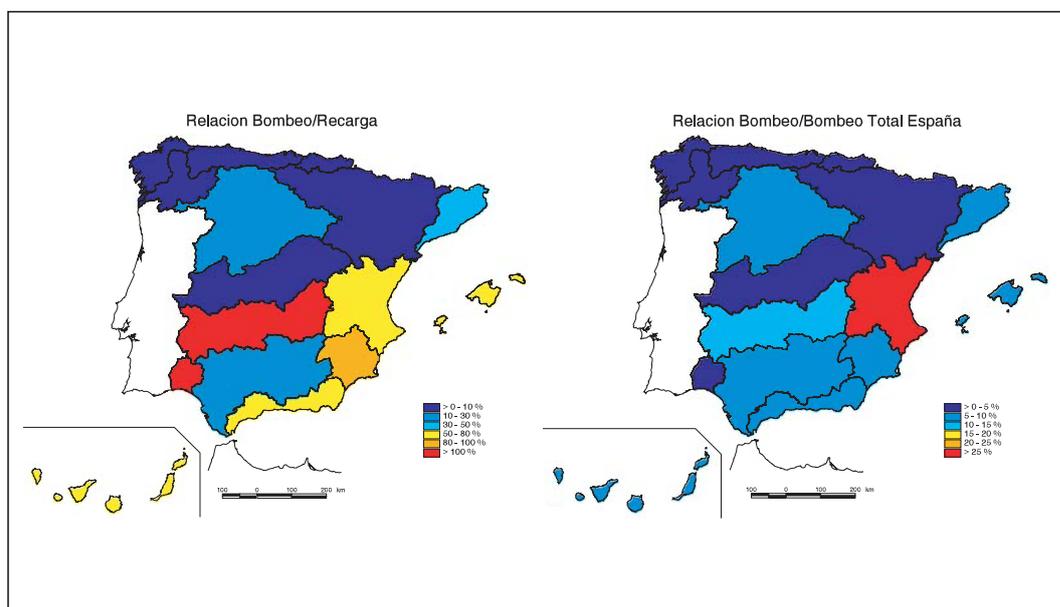


Figura 144. Mapas de la relación bombeo/recarga y la fracción de bombeo con respecto al total, por ámbitos de planificación hidrológica

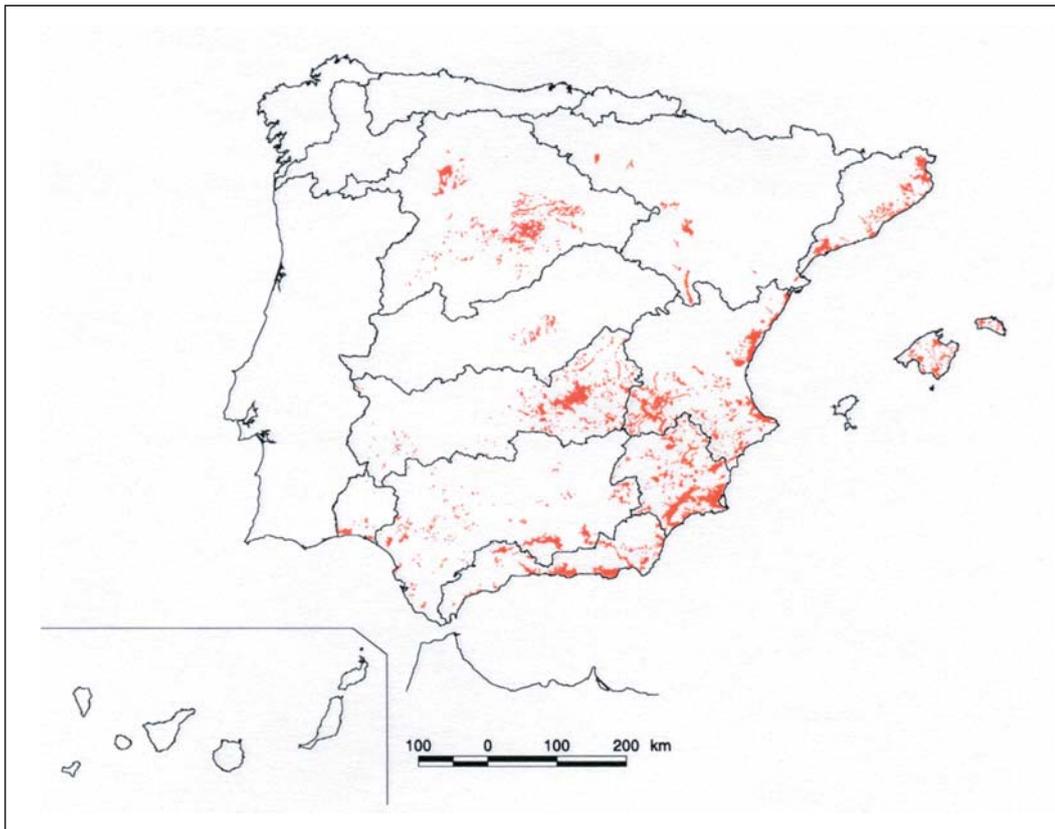


Figura 145. Mapa de zonas regadas con aguas de origen subterráneo y mixto

En cuanto a la cantidad relativa de bombeos en cada ámbito, destaca muy singularmente la cuenca del Júcar, donde se concentra el 26% del total de España, con un alto grado de empleo y asignación (Aragonés Beltrán, 1996). Le siguen en importancia Guadiana I, Segura y Guadalquivir, con cifras del orden del 10%.

Es obvio que, sin perjuicio de las dificultades existentes para su determinación (ITGE, 1999), estos datos agregados pueden englobar situaciones locales muy heterogéneas, pues es posible que haya graves sobreexplotaciones puntuales con ratios bombeo/recarga globales muy pequeños, y, a la inversa, no haber ninguna sobreexplotación con un ratio global unidad. Más adelante se verán estos ratios desagregados por unidades hidrogeológicas, pero, en todo caso, es indudable que, a la escala de los ámbitos de planificación, son un excelente primer indicador de la situación general de las cuencas en cuanto a la explotación de las aguas subterráneas, y a sus posibilidades de desarrollo. Habrá ocasión de volver a ello en futuros epígrafes, al referirnos al posible incremento de la oferta hídrica mediante una mayor utilización de las aguas subterráneas.

Como veremos, con las extracciones de aguas subterráneas ofrecidas en la tabla se atiende, por ejemplo, el 22% del abastecimiento de los núcleos urbanos de más de 20.000 habitantes, un porcentaje muy elevado en núcleos de menor población y del orden del 25 al 30% de la superficie total de riego (ver figura 145, elaborada

a partir de MOPTMA [1987]). Los caudales de los ríos en épocas secas, así como muchas de las zonas húmedas, entre ellas los Parques Nacionales de las Tablas de Daimiel y de Doñana, dependen asimismo de los acuíferos. Su importancia ambiental, económica y productiva es, en consecuencia, grande, tal y como ha sido puesto de manifiesto en reiteradas ocasiones (Llamas, 1995).

La explotación de los acuíferos produce descensos en sus niveles piezométricos y en los caudales de los ríos y manantiales que los drenan. En el caso de acuíferos pequeños, el retraso en la disminución del caudal de los ríos puede ser de algunos meses o pocos años, dependiendo de las características del acuífero y de la distancia de los pozos al río. En el caso de bombeos discontinuos, como sucede con los riegos, una parte importante de la afección se puede trasladar a los meses en los que se demanda menos agua superficial, con lo que es posible aumentar las disponibilidades reales del recurso. En acuíferos mayores la inercia es mayor y es posible estar bombeando períodos largos de tiempo, incluso años, sin afectar significativamente a las salidas, o incluso, en zonas hidrogeológicamente complejas y con distintos ríos, sin que pueda detectarse nunca tal afección de forma inequívoca sobre un cauce concreto. En estos casos, aunque el bombeo sea estacional, el descenso se reparte de modo sensiblemente uniforme a lo largo del año, o se difumina en el tiempo y el espacio.

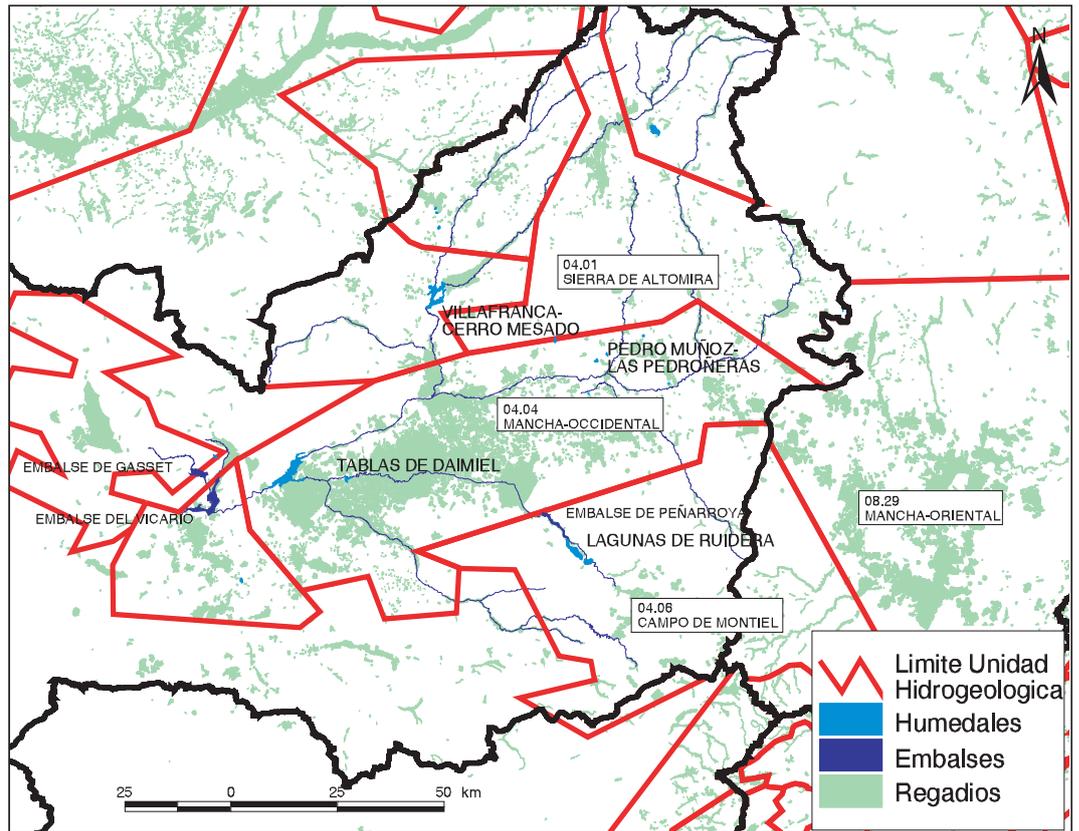


Figura 146. Mapa de la cuenca alta del Guadiana

Los bombeos en algunos acuíferos, como por ejemplo el delta del Llobregat o la Plana de Castellón, han modificado desde hace tiempo las relaciones acuífero-río, haciendo que estos últimos hayan pasado de recibir agua del acuífero a perderla y alimentarlo. En muchas ocasiones, la recarga inducida en acuíferos costeros debida a los bombeos produce un aumento de disponibilidad de agua al disminuir la transferencia al mar.

En otros casos se producen situaciones que, de no programarse rigurosamente, pueden tener consecuencias negativas. Así, la disminución de los caudales de los ríos provocada por una explotación intensiva de las aguas subterráneas puede causar interferencias en la gestión de los recursos hídricos, dando lugar a problemas socio-económicos, ambientales o legales. Las extracciones en el acuífero de la Mancha Oriental, por ejemplo, han producido unos descensos importantes del caudal del río Júcar durante los veinte últimos años a su

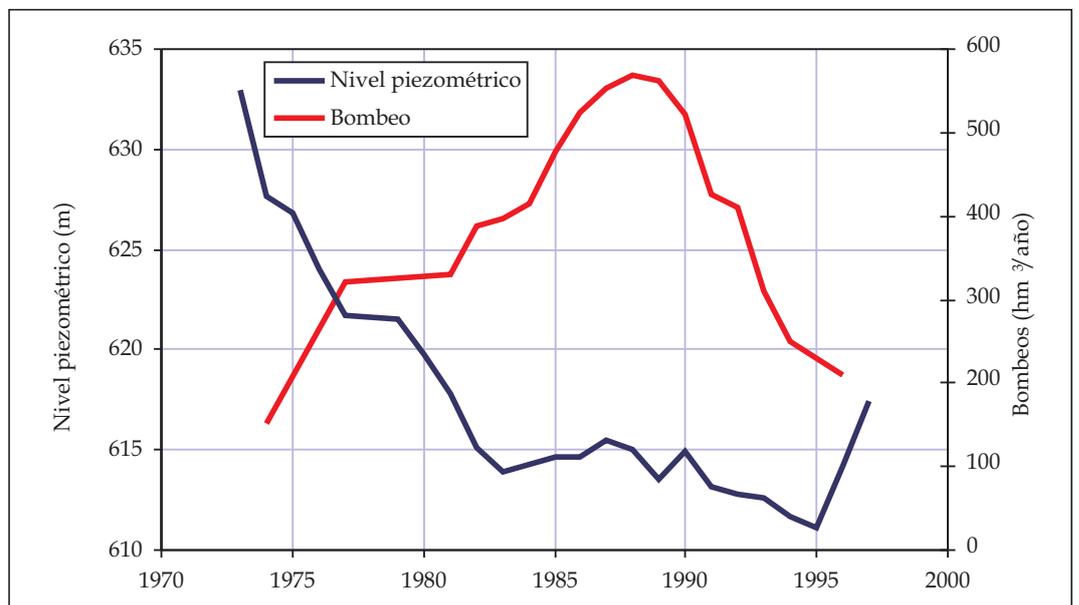


Figura 147. Evolución de niveles piezométricos y bombeos en el acuífero de la Mancha Occidental (piezómetro 203070003 en Manzanares)

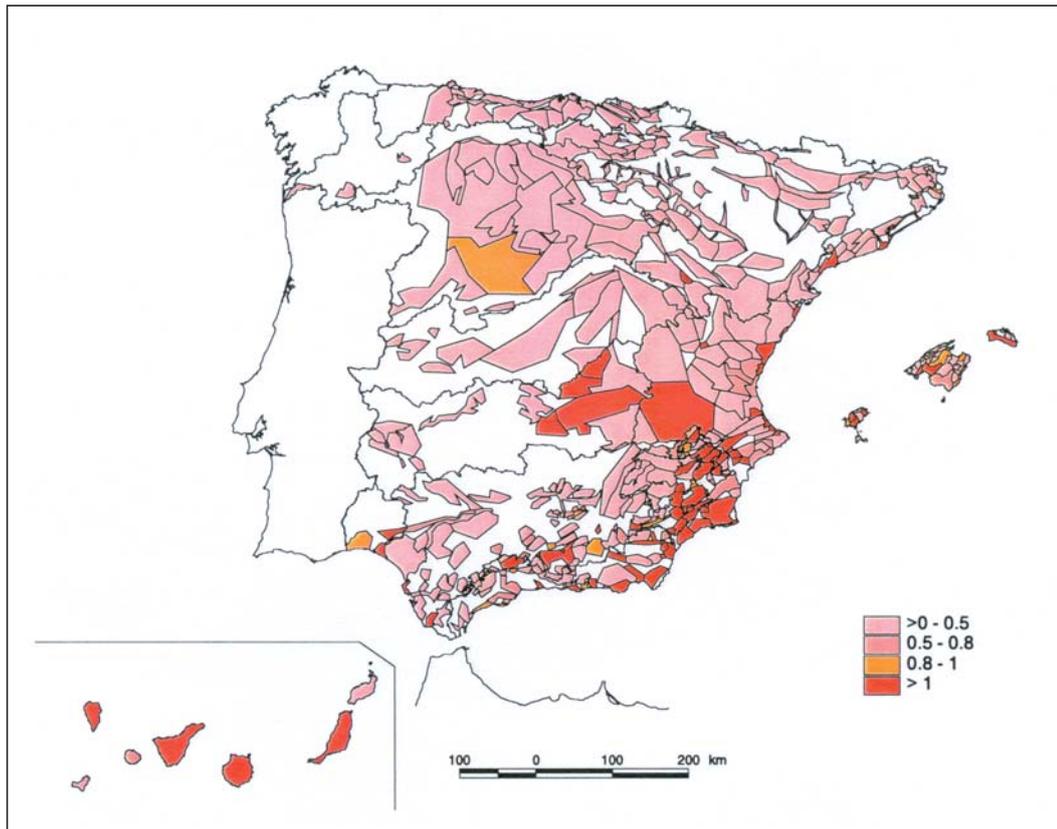


Figura 148. Mapa de la relación bombeo-recarga en las unidades hidrogeológicas

paso por la Llanura Manchega, tal y como ilustra el gráfico ofrecido en una sección anterior. Esto puede resultar admisible si se ordenan conjuntamente los aprovechamientos del río -como ha hecho el Plan Hidrológico de esta cuenca-, o resultar negativo tanto para los usuarios aguas abajo como para los propios del acuífero si esta situación no se ordena adecuadamente.

En la cuenca alta del río Guadiana (ver figuras 146 y 147) se presenta otro caso importante de influencia sobre los caudales superficiales. Las extracciones realizadas en los últimos veinte años en el acuífero de la Mancha Occidental, coincidiendo, además, con un periodo seco, han provocado un descenso continuado de los niveles piezométricos, lo que ha producido un deterioro de muchos de los humedales existentes, entre los que destaca el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.

En esta última figura (elaborada con datos de CHG, 1997) se aprecia cómo el efecto de la declaración de acuífero sobreexplotado, con la consiguiente ordenación de las extracciones, y la disminución de los bombeos debida a las ayudas y subvenciones agrarias, junto con la favorable situación hidrológica, está contribuyendo a una cierta recuperación de los niveles piezométricos en el acuífero (CE, 1997).

El descenso de caudal en ríos y zonas húmedas y de los niveles freáticos en acuíferos puede afectar también negativamente a la fauna acuática y a algún

tipo de vegetación, como ocurre en el Parque Nacional de Doñana.

En otras zonas, sin embargo, la explotación intensiva de las aguas subterráneas ha permitido la satisfacción de las demandas y el desarrollo de actividades económicas durante años, y ha disminuido la evapotranspiración en lugares con niveles freáticos próximos a la superficie, con un efecto global indudablemente beneficioso.

En términos generales, el proceso de descenso de niveles se estabiliza si los bombeos no superan la recarga del acuífero. En caso contrario, los descensos de nivel son progresivos y pueden hacer inviable la explotación sostenida por agotamiento de las reservas, por aumento excesivo de los costes, o por deterioro de la calidad del agua al movilizarse masas de agua de salinidad elevada.

En la figura 148 se desagrega la información ofrecida para los ámbitos territoriales de los Planes Hidrológicos, mostrando la relación bombeo/recarga en las distintas unidades hidrogeológicas delimitadas. Los datos de bombeo proceden de los Planes de cuenca y el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas, los de recarga son de elaboración propia para la recarga por infiltración directa de lluvia, y de los Planes de cuenca y Libro Blanco de las Aguas Subterráneas para la recarga debida al riego.

Como se aprecia en esta figura, lo usual es que la extracción sea mucho menor que la recarga, pero exis-

Ambito de Planificación	Libro Blanco de Aguas Subterráneas (1994)	Memoria del Plan Hidrológico Nacional (1993)	
Num. de unidades con probls. de sobreexplotac.	51	89	
	Déficit en unidades con bombeo/recarga > 1 (hm ³ /año)	Déficit estricto en uds. con bomb/rec > 0,8 (hm ³ /año)	Déficit efectivo en uds. con bom/erc > 0,8 (hm ³ /año)
Guadiana	240,0	240	280
Guadalquivir	10,0	10	25
Sur	68,8	36	60
Segura	215,9	295	325
Segura/Júcar	66,0		
Júcar	54,0	55	125
C. I. Cataluña	10,0	10	50
Baleares	14,0	14	30
Canarias	32,0		160
TOTAL	710,7	660	1055

Tabla 35. Déficit del balance de las aguas subterráneas por ámbitos de planificación

te un número importante de unidades, más de un 20% respecto al total, en que la extracción supera la recarga (ratio > 1) o está próxima a ella (ratio entre 0,8 y 1). Este conjunto de unidades podría en principio definirse como problemático desde el punto de vista de la sobreexplotación, en el sentido de que presumiblemente será imposible mantener a largo plazo las actuales tasas de extracción de agua. Esto no quiere decir que no haya otras unidades con extracciones inferiores a la recarga donde también puedan plantearse problemas por otras razones que más adelante se verán.

El examen de la figura muestra también con claridad cuál es la distribución espacial del fenómeno: además de en las islas, se produce en todo el mediterráneo español y Andalucía, concentrándose fundamentalmente en el sureste (Murcia, Almería y Alicante) y en la llanura manchega (Ciudad Real y Albacete). Del resto, sólo aparece como problemática la situación de la región de los Arenales, en la cuenca del Duero. Cabe señalar que alguna de estas zonas puede asimismo haber modificado su situación en los últimos años. Es el caso del Alto Guadiana, donde, como se explicó, se han reducido sensiblemente las extracciones con respecto a las existentes a finales de los 80.

Como muestra de evaluaciones previamente existentes, la tabla 35 ofrece estimaciones de la situación de unidades problemáticas, procedentes de MOPTMA-MINER (1995) y de la Memoria del Plan Hidrológico Nacional (MOPT [1993]).

En la evaluación realizada en este Libro, el total de las unidades consideradas en principio problemáticas soporta unas extracciones totales del orden de 3.900 hm³/año, lo que supone más de la mitad de las extracciones totales en todas las unidades hidrogeológicas de España.

Los volúmenes que exceden el recurso renovable, y que por tanto provienen de las reservas se extraen mediante decenas de miles de captaciones, y se aplican básicamente al regadío y, en mucha menor medida, al abastecimiento (archipiélagos, las ciudades de Almería y Albacete, etc.). Con frecuencia, al problema cuantitativo se superponen problemas de calidad por intrusión marina (campo de Dalías) o movilización de aguas profundas salobres lixiviadas (cuenca del Segura).

Debe tenerse en cuenta que la sobreexplotación es un proceso dinámico. Factores como la climatología, la disponibilidad de aguas trasvasadas, la entrada en servicio de desaladoras, las subvenciones agrarias, el agotamiento de acuíferos, etc. hacen que la cuantía de extracciones cambie cada año, y deba ser estimada en sus valores medios actuales.

Asimismo, debe señalarse que la sobreexplotación no es un fenómeno reciente. Dejando a salvo las islas, donde el problema es muy antiguo, y refiriéndonos únicamente a la península, existen precedentes en el Sureste (no sólo técnicos sino también jurídico-administrativos) desde los años cincuenta, y el problema está ampliamente extendido desde los años 70. Ello implica que éste ya existía a la entrada en vigor de la actual Ley de Aguas, lo que tiene consecuencias jurídicas importantes y viene a significar que, según una cierta línea interpretativa que ha recibido respaldo judicial, no cabe prohibir la extracción sin que medie indemnización por la prohibición del uso, aunque sea privación temporal, y ello aún cuando medie declaración de sobreexplotación. Ello, obviamente, en el supuesto -en general infrecuente- de correcta acreditación de derechos previos al uso del agua del acuífero.

Aunque en esta situación actual de hecho se están produciendo situaciones de claro desequilibrio, resulta

generalmente admitido que, salvo excepciones planificadas y controladas, una correcta utilización de los acuíferos no debe apoyarse en la extracción continuada de las reservas, sino en los recursos renovables, pero esta consideración no debe llevar al extremo de condenar toda gestión hídrica que implique extracción de reservas. De hecho, cualquier explotación de aguas subterráneas requiere fases transitorias de desequilibrio, en las que parte del volumen aprovechado procede de reservas. Sólo si la disminución de las reservas se prolonga excesivamente, sin que se haya planificado su estabilización o recuperación, cabría presumir que existe una sobreexplotación.

El concepto de sobreexplotación aplicado a acuíferos no es fácil de definir con precisión. Algunas veces se asocia a una explotación que hace disminuir las reservas, y otras, más genéricamente, a una explotación excesiva con consecuencias indeseables para los usuarios del acuífero o para terceros (Margat, 1992), línea conceptual que es la seguida, como veremos, por nuestra reglamentación.

Los tipos de efectos desfavorables que podrían hacer presumir una sobreexplotación son variados (Custodio, 1992): a) hidrológicos, derivados de un descenso continuado de los niveles, que puede conllevar una reducción en el caudal de los pozos, b) en la calidad del agua, deteriorada por contacto con niveles de peor calidad o por intrusión salina en acuíferos costeros, c) económicos, por aumento del coste de energía de bombeo, al tener que elevar desde mayores profundidades y con menores caudales, y de costes de inversión por reperfuración de pozos y sustitución de equipos de bombeo, d) medioambientales, inducidos en manantiales, ríos, zonas húmedas, masas de freo-fitas, y ecosistemas asociados, por el descenso de niveles en acuíferos vinculados a dichos espacios y e) morfológicos y geotécnicos, por fenómenos de subsidencia o hundimientos, ocasionados por el descenso de niveles.

En la legislación española, el concepto de sobreexplotación (definido en el artículo 171.2 RDPH), contempla tres posibles situaciones:

- Extracciones muy próximas o superiores a los recursos renovables, que pongan en peligro inmediato la subsistencia de los aprovechamientos existentes.
- Deterioro grave de la calidad del agua como consecuencia de dichas extracciones.
- Evolución del acuífero, como consecuencia de la cuantía de las extracciones, que ponga en peligro la subsistencia a largo plazo de los aprovechamientos.

Aunque esta definición legal no contempla expresamente como causa de sobreexplotación la afección de las

extracciones a las surgencias naturales del acuífero o a sus niveles piezométricos, cabría considerar algunas afecciones de este tipo como problemas de sobreexplotación, especialmente cuando conllevan impactos medioambientales importantes. Una posible interpretación de la normativa, compatible con los requerimientos prácticos de la planificación y gestión, sería vincular los niveles admisibles de explotación a la disponibilidad del recurso, establecida ésta atendiendo a todos los condicionantes de los sistemas de recursos: objetivos de calidad, necesidades ecológicas, situaciones jurídicas, planteamientos económicos, reglas de explotación, derechos de los usuarios, etc. (Sánchez González, 1995).

Hasta la fecha, en las cuencas intercomunitarias se han declarado provisional o definitivamente como sobreexplotadas 15 unidades hidrogeológicas (MIMAM, 1998a), cuya situación se muestra en la figura 149 y tabla 36. No se ha representado en el mapa la unidad de Cresta del Gallo, en el ámbito del Segura, pues se trata de un muy pequeño acuífero, de problemática muy puntual, no incluido en la nueva delimitación de unidades realizada en ese Plan. Tampoco se han representado las unidades de Bloque de Gaia y Camp de Tarragona, de las Cuencas Internas de Cataluña, que fueron declaradas provisionalmente sobreexplotadas en 1988 por el la Generalidad de Cataluña, que además estableció limitaciones de derechos de explotación en otros 21 acuíferos (MOPTMA-MINER, 1995).

Como se ve en la tabla, de las 15 unidades declaradas provisionalmente sobreexplotadas, sólo 2 de ellas han alcanzado la declaración definitiva, las de Campos de Montiel y la Mancha Occidental.

No se incluyen en la tabla anterior los acuíferos o zonas de acuífero de Nijar, Huércal-Overa, Pulpí y Bajo Andarax, a los que sin haberse declarado formalmente unidades provisionalmente sobreexplotadas, les son también de aplicación los efectos contenidos en el artículo 171.4 del RDPH.

Con objeto de analizar las unidades hidrogeológicas en las que se han detectado problemas de sobreexplotación o salinización, y con la finalidad de que se pudiese definir y programar la ordenación de las extracciones en tales acuíferos, en MOPTMA-MINER (1995) se planteó un programa sobre "Acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización".

Los trabajos realizados para la elaboración de este Catálogo de Acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización han permitido identificar hasta 77 unidades hidrogeológicas en las cuencas intercomunitarias - DGOHCA (1997), MIMAM (1998a) -. Para el total de España habría que añadir a las anteriores otras unidades con problemas en las Cuencas Internas de Cataluña y en las Islas Canarias.

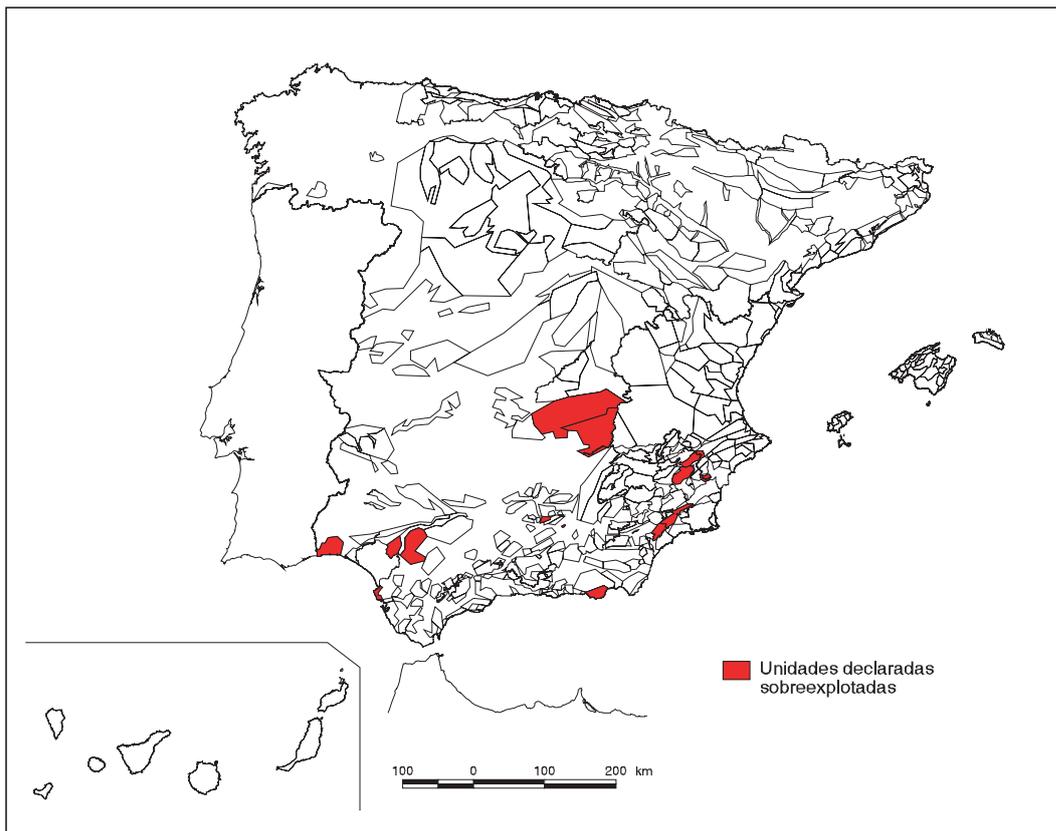


Figura 149. Mapa de unidades hidrogeológicas con declaración provisional o definitiva de sobreexplotación en las cuencas intercomunitarias

Es importante a este respecto diferenciar sobreexplotación física de sobreexplotación jurídica, pues, como puede comprobarse, es un hecho que tales conceptos no necesariamente recaen simultáneamente sobre las mismas unidades. Además, se observa que las declaraciones definitivas son muy escasas frente a las provisionales, lo que debe hacer reflexionar sobre esta importante cuestión, y la eficacia real que el proceso reglamentario está teniendo en la práctica.

Por otra parte, el que existan en algunos lugares problemas de sobreexplotación de acuíferos no implica

que no pueda en otros extenderse el uso de las aguas subterráneas con efectos positivos. Nos referiremos a ello en otros capítulos, al estudiar las posibilidades de futuro en cuanto a disponibilidades hídricas.

3.1.5.6. Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas

En secciones anteriores se han examinado las disponibilidades reguladas mediante los embalses de superficie y la situación de explotación de las aguas subte-

Ámbito de planificación	Código	Denominación de la unidad	Declaración de sobreexplotación
Compartida Guadiana-Guadalquivir	00.04	Campo de Montiel	Definitiva (12/06/1989)
Compartida Segura-Júcar	00.16	Jumilla-Villena	Provisional (31/07/1987)
Compartida Segura-Júcar	00.19	Sierra de Crevillente	Provisional (31/07/1987)
Guadiana	04.04	Mancha Occidental	Definitiva (15/12/1994)
Guadiana	04.12	Ayamonte-Huelva	Provisional (12/12/1988)
Guadalquivir	05.19	Mancha Real-Pegalajar	Provisional (24/10/1992)
Guadalquivir	05.41	Chotos-Cortijo Hidalgo	Provisional (24/10/1992)
Guadalquivir	05.47	Sevilla-Carmona	Provisional (26/10/1992)
Guadalquivir	05.50	Aljarafe	Provisional (18/05/1993)
Guadalquivir	05.57	Rota-Sanlúcar-Chipiona	Provisional (30/11/1992)
Sur	06.14	Campo de Dalías	Provisional (21/09/1995)
Segura	07.09	Ascoy-Sopalme	Provisional (07/01/1987)
Segura	07.28	Alto Guadalentín	Provisional (04/10/1988)
Segura	07.30	Bajo Guadalentín	Provisional (04/10/1988)
Segura		Cresta del Gallo	Provisional (04/10/1988)

Tabla 36. Unidades hidrogeológicas con declaración provisional o definitiva de sobreexplotación en las cuencas intercomunitarias

rráneas. Un procedimiento empleado para incrementar las disponibilidades de agua es el del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

Por utilización conjunta de recursos superficiales y subterráneos se entiende el uso planeado y coordinado de ambas fuentes, para la mejor satisfacción de la demanda. Las proporciones en que se combinan las cantidades de agua de una y otra procedencia para el suministro de la demanda son variables en función de la época del ciclo hidrológico anual, de las reservas existentes en el sistema de almacenamiento superficial y en los acuíferos, de la calidad disponible en cada uno, y, específicamente, del objetivo que se haya fijado en la explotación del sistema (SGOP-UPV, 1983).

La utilización conjunta aprovecha la complementariedad hidrológica de los embalses superficiales y los acuíferos. Al explotar las aguas subterráneas cuando los caudales o los almacenamientos superficiales son menores, se consigue un aumento de la garantía del suministro.

Si se consideran las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas y la influencia recíproca de la explotación de cada una de ellas en la otra, el uso conjunto es una necesidad evidente en zonas con problemas de abastecimiento, que no tienen que coincidir, necesariamente, con zonas áridas o de escasez de recursos hídricos.

La capacidad de almacenamiento de un acuífero puede aprovecharse si se hace más uso de los embalses superficiales o de los caudales de los ríos en los periodos húmedos y se bombea más de los acuíferos en periodos secos. Este tipo de uso conjunto, denominado utilización alternativa (Sahuquillo, 1996) es el que presenta, a priori, más posibilidades en España.

El ejemplo más conocido de utilización alternativa es el del sistema río Mijares-Plana de Castellón. El sistema, tal como se muestra en la figura adjunta, consta de tres embalses, dos en el río Mijares, el de Arenós, con 130 hm³ de capacidad, situado en cabecera, y el de Sichar, con 50 hm³, y uno en la Rambla de la Viuda, el de María Cristina, con 20 hm³ de capacidad. Los embalses de Sichar y María Cristina, situados en calizas, tienen filtraciones importantes -del orden de 45 hm³/año- que alimentan, junto con el río Mijares, al acuífero de la Plana. La explotación de las aguas subterráneas aumenta en los años más secos, mientras que en los años más húmedos se riega con aguas superficiales la mayor extensión posible de tierras dominada por los canales y acequias existentes. La variación de agua almacenada en el acuífero de la Plana de Castellón, entre el final de un periodo húmedo y el de un periodo seco de varios años de duración, ha llega-

do a ser del orden de 700 hm³. Esta capacidad de almacenamiento del acuífero permite conseguir un porcentaje muy alto de garantía en los suministros. La figura 150 muestra este sistema, con los diferentes orígenes del agua para regadíos de la zona.

Es de destacar que este tipo de utilización se realiza por iniciativa de los usuarios. Los estudios posteriores de la Administración han buscado racionalizar y optimizar una gestión inicialmente bien planteada. Por otra parte, la gestión de este sistema se complica con la existencia de una zona con problemas de intrusión marina al Sur de la Plana, debida a la concentración de bombeos y a la ausencia de riegos con acequias. Los modelos de simulación de la explotación, en los que se contempla la posibilidad de extender la utilización alternativa a los años húmedos, demuestran que es posible paliar también los problemas de intrusión marina.

La utilización alternativa también se ha venido aplicando en otros sistemas de explotación de recursos en cuencas mediterráneas. Por ejemplo en la cuenca del Júcar, la zona de riego del canal Júcar-Turia, especialmente su margen derecha, utiliza las aguas superficiales del Júcar y las procedentes de pozos de forma coordinada. En concreto, la dotación superficial de su concesión es del 50% de la demanda. El uso conjunto tiene una importante componente económica por el mayor coste de los bombeos, pero ha llevado a una elevada garantía de la zona en la última sequía. También en otros sistemas, como el del canal del Campo del Turia, el del río Palancia-Plana de Sagunto, río Serpis-Plana de Gandía, o la Marina Baja, se está realizando este uso conjunto.

En la cuenca del Segura esta utilización alternativa se realiza tradicionalmente en el Valle del Guadalentín, y en la del Sur en las cuencas del Bajo Guadalhorce, Vélez, Motril y Delta del Adra.

Un caso típico de utilización alternativa es el del sistema de abastecimiento del Canal de Isabel II a la zona metropolitana de Madrid, que dispone en la actualidad de una capacidad instalada de extracción de agua subterránea de unos 4 m³/s (3 a sistemas generales y 1 a sistemas locales, según su propia demanda), con objeto de disponer de recursos de emergencia en situaciones de sequía (hasta unos 100 hm³/año movilizables, lo que supone del orden del 20% de la demanda anual). El complementar los caudales aportados por los embalses en periodos secos eleva de forma importante las disponibilidades de agua del sistema, manteniendo una garantía elevada. Igual sucede con los pozos del acuífero del Llobregat para emergencias del sistema de abastecimiento de aguas a Barcelona y su entorno.

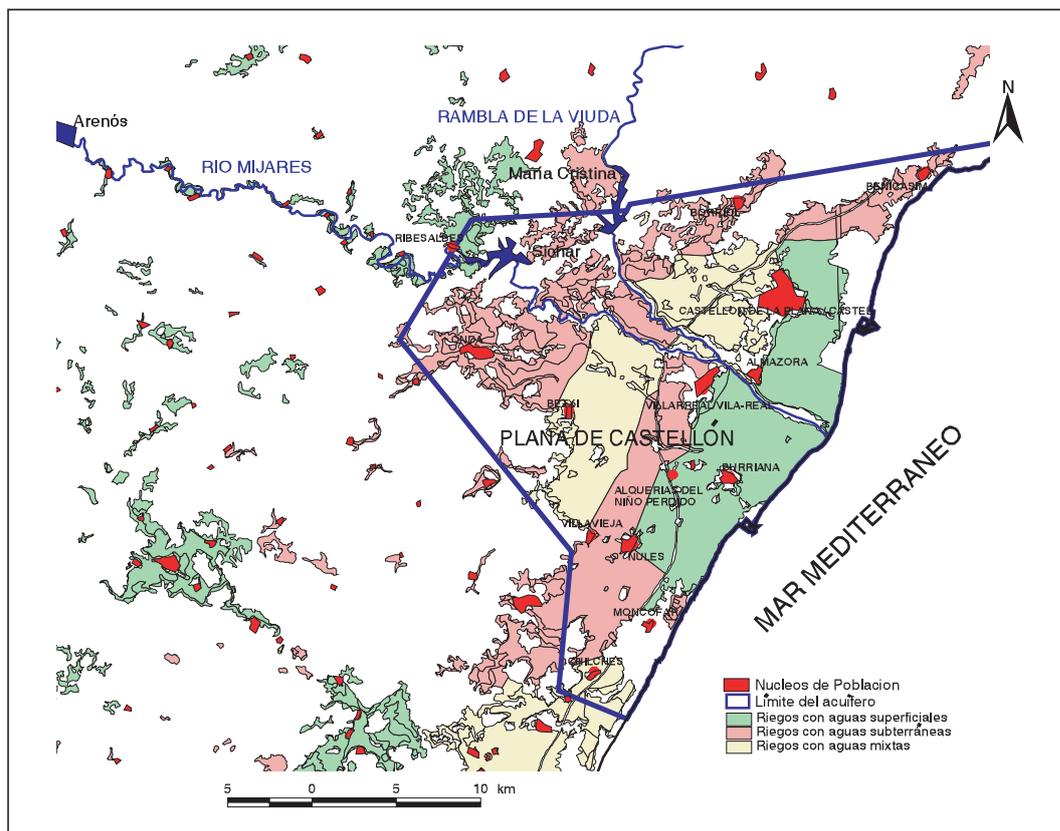


Figura 150. Mapa del sistema río Mijares-Acuifero de la Plana de Castellón

En todas las cuencas españolas es posible hacer uso del concepto de utilización alternativa en mayor o menor medida. Las posibilidades, en cualquier caso, dependen de las aportaciones superficiales y su variabilidad, de la capacidad de los embalses, de la localización y de la cuantía de la demanda, de las características y posibilidades de los acuíferos y de las relaciones de éstos con los ríos.

Otro tipo de utilización conjunta consiste en aumentar las disponibilidades aprovechando el retardo que se produce entre los bombeos de un acuífero y la disminución de caudal en el río drenante. Cuando se bombea de forma intermitente en los meses más secos, en los que la demanda de agua es mayor y es menor el caudal de los ríos, una parte del efecto del bombeo se produce en los meses en los que es mayor el caudal de los ríos. En este tipo de uso conjunto la influencia de los bombeos sobre el caudal del río es más rápida, y es esencial el conocimiento de las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas para valorar con precisión los intercambios de agua.

Este tipo de uso conjunto se denomina río-acuífero y se ha utilizado en España, por ejemplo, en los acuíferos de la Vega Alta y Media del Segura para paliar los efectos de la sequía.

Ciertos acuíferos, al disminuir sus niveles piezométricos, pueden invertir su relación con el río, que puede pasar de ganador a perdedor. En muchos acuíferos de

la costa mediterránea española se han producido esas situaciones al entrar los ríos en las llanuras costeras. En algunos casos se puede aprovechar esa posibilidad para recargar los acuíferos en épocas en las que no hay necesidades de riego. Incluso se pueden programar, con este fin, desembalses en momentos oportunos para almacenar el agua en los acuíferos.

Una última tipología corresponde a la regulación de manantiales kársticos. En España se han regulado diversos manantiales kársticos mediante bombeos en el acuífero para complementar los caudales necesarios para satisfacer la demanda, y se han estudiado distintas posibilidades de esta técnica (v., p.e., Sanz Pérez, 1987).

Un buen ejemplo de esta tipología la constituye el sistema de recursos de la Marina Baja (Alicante). Este sistema consta de dos pequeños embalses (Guadalest y Amadorio) y de una unidad hidrogeológica carbonatada (Serrella-Aixorta-Algar) que dispone de dos campos de pozos de alta productividad, uno de ellos aguas arriba del embalse de Guadalest y el otro, que se utiliza para regular el manantial kárstico del Algar, que drena al acuífero del mismo nombre. Este sistema atiende una demanda de abastecimiento de unos 20 hm³/año y el riego de 3.200 ha.

Aunque el sistema no está totalmente integrado como una unidad de gestión, sus principales demandas se sirven indistintamente de agua superficial, del manan-

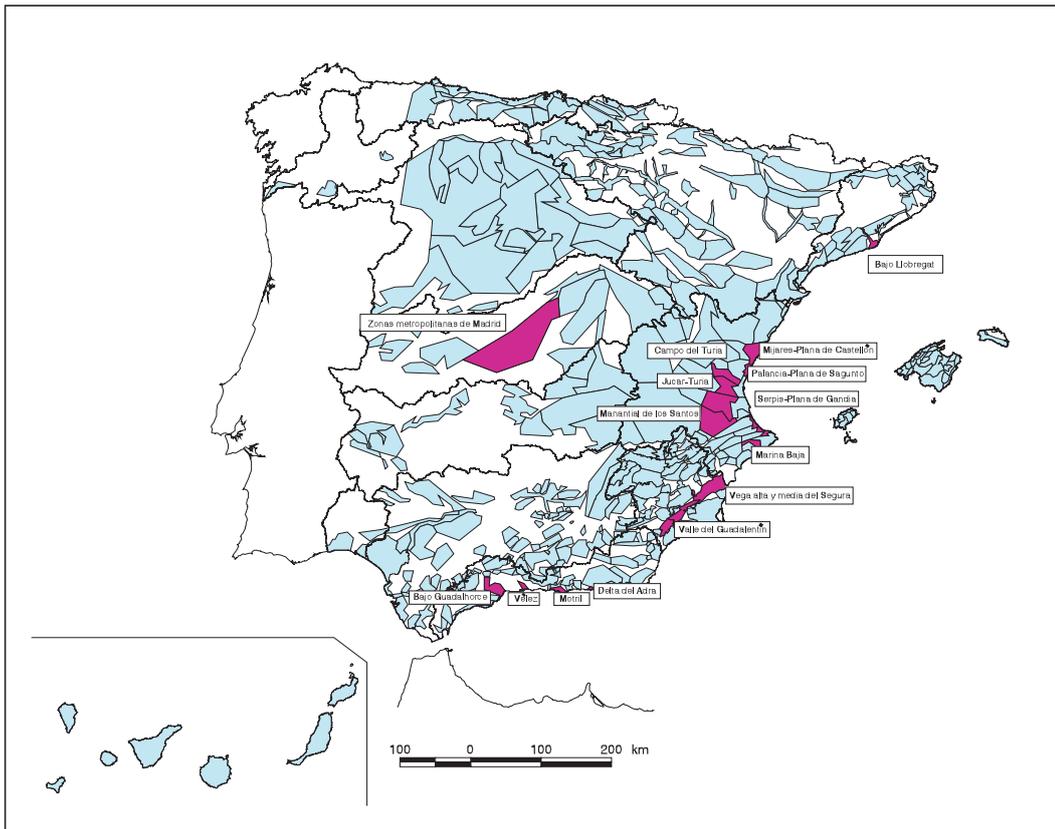


Figura 151. Mapa de situación de algunos esquemas de uso conjunto en España

tial del Algar y de los pozos. También se utilizan aguas residuales depuradas para el riego de cultivos arbóreos. Este sistema, además de ser un ejemplo de regulación de un manantial kárstico, lo es también de utilización alternativa y ha servido para hacer frente a sequías importantes. La regulación por bombeo del manantial de los Santos ha permitido atender la demanda agrícola, aunque han aparecido problemas ambientales ligados a los escasos caudales del manantial.

Otro caso de uso conjunto combinado con recarga artificial tiene lugar en el sistema formado por el río Llobregat y la unidad hidrogeológica costera del Bajo Llobregat, donde las extracciones medias anuales, de unos 140 hm³, son ligeramente superiores a la recarga media de la unidad. En el aluvial del río se recargan hasta unos 20 hm³/año en pozos situados en el delta con las aguas sobrantes de la planta de tratamiento de Sant Joan d'Espí. También mediante escarificación del lecho del río se ha conseguido aumentar la infiltración en el aluvial. La experiencia del Bajo Llobregat ha sido muy aleccionadora y, sin ser un ejemplo perfecto, es un intento razonable de gestión desde los usuarios, la Administración del agua y la Universidad (Custodio, 1996).

En la figura 151 se muestran algunos de los principales esquemas donde en la actualidad se está haciendo uso conjunto en España.

3.1.5.7. Recarga artificial de acuíferos

Se denomina recarga artificial a un conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada e introducción directa, inducida o estimulada de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía y disponibilidad de los recursos hídricos, y actuar sobre su calidad.

La recarga artificial de acuíferos se ha venido utilizando desde hace tiempo para almacenar escorrentías de agua superficial o sobrantes. Recientemente se ha utilizado como un medio de mejorar la gestión de los acuíferos, para reducir el descenso de niveles piezométricos, o para disminuir o aliviar problemas de intrusión marina al desplazar las cuñas salinas hacia el mar. La posibilidad de almacenar agua en los acuíferos ha conducido a implantarlo en esquemas de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas (Custodio, 1986).

La recarga artificial es una técnica que presenta una cierta complejidad de ejecución. La programación de intervenciones fundamentadas en esta tecnología debería limitarse, salvo excepciones, a áreas que presentan escasa regulación de recursos hídricos y fuerte demanda, a zonas con explotación agrícola bien desarrollada y alto rendimiento, a comarcas donde el coste del agua es muy elevado y a sectores costeros donde no es posible la construcción de obras clásicas de regulación por condicionantes topográficos.

El país con un mayor grado de desarrollo en la aplicación de la técnica de la recarga artificial ha sido tradicionalmente Estados Unidos. Solo en el Estado de California se aporta, mediante la utilización de la recarga artificial de acuíferos, un volumen de 1400 hm³/año (CDWR, 1998). En Israel se destina a recarga una parte significativa del recurso disponible. En el contexto de la Unión Europea, son Alemania y Holanda los países donde existen más realizaciones. En estos países el principal objetivo no es el incremento de las disponibilidades, sino la purificación del agua para abastecimiento urbano en su paso a través de la zona no saturada del suelo.

En España existen sistemas tradicionales de recarga artificial al menos desde época árabe. Ejemplos de estas prácticas tradicionales son los careos de La Alpujarra, o los sistemas de diques, presas subterráneas y boqueras en aluviales del sureste. Las primeras instalaciones modernas de recarga artificial se ubicaron en los alrededores de Barcelona, en los aluviales de los ríos Besós y Llobregat. En este último se recargan, en algunos años, hasta un máximo de 20 hm³ en pozos localizados en el delta con aguas sobrantes de la planta de tratamiento de Sant Joan d'Espí, y por el escarificado del río. Otras experiencias de interés, aunque no comparables a esta por su permanencia en el tiempo, son las de Mallorca, en el Llano de Palma (MOPU, 1986), la del Boquerón, en la cuenca del Segura (Senent Alonso, 1985), u otras en la costa del Llobregat, Sant Pau de Ribes, etc. La cuantía total de recursos destinados de forma regular a recarga artificial en España es de difícil estimación, pero no debe alcanzar siquiera los 50 hm³/año.

En colaboración con otros organismos, el ITGE ha efectuado desde 1984 una serie de experiencias piloto cuyas principales características se sintetizan en la tabla 37 (López Geta y Murillo, 1995).

Los resultados obtenidos en estas experiencias son esperanzadores, aunque se han producido algunos fracasos que han sido fruto tanto de una falta de planificación y tecnología, como de un insuficiente interés por sus posibles beneficiarios, y escasa aportación económica para desarrollarlas.

En MOPTMA-MINER (1995) se abordó, con carácter general, un programa dirigido a una efectiva y racional investigación de esta tecnología.

En todo caso hay que indicar que con la utilización de la recarga artificial no cabe esperar que se consiga un aumento significativo de recursos en el país, pero sí es posible resolver o paliar algunos problemas locales, mejorando su garantía de suministro.

3.1.5.8. Reutilización

Otra técnica de incremento de las disponibilidades considerada como no convencional es la de la reutilización de las aguas. Aunque, obviamente, el volumen de recurso es el mismo, su aplicación sucesiva permite satisfacer más usos y, por tanto, incrementar las disponibilidades internas del sistema de utilización.

La reutilización es un componente intrínseco del ciclo del agua, ya que mediante el vertido de efluentes a los cursos de agua y su dilución con el caudal circulante, las aguas residuales han venido siendo reutilizadas tradicionalmente por tomas aguas abajo del punto de incorporación al cauce. Es importante distinguir entre reutilización indirecta, que es la mencionada y la más común, y reutilización directa, que es aquella en que el segundo uso se produce a continuación del primero, sin que entre ambos el agua se incorpore a ningún cauce público.

En efecto, esta reutilización directa o planificada, a gran escala, tiene un origen más reciente y supone el aprovechamiento directo de efluentes depurados con un mayor o menor grado de tratamiento previo, mediante su transporte hasta el punto del segundo aprovechamiento a través de una conducción específica, sin mediar para ello la existencia de un vertido a cauce público.

Las posibilidades de reutilización están directamente relacionadas con las disponibilidades de volúmenes de efluentes tratados, que a su vez dependen del número y capacidad de las estaciones depuradoras existentes. Este número y capacidad previsiblemente experimentarán un importante aumento por la obligatoriedad de cumplir la Directiva Comunitaria 91/271/CEE, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas, y la ejecución del Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (PNSD). La necesidad de obtener agua con unas calidades mínimas para cada uso y garantizar unas condiciones sanitarias satisfactorias obliga, en la mayoría de los casos, a someter los efluentes depurados a tratamientos terciarios específicos (filtración, microfiltración, tratamiento físico-químico, desinfección, tratamientos de eliminación de sales, etc.), que deben por supuesto preverse en una reutilización planificada (Mujeriego, 1994).

Además de las muy frecuentes reutilizaciones indirectas (de las que un excelente ejemplo es el proporcionado por las vegas del Segura, en las que el agua se aplica dos, tres y cuatro veces a los riegos tradicionales mediante el sistema de riego-avenamiento-nuevo riego, o el de los riegos del Jarama, con aguas depuradas de Madrid), en España existen en la actualidad identificadas más de 100 actuaciones de reutilización directa, siendo uno de los países más desarrollados en

Localización	Tipo de instalación	Origen del agua de recarga	Objetivo	Duración de la experiencia	Caudal infiltrado
ALUVIAL DEL RIO OJA (LA RIOJA)	3 balsas de infiltración y 10 km de canales	Excedentes superficiales del río Oja y Santurdejo	Incrementar Recursos hídricos para riego y mejorar la calidad del agua del acuífero donde existen captaciones para abastecimiento urbano	Desde Dic. 1986. 3 a 5 meses al año	de 40 a 400 l/s
VEGA DE GUADIX (GRANADA)	5 balsas de infiltración	Drenaje de la Mina de Alquije	Incrementar los recursos hídricos para riego	Desde Nov. 1984. 3 a 4 meses al año	de 200 l/s a 300 l/s
CALCARENITAS DE CARMONA (SEVILLA)	1 balsa de infiltración tipo "Fosa"	Excedentes invernales del Canal del Bajo Guadalquivir	Resolver problemas locales de sobreexplotación	15 días	6,7 l/s
ALUVIAL DEL BAJO GUADALQUIVIR (SEVILLA)	2 zanjas de infiltración (300 m) con pozos de 1 m de diámetro en su interior	Excedentes invernales del Canal del Bajo Guadalquivir	Incrementar los recursos hídricos para riego	1 mes	De 250 a 500 l/s
ACUIFERO DE JIJONA (ALICANTE)	1 sondeo profundo y represas de vaso permeable (5000 m ³ de capacidad)	Escorrentía esporádica y excedentes invernales del manatíal de Nuches	Aumentar la garantía de suministro al abastecimiento de Jijona	2 años	Hasta 12 l/s
VALLE DEL ESGUEVA (VALLADOLID)	1 sondeo profundo	Excedentes invernales del río Esgueva	Incrementar los recursos hídricos para riego	5 años	De 2 a 20 l/s
SETLA-MIRARROSA-MIRAFLOR (ALICANTE)	1 pozo de gran diámetro con dos galerías paralelas a la costa de 100 m de longitud cada una. A partir de Nov. de 1996 se cuenta con 3 pozos de recarga.	Excedentes invernales del río Girona	Frenar el avance de la intrusión marina e incrementar los recursos hídricos para riego	Desde Dic. 1985 5 a 6 meses al año	40 l/s
MANCHA REAL (JAEN)	1 sondeo profundo	Excedentes invernales del río Torres	Aumentar la garantía de suministro del abastecimiento de Mancha Real	15 días	70 l/s
MAZAGON (HUELVA)	6 balsas de infiltración	Agua residual urbana bruta	Depuración e incremento de los recursos hídricos para regadío	1 año	De 100 a 200 m ³ /día

Tabla 37. Experiencias de recarga artificial realizadas por el ITGE en colaboración con otros Organismos

este campo. Estas actuaciones permiten atender una demanda de unos 230 hm³/año, siendo el riego el aprovechamiento más extendido (89% del volumen total, frente al 6% de usos recreativos y campos de golf, 2% de usos municipales, 2% para requerimientos ambientales y 1% de usos industriales). Las instalaciones están ubicadas, sobre todo, en las islas y zonas costeras mediterráneas con escasez de recursos hídricos - fundamentalmente Júcar y Segura - tal y como muestra la figura adjunta. Estas zonas son, además, las que parecen presentar mayores potencialidades para su desarrollo futuro.

Una experiencia interesante, que cabe reseñar, es la de la ciudad de Vitoria.

En Vitoria, y pese a tratarse de una zona con abundante pluviometría, se plantea el doble problema de asegurar el abastecimiento urbano y el riego de 10.000 has, manteniendo asimismo unos caudales de servidumbre en los cauces. Para ello, se desarrolló un plan de reutilización integral cuyo objeto era alcanzar la plena reutilización de las aguas residuales efluentes de la ciudad, cifradas en unos 45 hm³/año, que mezclan 27 residuales con 18 de arroyos próximos, captados por la red de colectores urbanos. Tras impedir esta captación des-

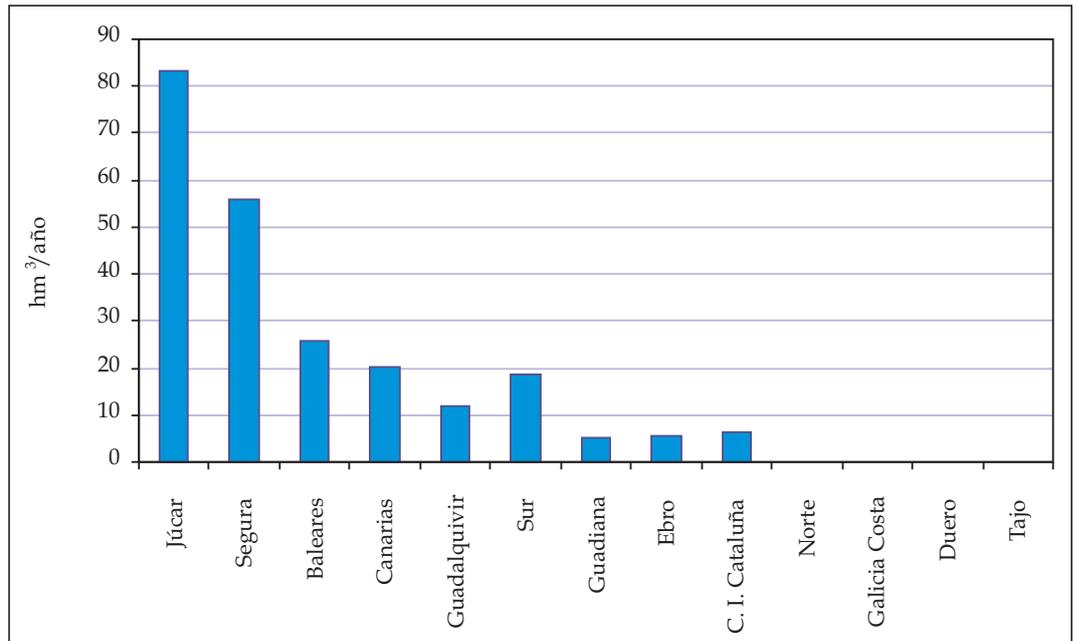


Figura 152. Volúmenes de reutilización directa actual por ámbitos de planificación

viando los caudales aguas arriba de la ciudad, se tratan los 27 hm³ residuales en la EDAR mediante un terciario de forma que pueden aportarse a los cauces en condiciones aptas para la vida de los peces. Se trata, en definitiva, de una operación de depuración que permite aumentar las disponibilidades globales para abastecimientos y riegos, y mantener el carácter truchero del río Zadorra (López García et al. 1998).

Asimismo, otros ejemplos de experiencias de interés son los de la Costa Brava (Sala y Serra, 1998), la Costa del Sol (Marzo, 1998), Tarragona (Aragonès, 1988), y el sureste peninsular (Rico et al. 1998) (fig. 152).

El mapa de la figura 153 muestra, asimismo, los municipios con instalaciones de reutilización existentes, pudiendo apreciarse claramente la concentración espacial antes apuntada.

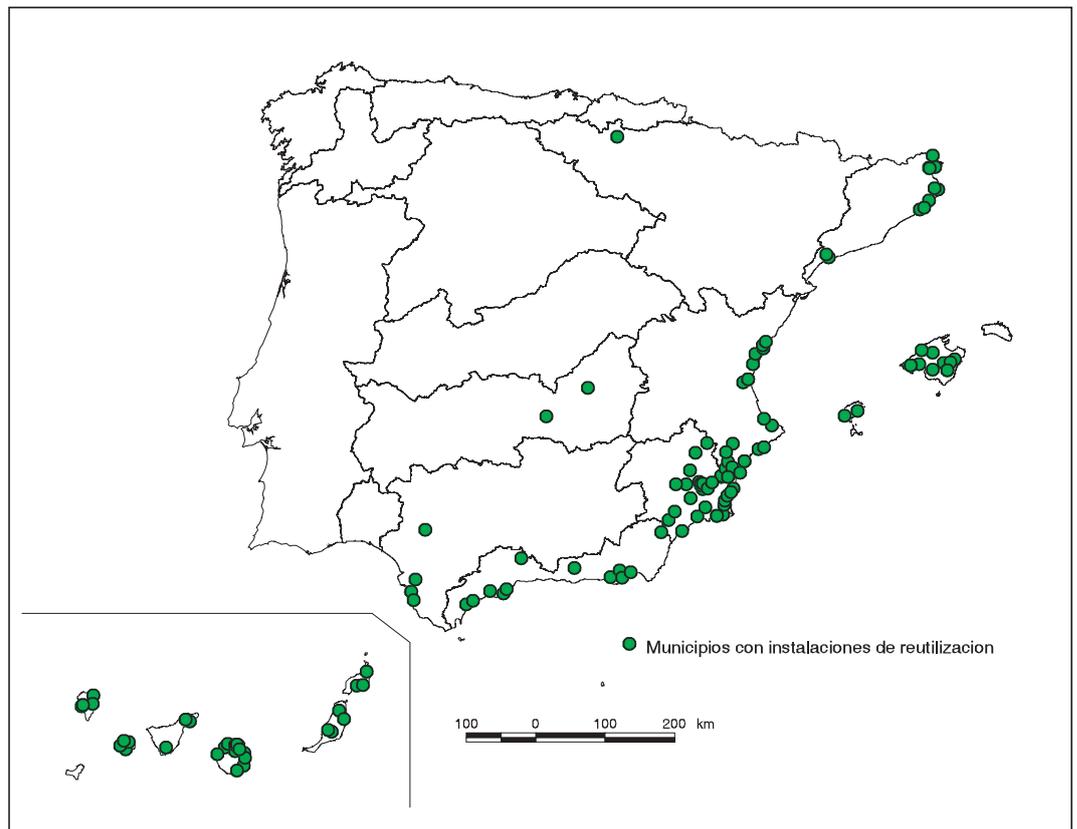


Figura 153. Mapa de municipios con instalaciones de reutilización directa

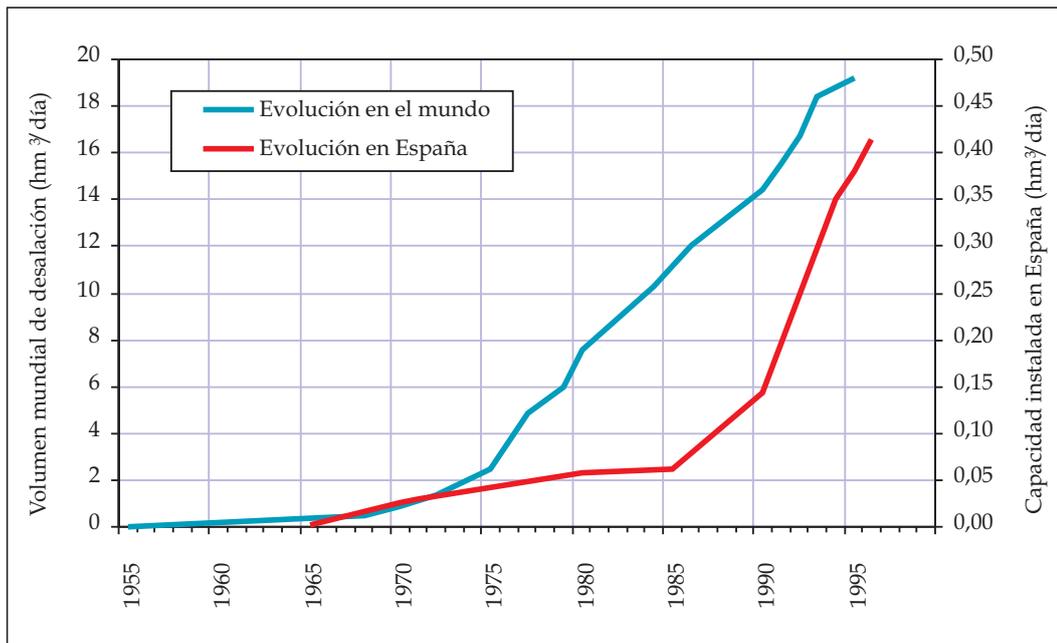


Figura 154. Evolución de la desalación en el mundo y en España

El principal problema que afecta a la reutilización directa de las aguas depuradas, y que constituye un freno a su expansión, es la inexistencia de una normativa específica, sancionada por la autoridad sanitaria, y de aplicación general, que regule los criterios de calidad exigible a dichas aguas y los aspectos relativos a su gestión. Esta situación está provocando cierta desorientación a la hora de su planificación, dispersión de criterios en cuanto a la selección de los tratamientos terciarios precisos y, en ocasiones, la reutilización de los efluentes en condiciones inadecuadas.

Para resolver esta carencia, y en desarrollo tanto de la Ley de Aguas (art. 101) como del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (arts. 272 y 273), se redactó un proyecto de Real Decreto que, atendiendo fundamentalmente a los criterios sanitarios del Ministerio de Sanidad y Consumo, fijaba las condiciones básicas para la reutilización directa de las aguas residuales depuradas. Este proyecto de Real Decreto se encuentra actualmente en proceso de análisis, revisión y consulta por las partes afectadas, y a expensas de lo que en su caso se regule en las instancias comunitarias europeas.

De forma paralela, han ido apareciendo algunas regulaciones de ámbito autonómico en las cuales se establecen, fundamentalmente, diversos límites de carácter sanitario para la aplicación de este tipo de aguas en el riego agrícola. Ejemplo de ellas son las establecidas en Cataluña y Baleares.

3.1.5.9. Desalación

Otra técnica de incremento de las disponibilidades tradicionalmente considerada como no convencional es

la de la desalación del agua, consistente, como su nombre indica, en tratar aguas saladas o salobres procedentes del mar o de acuíferos salinos, y, quitándoles las sales, transformarlas en aguas aptas para usos como el de abastecimiento a poblaciones o los riegos.

La idea del uso del agua del mar para el aprovechamiento humano es antiquísima, existiendo ya referencias en Aristóteles, pero no es sino hasta mediados del siglo XX cuando comienza a producirse una utilización masiva e industrial de esta tecnologías.

La figura 154 (Rico et al., 1998) muestra sendas estimaciones de la evolución del volumen mundial de desalación en plantas con capacidad de tratamiento superior a los 100 m³/día, y de la capacidad de desalación instalada en España. Sin perjuicio de que sus valores puntuales puedan verse modificados según la interpretación dada a los conceptos que se representan (tipo y tamaño de plantas, tipo de aguas tratadas, etc.), la figura muestra una inequívoca y continuada tendencia creciente desde los años 60, que en nuestro país se ve acelerada desde la segunda mitad de los 80.

En efecto, en España se ha venido utilizando la desalación de agua de mar desde finales de los 60 para los abastecimientos urbanos de Ceuta, Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria, que tienen en común la escasa disponibilidad de recursos hídricos. En todos estos casos la desalación se reveló como la mejor solución - y en algunos de ellos como la única - al problema del déficit en el abastecimiento urbano. Otras soluciones estudiadas (transporte de agua en barcos o incremento artificial de precipitaciones) se abandonaron en su momento por considerarse inviables técnica o económicamente.

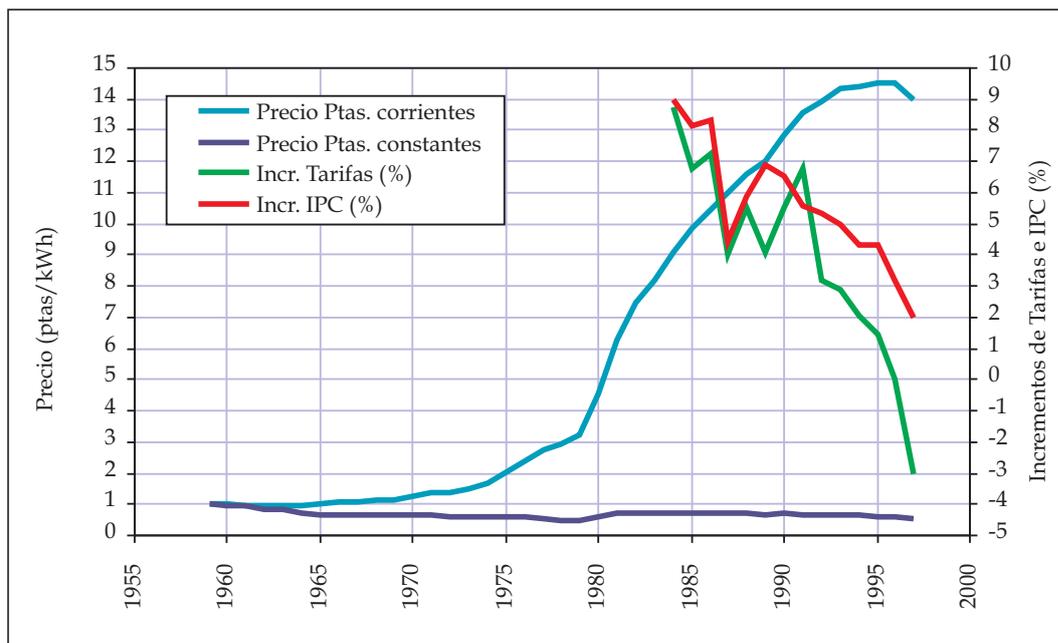


Figura 155. Evolución del precio medio de venta de la energía eléctrica y de los incrementos anuales de la tarifa eléctrica y el IPC.

Las primeras tecnologías que se implantaron fueron las de destilación, en sus variantes de multietapa (MSF) y compresión de vapor (VC), para las que los consumos energéticos eran muy elevados - entre 15 y 18 kWh/m³, siendo ésta la causa principal del muy alto coste del agua desalada, superior a 200 pta/m³. El desarrollo y entrada en el mercado de otras tecnologías más eficientes, como la ósmosis inversa (con un consumo total del orden de 5 kWh/m³ según los últimos proyectos llevados a cabo), junto con el descenso del coste de la energía, han rebajado sensiblemente este coste del agua desalada hasta cifras inferiores a las 100 pta/m³, y en una tendencia reciente claramente favorable.

Como indicador de esta tendencia favorable al efecto de reducción de costes, la figura 155 (elaborada con datos de UNESA, 1998b) muestra la evolución en las últimas décadas del precio medio de venta de la energía eléctrica en España (pta/kWh) - tanto en pesetas corrientes como en pesetas constantes de 1959 -, así como la evolución de los incrementos porcentuales anuales de la tarifa eléctrica y del Índice general de Precios al Consumo. Como puede verse, el precio de la electricidad ha crecido tradicionalmente por debajo del IPC, llevando a que, en términos reales, el precio del kWh haya descendido un 44% entre 1959 y 1997. En los últimos años la tendencia a la moderación de precios eléctricos se ha acentuado notablemente dando lugar, como puede observarse, incluso a incrementos negativos.

Con precios medios (ventas totales divididas por energía consumida) estabilizados en torno a las 14 pts/kWh, y que pasan a ser del orden de la mitad para importantes consumos industriales como los de las

instalaciones de desalación, las perspectivas de empleo de esta tecnología están cambiando aceleradamente, su viabilidad económica se está viendo muy favorecida en los últimos años, y se están quebrando a la baja los costes que tradicionalmente viene teniendo la producción de estas aguas.

Así, cabe citar cómo en las últimas evaluaciones realizadas con motivo de la construcción de nuevas instalaciones, se ha bajado ya de la cifra de 100 pts/m³, incluyendo en ella la parte correspondiente a la amortización íntegra de la inversión a realizar. Son cifras aún muy elevadas, que no permiten su uso exclusivo para el regadío, pero que, en algunos casos de gran escasez o ausencia de fuentes alternativas, podrían asumirse para el abastecimiento a poblaciones.

La figura 156 muestra una estimación de los costes totales actuales de la desalación de agua del mar por ósmosis inversa, en función de la producción de la planta, bajo el supuesto de amortización de la inversión en 15 años al 5% de interés, valor residual nulo, y precio de la energía de 7 pta/kWh.

Como puede verse, la componente fundamental del coste es la de operación y mantenimiento (del orden del doble que la amortización), y de ésta, entre el 50 y el 80% corresponde estrictamente al consumo energético.

Niveles de producción de agua superiores a los máximos ofrecidos en el gráfico (que equivalen a unos 20-25 hm³/año) son también técnicamente factibles, pero comienzan a plantear importantes problemas tanto desde el punto de vista de la captación, si se pretende

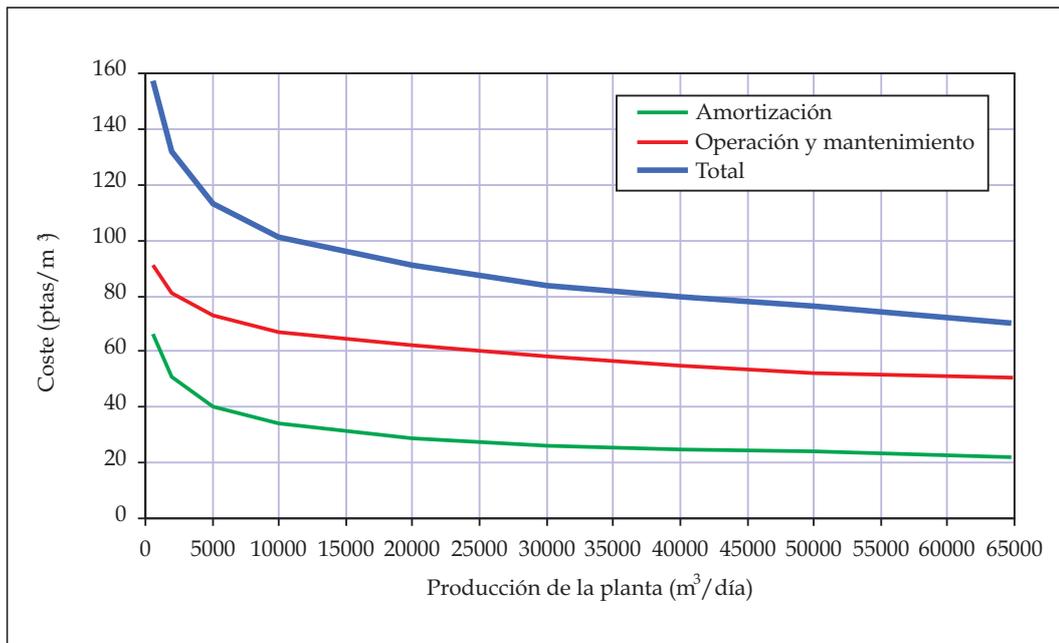


Figura 156. Costes de desalación de agua del mar según la producción de la planta

hacer mediante pozo, como del retorno al mar de las salmueras, ya que se requerirían cada vez más largos y costosos emisarios para diluir, sin afecciones ambientales negativas, un vertido puntual continuo, de gran caudal y altísima concentración salina. Los sobrecostes asociados a estas dificultades hacen que, aunque existan experiencias de plantas mayores, los máximos tamaños actualmente empleados sean, en la práctica, del orden de magnitud mostrado.

Por otra parte, otra componente significativa del coste de producción puede ser la requerida para la evacuación de las salmueras al mar mediante emisarios submarinos de gran longitud. Si existen valores ambientales (como, p.e. praderas de algas) que deben preservarse de una concentración salina excesiva, estos emisarios pueden ser una solución adecuada, aunque introduciendo un mayor coste de producción del agua.

A los indicados costes de producción, a pie de planta, habría que añadir en todo caso los de transporte desde la planta hasta el área de consumo, que serían las balsas de cabecera en el caso de los regadíos, o los depósitos municipales en el caso de abastecimiento a poblaciones. En este último caso, los costes totales (producción y transporte) resultantes serían los equivalentes a la captación de recursos y traída a los depósitos en alta (costes del abastecimiento en alta), por lo que, a efectos del precio final del agua pagado por el usuario, habría que añadir todos los costes en baja de la distribución, mantenimientos y explotación de las redes de suministro municipales, posibles tratamientos e impulsiones, gastos de personal y administración, etc.

Ciñéndonos al transporte del agua desalada desde la planta productora hasta los depósitos en alta, los costes de este transporte han de incluir los correspondientes a la amortización de la inversión de la infraestructura de transporte (tubería, equipo de bombeo, balsa de regulación para incidencias), y los de operación (básicamente consumo de energía para el bombeo) y mantenimiento. Todos estos costes son parametrizables en función de tres variables básicas que son la producción de la planta (indicativa del caudal a transportar y la regulación requerida), la distancia al mar (indicativa de la longitud del transporte), y la cota del punto de consumo (indicativa del equipo de bombeo y del coste energético). Introduciendo estas variables en un modelo cartográfico pueden calcularse especialmente los costes indicados.

En efecto, la figura 157 muestra una estimación - obtenida mediante modelación cartográfica - del coste total de producir y llevar agua desalada a cualquier punto del territorio. El agua procedería de una planta de 10.000 m³/día (consumo correspondiente a una población de unos 30.000 habs) y las condiciones supuestas han sido, como antes se indicó, de amortización en 15 años al 5% de interés, y coste energético de 7 pts/kWh.

Como cabía esperar, el mapa obtenido está fuertemente relacionado con el de las distancias al mar, pero controlado por efectos debidos al relieve. Es evidente que estos resultados son simplificados y meramente indicativos, pero, pese a su simplificación, proporcionan una primera idea aproximada de lo que supondría, en términos económicos, satisfacer las necesidades de una población de tamaño pequeño-medio, mediante agua

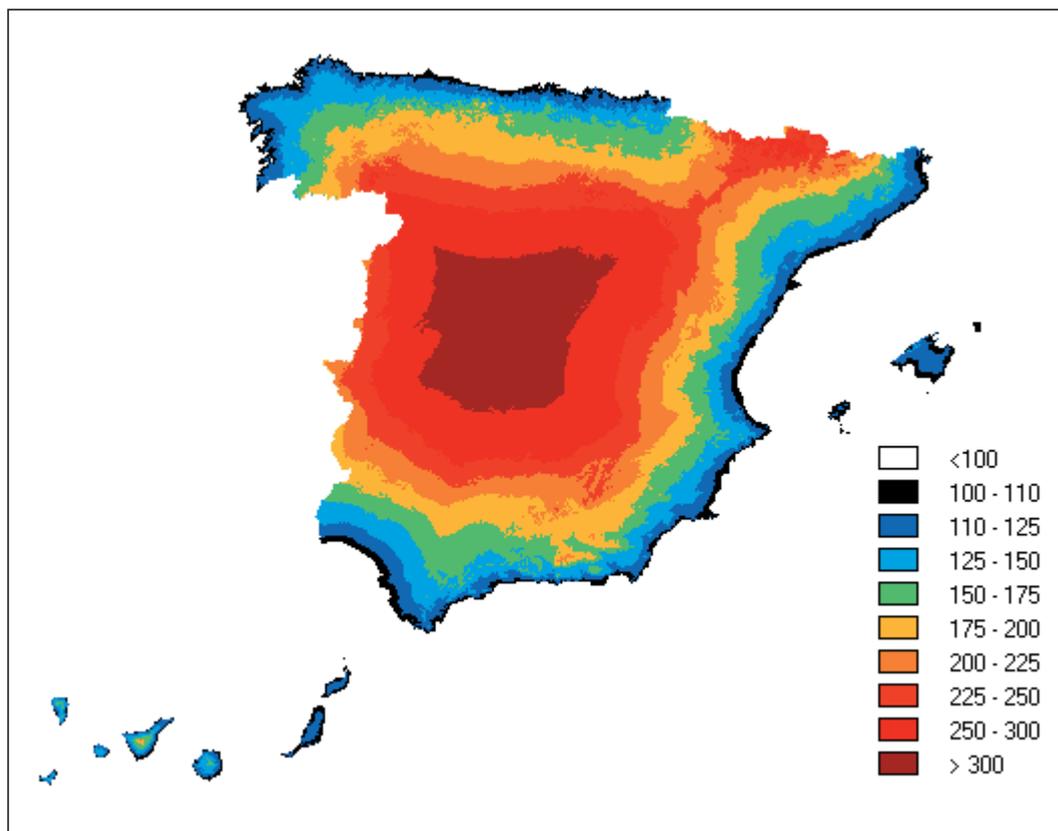


Figura 157. Mapa de costes totales de suministro (producción y transporte) de 10.000 m³/día de agua marina desalada (pta/m³)

del mar desalada. Como se observa, y con carácter general, sólo las poblaciones relativamente próximas a la costa -a menos de unos 50 kms- podrían tener costes inferiores a las 150 pta/m³, mientras que a partir de los 150 kms los costes se elevan, superando las 200 pta/m³.

Para obtener el precio total del agua para abastecimiento, a estos costes en alta habría que añadir, como se indicó, todos los correspondientes a la distribución en baja propiamente dicha, así como, en su caso, los otros conceptos que suelen incluirse en las tarifas del abastecimiento urbano. Considerando que, como se indica en su correspondiente epígrafe, los costes actuales en alta suelen oscilar entre unas 10 y 40 pts/m³, su sustitución por aguas marinas desaladas implicaría aumentar este coste muy sustancialmente, en varios órdenes de magnitud.

La conclusión final es que, como se apuntó, la desalación de agua del mar puede jugar un papel significativo en el suministro urbano de poblaciones costeras, pero de forma puntual y selectiva dado que sus costes actuales, aunque claramente a la baja en los últimos años, aún se encuentran generalmente lejos de los de otras posibles fuentes alternativas convencionales de suministro. Para los regadíos, estas aguas se encuentran claramente a niveles de coste prohibitivos salvo en situaciones puntuales de muy grave escasez, producciones de alta rentabilidad, y disponibilidad de otras aguas a coste inferior para su mezcla.

Por otra parte, la muy alta dependencia del coste de producción con relación al precio de la energía sugiere una cierta prudencia ante la eventual posibilidad de una generación masiva de estas aguas, y aconseja estratégicamente plantear opciones alternativas de forma que el sistema global de suministro tenga una menor dependencia energética.

En lo relativo al agua salobre, los costes de producción y transporte son apreciablemente inferiores, pero presentan los problemas de su posible agotamiento y cambios de características (es decir, del mantenimiento de su disponibilidad cuantitativa y cualitativa), y de la evacuación de las salmueras generadas en el proceso. Por ello, el estudio de su viabilidad y costes requiere análisis pormenorizados en cada caso concreto.

Para estas aguas sólo se emplean tecnologías de membranas, tanto de ósmosis inversa como de electrodiálisis, en función de las características del agua bruta. Los costes de producción son parecidos en ambas tecnologías, si bien la ósmosis, por su mayor versatilidad, ha experimentado una mayor generalización.

En conjunto, la desalación de agua de mar y salobre supone actualmente una aportación al ciclo hidrológico de unos 220 hm³/año, lo que coloca a España en el primer lugar de Europa, con un 30% del conjunto instalado en todo el continente. Esta producción se distribuye por usos como muestra la tabla 38.

Agua de mar	Uso urbano	89 hm ³ /año
	Uso agrícola	5 hm ³ /año
Agua salobre	Uso urbano y turístico	29 hm ³ /año
	Uso industrial	40 hm ³ /año
	Uso agrícola	58 hm ³ /año

Tabla 38. Distribución por usos de las aguas desaladas marinas y salobres

Están en marcha, además, importantes iniciativas (como las dos plantas de agua del mar previstas por la Mancomunidad de Canales del Taibilla, con 40 hm³/año para abastecimientos en las cuencas del Segura y Júcar, o las planta de agua del mar para redacción de riegos en el Campo de Cartagena, con producciones de 20 hm³/año), que, como veremos, incrementarán a corto plazo estas cifras actuales de forma muy significativa.

La figura 158 muestra los volúmenes de desalación actual por ámbitos de planificación hidrológica.

Asimismo, la figura 159 muestra los municipios con instalaciones actualmente existentes de desalación para abastecimiento urbano.

Aunque el volumen actual de agua desalada es relativamente muy poco importante con respecto a la cifra total de recursos hídricos, hay zonas donde se utiliza en las que significa un alto porcentaje de sus recursos. Así, por ejemplo, en las islas de Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria, el agua desalada representa el 97, 90 y 16%, respectivamente, de sus consumos urbanos totales.

3.1.6. Transferencias de recursos

3.1.6.1. Introducción

Además de los recursos convencionales y no convencionales que se generan internamente en el ámbito de un determinado territorio, y que se han ido examinando en secciones previas, existen situaciones en que se producen transferencias externas, superficiales o subterráneas, entre distintos territorios, lo que da lugar a modificaciones en sus recursos.

Las transferencias superficiales entre distintas cuencas consiguen incrementar los recursos disponibles y atender las demandas existentes en aquellos sistemas de utilización en que, exclusivamente con sus recursos de origen interno, son incapaces de cumplir dicho objetivo.

Existen muchos ejemplos en España de este tipo de transferencias que trasladan recursos de una cuenca para su utilización en otra. Un caso particular lo constituyen las transferencias entre ámbitos territoriales de distintos Planes Hidrológicos de cuenca, siendo la previsión y las condiciones de estas transferencias uno de los contenidos obligatorios del Plan Hidrológico Nacional, de acuerdo con el artículo 43 de la Ley de Aguas.

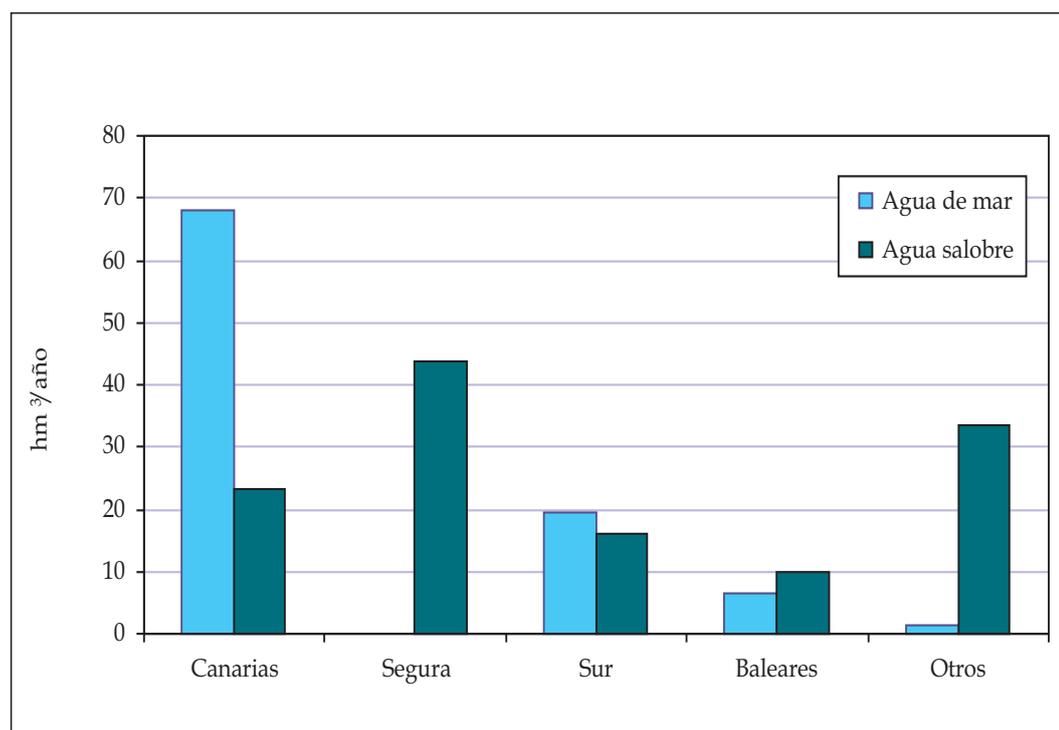


Figura 158. Volúmenes de desalación actual por ámbitos de planificación

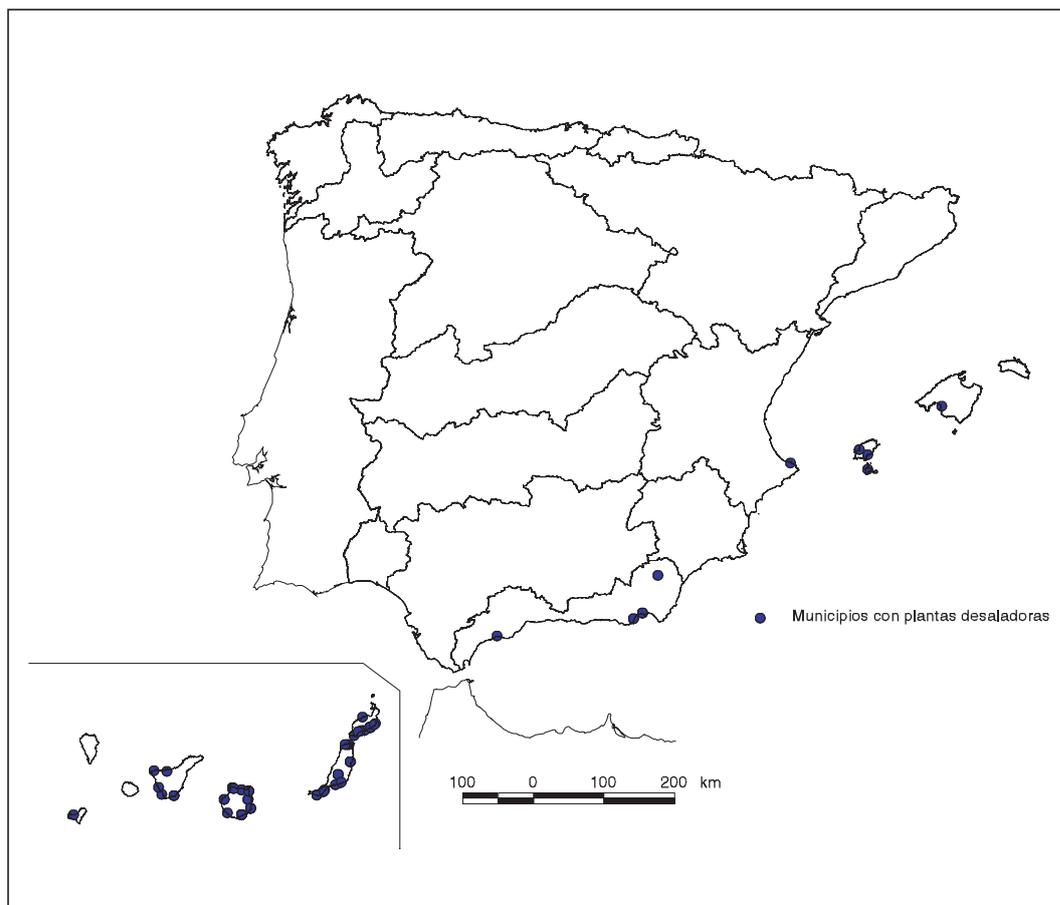


Figura 159. Mapa de municipios con instalaciones de desalación para abastecimiento urbano

Existen, por otra parte, determinados intercambios fluviales con países vecinos, que son también asimilables a una transferencia superficial natural.

Además de las transferencias superficiales, también se presenta el caso de flujos subterráneos que, de modo natural, son transferidos desde algunas unidades hidrogeológicas a otras contiguas, que pueden pertenecer a ámbitos de planificación diferentes y, por tanto, constituir propiamente una transferencia externa. Aunque, obviamente, se trata de procesos bien distintos, y su consideración conjunta resulta inusual, se ha estimado conveniente, a efectos sistemáticos, su inclusión en este apartado.

En los siguientes epígrafes se describen brevemente las principales transferencias superficiales y subterráneas actuales entre los territorios de los distintos Planes Hidrológicos.

3.1.6.2. Transferencias superficiales

Se describirán, en primer lugar, las transferencias naturales, con otros países vecinos, para describir después las artificiales, entre distintos ámbitos de planificación hidrológica.

3.1.6.2.1. Transferencias naturales con otros países

La relación de los ámbitos de planificación que tienen fronteras internacionales y presentan intercambios fluviales es la siguiente.

NORTE I. La frontera con Portugal coincide sensiblemente, bien con divisorias de aguas, bien con cauces, por lo que las transferencias se producen en pocas ocasiones y su cuantía es despreciable si exceptuamos al río Limia que tiene en España una superficie de cuenca del orden de los 1,300 km². Merece destacarse al río Salas, afluente del Río Limia, que en el embalse de su nombre cruza la frontera y a los tres km. vuelve otra vez a España.

NORTE III. Existen dos zonas que pertenecen a las cuencas de los ríos franceses Nive y Nivelles cuyas superficies respectivas son 46.5 km² y 63.9 km².

DUERO. Además del río Duero, con una superficie de cuenca de unos 77,000 km², cruzan la frontera hacia Portugal los ríos Manzanas (438 km²), Sabor (110 km²), Tuela (276 km²), Arzoa (122 km²), Mente (112 km²), San Lorenzo (168 km²) y Támega (681 km²), todos ellos afluentes de la margen derecha. El río Bubal, afluente del Támega, nace en Portugal y a su entrada en España

ya tiene una superficie de cuenca apreciable. En la margen izquierda, existen una serie de arroyos que cruzando de Portugal a España conforman la cabecera de la Rivera Azaba, afluente del río Águeda.

TAJO. La frontera coincide prácticamente en la margen izquierda con el río Erjas y en la derecha con el río Sever, por lo que la única transferencia de recursos es la del propio río Tajo, cuya superficie de cuenca de la parte española es de 55,770 km².

GUADIANA. El río Gévora, con su afluente el Gevorete, nacen en Portugal y pasan a España poco antes de su confluencia con una superficie de cuenca de 55 km², vuelve a Portugal después de captar 583 km² de cuenca en España y tras recorrer 14 km por territorio portugués regresa a España. Hay una zona portuguesa de unos 50 km² que drena hacia el Gévora, mas aguas abajo, a través de una serie de arroyos distribuidos a lo largo de 14 km de frontera, hasta que el río Caia, afluente del Guadiana hace de frontera. Desde la entrada del Guadiana en Portugal hasta que el río Chanza forma frontera, todas las transferencias van de España hacia Portugal y fundamentalmente a través de los ríos Alcarrache (379 km²), Godolid (260 km²), Zaos (237 km²), Ardila (1,837 km²) y Múrtigas (745 km²).

EBRO. Las superficies de las zonas españolas que drenan a Francia son: en la cabecera del río Irati 78 km², en la cabecera del Aragón 9 km², y el río Garona, que tiene su origen en España y al cruzar la frontera ya cuenta con una superficie vertiente de 547 km². Por el contrario, la parte francesa drenada por el Ebro es: la cabecera del Irati con 49 km² y la cabecera del Segre con unos 500 km².

3.1.6.2.2. Transferencias artificiales entre ámbitos de planificación

La transferencia más importante es la que se lleva a cabo mediante el Acueducto Tajo-Segura (ATS), regulado en las Leyes 21/1971 y 52/1980. Permite trasvasar aguas de la cuenca alta del Tajo a las cuencas del Guadiana, Sur, Segura y Júcar. Los volúmenes a trasvasar en una primera fase se fijaron en un máximo de 650 hm³/año, y en una segunda en 1.000 hm³/año. Los recursos trasvasados desde 1979, año en que comienzan los envíos, hasta el año 1996/97, alcanzan una media anual de 263 hm³ (287 si se prescinde de los dos primeros años), con un máximo de 452 hm³ en el año 1996/97. De los recursos trasvasados, 25 hm³ se destinan a los Riegos de Levante Margen Izquierda, 30 hm³ al abastecimiento a poblaciones en la cuenca del Júcar y unos 7 hm³ a la del Sur (la cuantía máxima establecida legalmente es de 15 hm³/año). El resto se utiliza en la cuenca del Segura para abastecimiento de pobla-

ción y regadíos. A efectos de la contabilidad de estas transferencias que se presenta en figuras y tablas posteriores, los Riegos de Levante Margen Izquierda se incluyen en la cuenca del Júcar, ámbito territorial en el que están parcialmente situados, aunque el Plan Hidrológico de esta cuenca no los incorpora por tener sus tomas en la cuenca del Segura.

Además de estas transferencias, y tras la promulgación de la Ley 13/1987, mediante el ATS se transfieren recursos a la cuenca del Guadiana con el fin de proporcionar agua a las Tablas de Daimiel. Los primeros trasvases se realizaron con carácter experimental durante un periodo de tres años, en el que se aportó un máximo de 60 hm³. En 1990 fue prorrogada la vigencia de la Ley por otros tres años y en la misma cuantía de recursos, con una nueva prórroga hasta 1996 (Reales Decretos-leyes 6/1990 y 5/1993). Posteriormente, mediante el Real Decreto-Ley 8/1995, que deroga las disposiciones anteriores, se autoriza una derivación de recursos del ATS para abastecimiento de la cuenca alta del Guadiana con una cuantía media anual, calculada sobre un periodo máximo de diez años, no superior a 50 hm³. Este volumen incluye las dotaciones previstas en las disposiciones citadas para el Parque Natural de las Tablas de Daimiel, que pasan a tener carácter permanente. En el periodo comprendido entre 1987 y 1993 el volumen medio anual transferido ha sido del orden de 10 hm³/año. Asimismo, se reservan 3 hm³/año para abastecimiento de los núcleos de población inmediatos al trazado del ATS en las cuencas de los ríos Guadiana y Júcar.

Entre los ámbitos del Ebro y Norte III existen tres transferencias. La más importante es el trasvase Zadorra-Arratia, para aprovechamiento hidroeléctrico (central de Barazar) y abastecimiento al Consorcio de Aguas del Gran Bilbao. La concesión es de 9 m³/s y durante el periodo 1985/86-1994/95 el volumen medio trasvasado ha sido de unos 180 hm³/año. El trasvase Cerneja-Ordunte transfiere unos 9 hm³/año para el abastecimiento de Bilbao y mediante el trasvase Alzania-Oria se trasvasa algo más de 1 hm³ para aprovechamiento hidroeléctrico.

Entre los ámbitos del Ebro y Norte II se produce asimismo una transferencia de recursos mediante el trasvase Ebro-Besaya, concebido para completar los recursos del río Saja con volúmenes regulados en el embalse del Ebro, que son restituidos en épocas de aguas altas, manteniendo un saldo interanual nulo. Desde 1986 hasta la fecha los volúmenes transferidos en ambos sentidos han sido de unos 4 hm³/año

Existen otras dos transferencias desde el Ebro a las Cuencas Internas de Cataluña. El trasvase Ebro-Campo de Tarragona tiene por objeto el abastecimien-

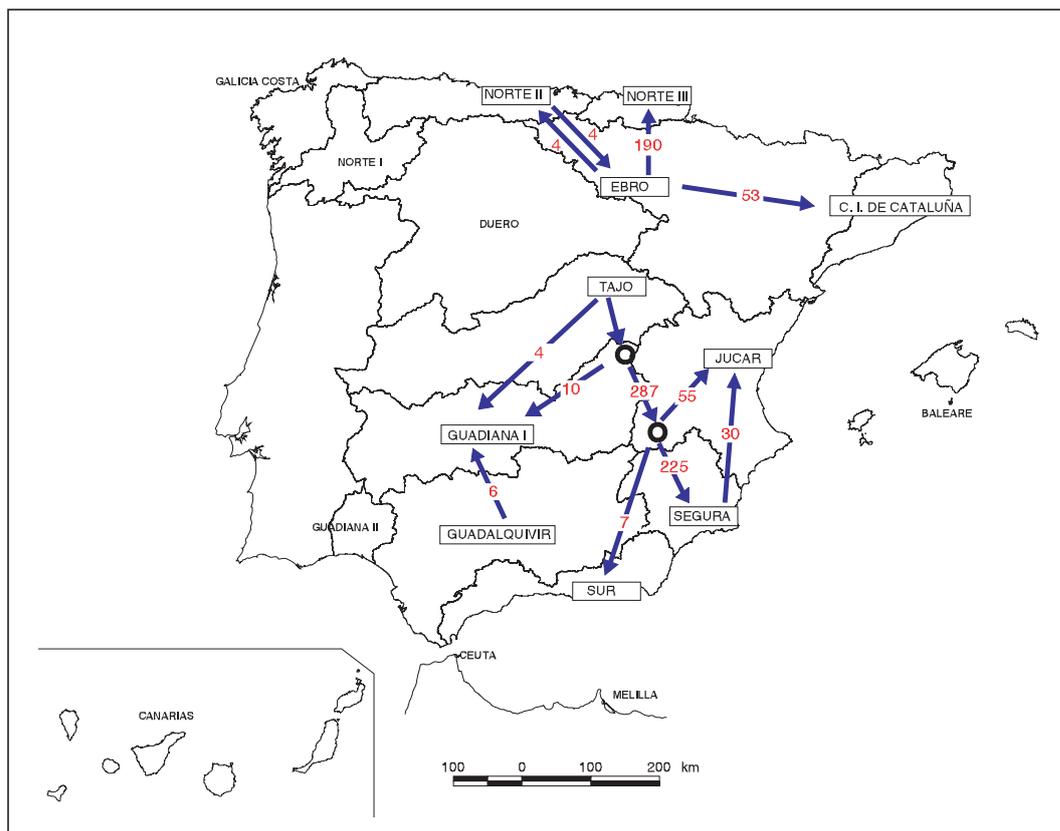


Figura 160. Mapa con los esquemas de las principales transferencias superficiales actuales

to urbano e industrial de la zona del Campo de Tarragona. La concesión actual es de 90 hm³/año, y durante el periodo 1993-1996 se trasvasaron unos 46 hm³/año en valor medio. El trasvase Ciurana-Riudecañas se utiliza para regadíos y abastecimiento de población en la comarca de Reus, y puede cifrarse en unos 7 hm³/año.

Desde la cuenca del Segura se transfieren también 30 hm³/año de recursos propios a la cuenca del Júcar: 15 para Riegos de Levante Margen Izquierda, y otros 15 para el abastecimiento de poblaciones.

La cuenca del Guadiana recibe unos 4 hm³/año de la cuenca del Tago para abastecimiento a la Mancomunidad del Algodor y otros 6 hm³/año desde el Guadalquivir para abastecimiento de Valdepeñas, Santa Cruz de Mudela y Mancomunidad de Sierra Boyera

Existen otros trasvases de menor entidad desde el Tago al Guadiana para abastecimiento de la Mancomunidad del Alcuéscar, y desde el Guadiana al Guadalquivir para abastecimiento de las mancomunidades de Llerena y Tentudía. Con carácter excepcional se ha enviado mediante barco una media de 5 hm³/año a Baleares (Bahía de Palma) desde el Delta del Ebro (Consortio de Aguas de Tarragona) durante los años 1995-97.

En la figura 160 se representan esquemáticamente las principales transferencias superficiales actuales, con indicación de sus valores medios realmente transferidos en los últimos años.

3.1.6.3. Transferencias subterráneas

En España existen numerosísimos ejemplos de flujos subterráneos que de modo natural son transferidos desde algunas unidades hidrogeológicas, en general de naturaleza carbonatada, a otras contiguas. Pueden citarse las del acuífero de Vildé a la cubeta de Almazán, que afloran al Duero en Gormaz, la conexión subterránea entre las cuencas del Carrión y del Pisuerga por el vaso del embalse de Camporredondo, la alimentación de la Sierra de Altomira y del Campo de Montiel a la Llanura Manchega, los aportes que recibe la vega de Granada de los macizos circundantes, los flujos perimetrales de entrada a la Plana de Valencia, del Cardó al delta del Ebro... etc. Tal como ya se indicó en un epígrafe anterior se evalúa aproximadamente en unos 1.200 hm³/año el agua total que se transfiere entre unidades hidrogeológicas en España.

Hay asimismo diversos casos de transferencias subterráneas entre ámbitos de distintos planes, que tienen lugar en las unidades hidrogeológicas compartidas. Los flujos transferidos son de pequeña entidad, pero tiene interés indicar algunos de los más significativos, que se muestran en la tabla 39.

Las transferencias subterráneas mostradas en la tabla anterior no son todas las existentes sino algunas de las más importantes. Por ejemplo, estimaciones de mayor detalle realizadas en acuíferos como el de Araviana-Moncalvo (Sanz Pérez, 1987) muestran unas transfe-

Cuenca cedente	Cuenca receptora	Unidad hidrogeológica	Transferencia (hm ³ /año)
Duero	Ebro	Araviana-Moncayo	10
Guadalquivir	Sur	Sierra de Libar	5
Guadalquivir	Sur	Setenil-Ronda	3
Sur	Guadalquivir	Sierra Gorda-Zafarraya	30
Guadalquivir	Sur	Sierra de Padul	10
Ebro	C.I.Cataluña	Cardó-Perelló	20
Tajo	Ebro	Albarracín-Cella-Molina de Aragón	20
Júcar	Ebro	Albarracín-Cella-Molina de Aragón	10

Tabla 39. Transferencias subterráneas entre ámbitos de planificación

rencias (20 hm³/año) mayores que las reflejadas en la mencionada tabla. Es también digna de mención la transferencia de unos 15 hm³/año del río Ebro a la cabecera del río Arlanza en la cuenca del Duero.

3.1.6.4. Transferencias totales

De acuerdo con lo expuesto en los epígrafes anteriores, las transferencias entre ámbitos de distintos Planes Hidrológicos, tanto superficiales como subterráneas, son las que se resumen en la tabla 40.

Como ya se ha indicado, estos valores corresponden a transferencias reales representativas de lo sucedido en los últimos años, y no a los volúmenes que legalmente podrían ser transferidos conforme a las disposiciones reguladoras de las distintas transferencias.

3.1.7. Disponibilidades totales

En secciones anteriores se han examinado las disponibilidades reguladas mediante los embalses de superfi-

cie, la situación de explotación de las aguas subterráneas, el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, la recarga artificial, la reutilización, la desalación y las transferencias superficiales y subterráneas.

Los recursos internos disponibles en cada cuenca, convencionales y no convencionales, junto con las transferencias que le afectan, configuran la oferta de recursos disponibles totales con que atender las diferentes necesidades de agua.

En la tabla 41 se resume parte de la información obtenida y presentada en los epígrafes precedentes. El volumen regulado en embalses corresponde al caso tipo representativo de modulación variable de la demanda, déficit admisibles del 50, 75 y 100% de la demanda anual y retornos del 20% de la demanda atendida, con una disminución del 5% de la capacidad de los embalses para tener en cuenta el efecto de los resguardos destinados al control de avenidas. Debe asimismo tenerse en cuenta el efecto de sobreestimación por grandes embalses de cola en algunas cuencas, al que se hizo referencia en epígrafes anteriores.

Ámbito	Transferencias de otros ámbitos (hm ³ /año)			Transferencias a otros ámbitos (hm ³ /año)		
	Superficial	Subterránea	Total	Superficial	Subterránea	Total
Norte I						
Norte II	4		4	4		4
Norte III	190		190			
Duero					10	10
Tajo				301	20	321
Guadiana I	20		20			
Guadiana II						
Guadalquivir		30	30	6	18	24
Sur	7	18	25		30	30
Segura	225		225	30		30
Júcar	85		85		10	10
Ebro	4	40	44	247	20	267
C.I. Cataluña	53	20	73			
Galicia Costa						
Baleares						
Canarias						
Total	588	108	696	588	108	696

Tabla 40. Transferencias totales de recursos entre ámbitos de planificación

	Volumen regulado en embalses (hm ³ /año)	Bombeo actual de aguas subterráneas.	Reutilización directa (hm ³ /año)	Desalación de agua de mar (hm ³ /año)	Transferenc. superficiales (hm ³ /año)	Indicador de cota máxima actual total (hm ³ /año)
Galicia Costa	1.223					1.223
Norte I	3.937					3.937
Norte II	1.870	19			+4-4	1.889
Norte III	353	33			+190	576
Norte	7.383	52			+194-4	7.625
Duero	6.095	371				6.466
Tajo	5.845	164			-301	5.708
Guadiana I	1.922	738			+20	2.680
Guadiana II	228	76				304
Guadiana	2.150	814	5		+60	2.984
Guadalquivir	2.819	507	12		-6	3.332
Sur	359	420	19	20	+7	825
Segura	626	478	56		+225-30	1.355
Júcar	2.095	1.425	83		+85	3.688
Ebro	11.012	198	6		+4-247	10.973
C.I. Cataluña	791	424	6		+53	1.274
Total Península	39.175	4.853	187	20		44.230
Baleares		284	26	6		316
Canarias		395	20	68		483
Total España	39.175	5.532	233	94	+588-588	45.029

Tabla 41. Síntesis de disponibilidades hídricas teóricas

El aprovechamiento de aguas subterráneas se refiere a los actuales valores de bombeo. Lo mismo sucede en el caso de la reutilización directa y la desalación. En este último caso sólo se ha incluido la procedente de agua de mar, pues el bombeo total incluye al de aguas salobres.

Asimismo, los valores de las transferencias corresponden, como se indicó, a un promedio representativo de los volúmenes reales transferidos en los últimos años.

Las cifras de la tabla solo pretenden dar un marco de referencia en cuanto a las actuales disponibilidades de agua, y no son aditivas (no pueden sumarse de forma directa), siendo éste uno de los errores que se han cometido en ocasiones al intentar homogeneizar y presentar la información sobre los recursos hídricos.

En efecto, los volúmenes regulados en embalses se han evaluado, como se dijo, en un supuesto teórico de utilización apropiatoria y exclusiva de las aportaciones superficiales totales. El aprovechamiento de las aguas subterráneas podría lógicamente afectar a estos volúmenes, por lo que no pueden sumarse directamente. Tampoco se han considerado en la tabla toda la reutilización indirecta posible, ni los retornos procedentes de la desalación de agua de mar o de los trasvases, que incrementarían la disponibilidad.

Por estas razones se ha titulado la suma de la última columna no como las *disponibilidades totales*, sino

como un *indicador de la cota máxima* actual de estas disponibilidades totales.

Así, y ciñéndonos a los recursos convencionales, una primera estimación de las disponibilidades convencionales totales reguladas actuales sería la suma de la regulación en embalses más los bombeos de aguas subterráneas, ya que toda la explotación subterránea es obviamente regulada (los bombeos se activan cuando se desea).

Esta estimación simple no es enteramente rigurosa, pues parte de la regulación por bombeos podría quedar embebida en la ofrecida por los embalses, aunque es improbable que ésto suceda dada la diferencia de precios del agua en ambos casos. Además, estos bombeos podrían disminuir las aportaciones entrantes a los embalses si se sitúan en acuíferos que drenan hacia ellos, y, en consecuencia, mermar la cifra de regulación superficial.

En cualquier caso, la suma de los dos conceptos es una buena estimación no de las disponibilidades convencionales, sino de una *cota superior* de las mismas, y como tal debe interpretarse. La adición de los recursos no convencionales opera en general en el mismo sentido, aunque algunos efectos no cuantificados podrían incluso incrementar este indicador (p.e. los retornos de las transferencias o el uso conjunto).

Las cifras obtenidas pueden servir para acotar el nivel de los recursos totales actualmente disponibles, y su

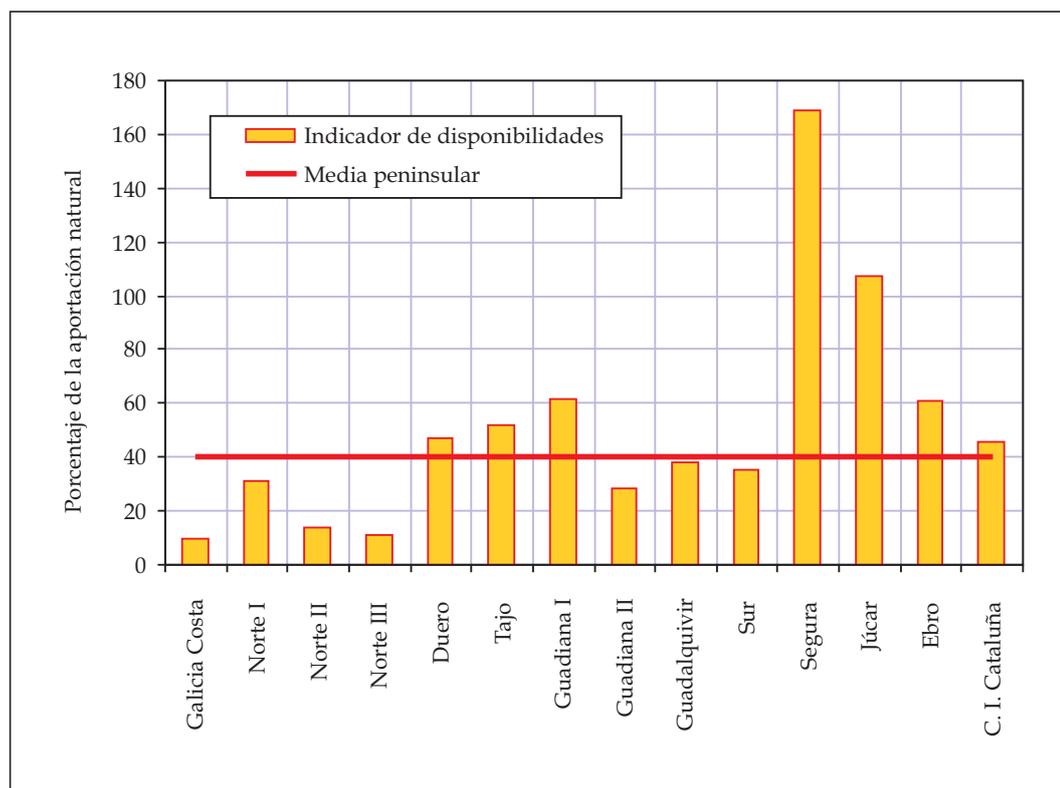


Figura 161. Relación entre los indicadores de cotas máximas de disponibilidades hídricas, y los recursos totales en régimen natural, por ámbitos de planificación

comparación con los recursos naturales de cada ámbito proporciona una idea muy encajada del grado de desarrollo relativo de las distintas cuencas desde el punto de vista de sus posibilidades de oferta hídrica.

Así, la figura 161 muestra la relación entre las cotas máximas de disponibilidades obtenidas y los recursos totales en régimen natural, y puede considerarse como un paso más sobre la anteriormente ofrecida de regulación en la situación teórica analizada, en la que se consideraba únicamente la acción de los embalses de superficie.

Como puede verse, las disponibilidades medias peninsulares son similares a las anteriores (del orden de un 40%), pero las diferencias entre cuencas aparecen ahora mucho más marcadas.

Destacan muy especialmente las cuencas del Segura y Júcar, donde existen unas disponibilidades máximas teóricas similares o superiores a sus recursos naturales, lo que resulta explicable considerando las transferencias externas y el intenso desarrollo de los recursos subterráneos y no convencionales. Puede afirmarse que, en principio y con carácter general, estas cuencas están bien desarrolladas en lo que a grandes equipamientos de regulación y bombeo de aguas subterráneas se refiere, hacen un uso muy intensivo de sus recursos, y no precisarán de nuevas grandes presas ni aumento de captaciones subterráneas para incrementar significativamente sus disponibilidades, pues éstas no admiten ya prácticamente ningún incremento por la

vía convencional, y solo las fuentes no convencionales podrían incrementarlas marginalmente.

Las cuencas del Ebro, Guadiana, Tajo, Duero y C.I. de Cataluña se encuentran a continuación en cuanto a nivel de disponibilidades, con valores del orden del 50% de sus recursos naturales, y superiores a la media peninsular, por lo que, pese a su buen nivel actual de disponibilidad, presentan aún márgenes importantes para posibles desarrollos futuros o reservas ambientales. Hay que hacer notar, no obstante, que en el caso de los grandes ríos internacionales (Duero, Tajo y Guadiana) existen unos requerimientos especiales, por su carácter transfronterizo, que matizan esta posibilidad.

En el otro extremo, Galicia Costa, Norte II y Norte III son los ámbitos que presentan un nivel de disponibilidades menor en relación a su aportación natural, lo que resulta explicable considerando el gran volumen de recursos medios de estas cuencas frente a sus relativamente reducidas necesidades actuales.

Todo lo dicho ha de considerarse, obviamente, como una aproximación de carácter indicativo, y en modo alguno como resultados firmes y concluyentes. No obstante, la homogeneidad y rigor de las determinaciones y la unidad de tratamiento que se ha dado permite, aún con tal carácter indicativo, hacerse una cabal idea de la actual situación relativa de las diferentes cuencas desde el punto de vista del desarrollo de sus disponibilidades hídricas.

Es importante notar que estos *indicadores de disponibilidad* se han obtenido exclusivamente del análisis de los recursos hídricos, que es el que se ha realizado hasta ahora, y sin considerar la situación de las demandas de agua en las cuencas. El análisis realizado y los resultados obtenidos no deben confundirse, pues, con el de los posibles balances hídricos de estas cuencas, cuestión que será abordada en otras secciones del Libro.

En efecto, puede darse el caso de ámbitos con indicador de disponibilidades muy elevado, y que sin embargo presenten situaciones de déficit, por superar sus demandas incluso a estas elevadas disponibilidades. Por contra, puede haber ámbitos con indicador de disponibilidades muy bajo, y en los que haya abundancia y superávit de recursos, si las demandas existentes se satisfacen ampliamente con este nivel de disponibilidad e incluso con niveles inferiores.

El sistemático análisis de disponibilidades realizado apunta sólo, como se indicó, a mostrar el grado relativo de su desarrollo en las distintas cuencas, y a señalar aquellas en las que, razonablemente y a escala global, no caben mayores expansiones significativas de la *oferta* de recursos mediante elementos de regulación y captación de aguas subterráneas en el futuro. Sí podrían requerirse, por contra, elementos internos de redistribución y reequilibrio orientados a proporcionar redundancias y mejorar las garantías de servicio, o, en su caso, fuentes no convencionales de nuevos recursos (como la desalación o transferencias externas) si se detectasen situaciones de déficit, pero éste análisis es, como se mostró, de distinta naturaleza al hasta ahora ofrecido.

3.1.8. Las Incertidumbres del futuro

Entre las distintas incertidumbres que se ciernen sobre el futuro de los recursos hídricos en nuestro país, se comentarán brevemente las consecuencias de la variabilidad natural del registro hidrológico, y de los posibles efectos de un cambio climático de origen antropogénico.

3.1.8.1. La variabilidad hidrológica natural

Como se ha visto y reiterado en secciones anteriores, los registros hidrológicos presentan una importante variabilidad tanto espacial como temporal. En esas secciones se estudió con detalle la estructura espacio-temporal de las aportaciones naturales totales anuales a escala global, y en los distintos ámbitos territoriales de la planificación hidrológica, así como las rachas secas y húmedas observadas en las distintas regiones. Este análisis se extendió al periodo de 56 años comprendido entre los años hidrológicos 1940/41-1995/96.

En este epígrafe, se mostrará la incertidumbre existente asociada a la variabilidad hidrológica natural, y la longitud de tales muestras hidrológicas. Para ello se analizará, en primer lugar, la influencia del tamaño muestral sobre la estimación de los recursos medios, en el periodo con abundancia de datos disponibles (periodo estándar, con series desde el año 1940/41). Tras ello, se extenderá el análisis a periodos más largos pero con menor número de datos disponibles, estudiando las rachas de series largas existentes de precipitación y aportaciones naturales.

3.1.8.1.1. Incertidumbres asociadas a la longitud de los registros disponibles

Centrando nuestra atención en las aportaciones totales en régimen natural, es importante retener que su variabilidad aleatoria natural constituye *una fuente de incertidumbre intrínseca*, debida a la longitud de las series empleadas y la necesidad de inferir propiedades poblacionales a partir de muestras reducidas.

Para acotar cuantitativamente este efecto con un ejemplo significativo, y considerando los datos estándar, desde el año 1940/41, la figura 162 muestra la evolución de la estimación de la media de las aportaciones totales en régimen natural en la España peninsular, y de la incertidumbre en la estimación de esa media, según el año en que se hubiese llevado a cabo tal estimación. Esta incertidumbre se expresa mediante los límites de confianza del 95%, obtenidos a partir del error estándar de la media.

Como puede verse, la estimación de los recursos medios habría evolucionado, admitiendo la serie de partida, desde 120 hasta 105 km³/año, y desde finales de los 70 hubiese sido decreciente año a año hasta 1995, en que aumenta ligeramente hasta alcanzar los 110 actuales. Asimismo, esta estimación actual de 110 km³/año tiene incluso, como puede verse, un margen de incertidumbre estadística del orden de +/- 10 km³/año para el 95% de nivel de confianza, pues el error estándar de la media es actualmente del orden de 5 km³/año, es decir, algo inferior al 5%.

Si el mismo análisis se realiza a la escala de los ámbitos de planificación hidrológica, se comprueba que los errores estándar de la estimación de sus recursos medios oscilan entre el 3% de las cuencas del Norte y el 12% del Guadiana II.

En definitiva, existe una imprecisión intrínseca del conocimiento de los recursos, debida a la ventana temporal de observación (muestras disponibles) de los registros hidrológicos, que, aunque no modifica las cuantías de la actual evaluación de los mismos, infor-

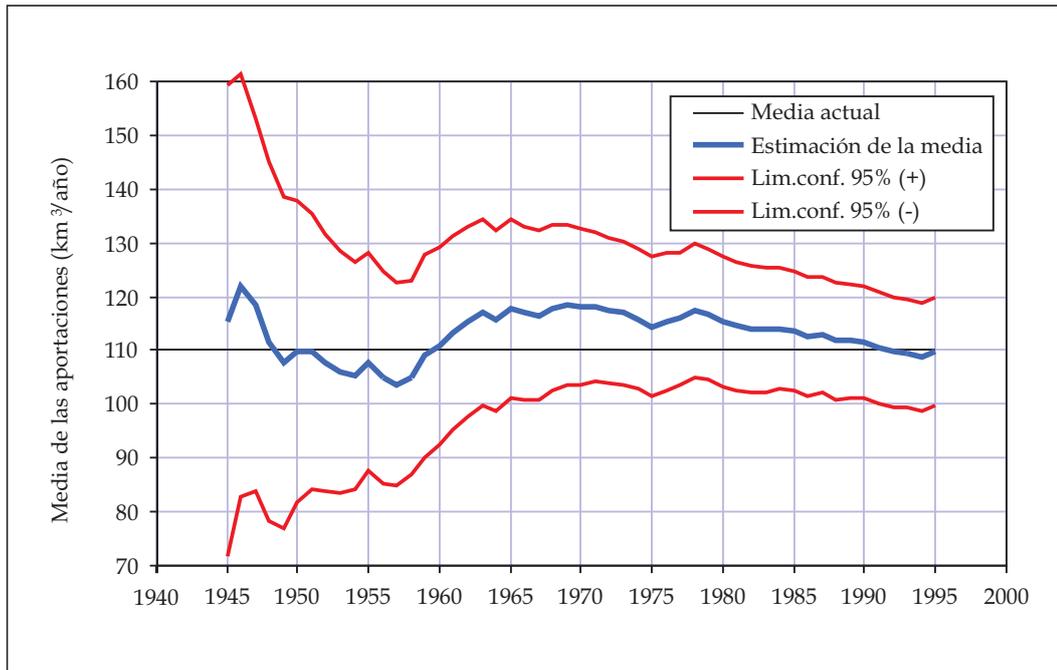


Figura 162. Evolución de la estimación de la media de aportaciones totales anuales en régimen natural en la España peninsular y su incertidumbre asociada

ma sobre la magnitud de su incertidumbre, y alerta sobre la necesaria prudencia y ponderación de juicio en el análisis de los sistemas hídricos.

Tal variabilidad natural no incorpora obviamente efectos "no naturales" como serían los debidos al hipotético cambio climático de origen antropogénico, que será estudiado en siguientes secciones.

3.1.8.1.2. Incertidumbres asociadas a la variabilidad a largo plazo

Además de esta indeterminación por la ventana temporal de observación, se ha comprobado la existencia en el pasado -sin cambio climático antrópico- de variaciones multi-decadales, con diferencias apreciables entre tales periodos, aunque el análisis estadístico de esta variabilidad, en las muestras disponibles, no permita rechazar nítidamente la hipótesis de estacionariedad de las series hidroclimáticas. El estudio histórico y paleoclimático, antes de la era de mediciones instrumentales, muestra asimismo grandes oscilaciones del clima en el pasado, con continuas alternancias de periodos fríos y cálidos, secos y lluviosos. Una interesante descripción de estas oscilaciones climáticas en España es la ofrecida por Font Tullot (1988).

Desde un punto de vista científico, acaso los procesos de ruidos fraccionales, de memoria infinita, o la variación caótica de los niveles de humedad y atmosféricos medios a escala multianual (Rodríguez-Iturbe, 1991), puedan describir o aportar alguna explicación sobre estos fenómenos naturales. Los viejos efectos bíblicos de Noé (valores inesperadamente altos de lluvias con-

tinuas durante cuarenta días y cuarenta noches), y de José (rachas alternas muy largas - 7 años - de plagas y vacas flacas, y de vacas gordas), vuelven a nuestra memoria, como expresiones clásicas de esta variabilidad natural, treinta años después de que fuesen brillantemente formulados en la moderna literatura hidrológica (Mandelbrot y Wallis, 1968).

Para intentar acotar las incertidumbres debidas a la ventana temporal estándar, es necesario analizar, siquiera someramente, la posibilidad de extender esta ventana con las series más largas disponibles. Ello implicará una cierta pérdida de representatividad espacial, al tratarse de un conjunto de registros notablemente inferior al del periodo estándar, pero, admitiendo esta pérdida, es de interés su estudio, pues permitirá comprobar efectos de no homogeneidad de los registros (saltos o tendencias), y matizar, en su caso, nuestra estimación actual estándar, al alza o a la baja, comparando los valores medios relativos de los distintos periodos.

Sin considerar indicadores proxy (como registros sedimentarios, anillos de los árboles u otros testigos biofísicos), y centrándonos exclusivamente en los datos hidrometeorológicos registrados disponibles, se estudiará, en primer lugar, el registro pluviométrico, para abordar después el de caudales fluviales.

3.1.8.1.2.1. Variabilidad de las lluvias

En las secciones dedicadas al análisis de las redes meteorológicas se mostraron unos gráficos con la evolución del número de estaciones pluviométricas existentes en

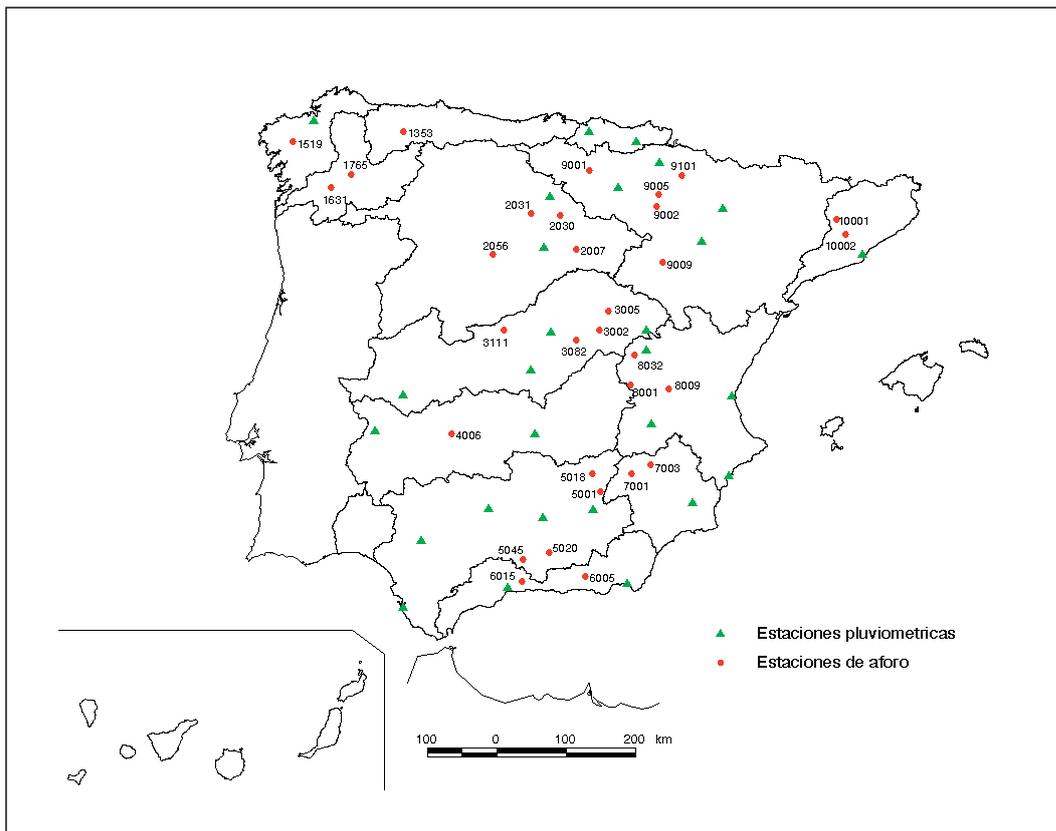


Figura 163. Mapa de estaciones con series largas seleccionadas

España a lo largo del siglo XIX y del siglo XX. En el gráfico del XIX puede observarse que desde 1840 existían 2 estaciones operativas, desde 1862 existían 21 estaciones, y desde 1910 existían 44 estaciones. El examen de estas series antiguas, recopiladas por el INM y completadas y homogeneizadas por este Organismo (INM, 1996), nos ha permitido seleccionar un conjunto de 27 series pluviométricas muy completas y de suficiente calidad, con datos desde 1910. De ellas, un subconjunto de 14 series tiene datos muy completos desde 1868, y de ellas, una (San Fernando) tiene datos muy completos desde 1839.

El mapa de la figura 163 muestra la situación de las 27 estaciones pluviométricas seleccionadas, y permite apreciar su buena distribución espacial, lo que permite considerarlas razonablemente representativas de todo el territorio. Se han incluido asimismo otras estaciones foronómicas que se comentarán más adelante.

Para analizar el comportamiento de estas series largas, la figura 164 muestra las desviaciones unitarias acumuladas de los 4 conjuntos de datos: serie única de San Fernando, serie media de las 14 (M 14), serie media de las 27 (M 27), y serie media del total peninsular areal en el periodo estándar (1940/41-1995/96), mostrada en secciones anteriores. Dada la distribución espacial de las estaciones, tal simple media aritmética es un estimador razonable del valor promedio areal peninsular.

Como puede observarse, y pese a la variabilidad perceptible a distintas escalas, los 4 conjuntos de series parecen seguir patrones similares en los periodos temporales en que son coexistentes, lo que reafirma su representatividad. Puede verse, asimismo, que el periodo seco desde el año 1940 hasta mediados de los 50, que ya se había detectado en el análisis de rachas de la serie estándar, parece ser la culminación de un ciclo mucho más largo, estable o ligeramente seco, que arrancaría a principios del siglo, con una ligera recuperación húmeda en la década de los 30. Los últimos 20 años del siglo XIX pueden considerarse húmedos, con un comportamiento similar a la reciente racha desde mediados de los 50 hasta finales de los 70. Los diez años anteriores (1870-1880) fueron, a su vez, una racha seca, y es aventurado realizar ninguna hipótesis del periodo anterior, dado que solo se dispone de datos de una estación.

En síntesis, el registro histórico de los últimos 130 años de datos pluviométricos parece mostrar importantes oscilaciones a escalas decadales, similares o incluso mayores que las de nuestro periodo estándar de análisis. Además, el valor medio de serie de lluvias anuales en los últimos 130 años (serie M 14) es del orden de un 2.5% superior al de la misma serie en ventana temporal ordinaria de los planes hidrológicos de cuenca (1940-1985), y un 1.3% superior al de la misma serie en la ventana temporal estándar de este

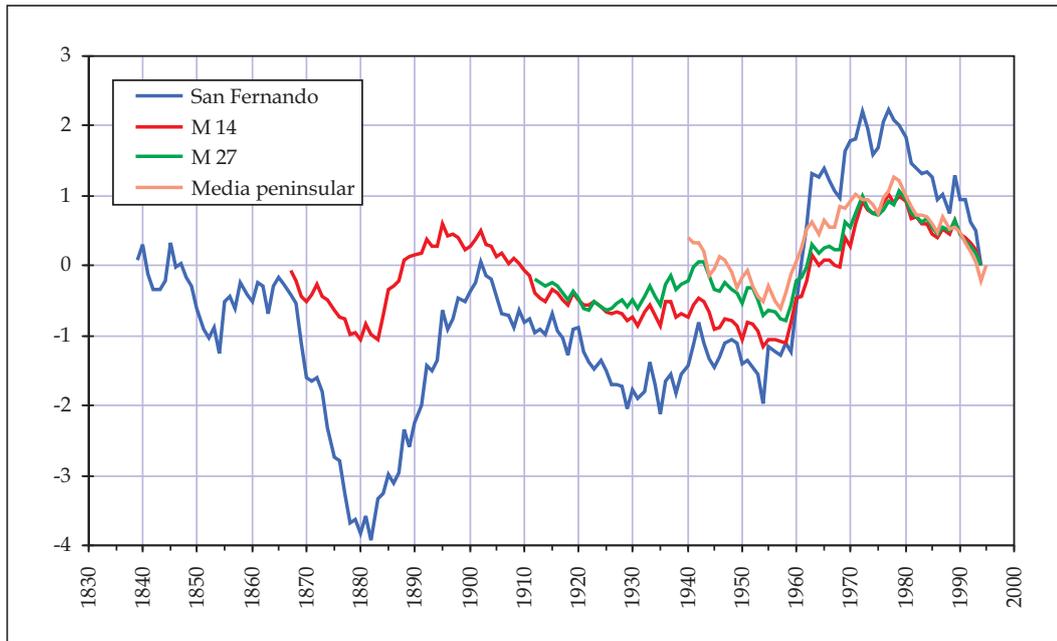


Figura 164. Rachas de la precipitación media anual en España con series largas, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

Libro Blanco (1940-1995). Estos valores se reducen al 1.8 y 0.5% respectivamente con la ventana de 83 años proporcionada por la serie M 27. Empleando como ventana de comparación la del periodo 1961-90 (últimos 30 años climáticos de referencia CLINO, según los treintenios estándar recomendados por la OMM), esta ventana resulta ser un 4.1 (3.3)% más húmeda que la M 14 (M 27).

No es descartable, en suma, que las oscilaciones pluviométricas seculares observadas hayan inducido en la respuesta hidrológica una sensible variabilidad hiperanual, superior a la perceptible en las ventanas estándar, o que tales ventanas empleadas en la planificación arrojen resultados inseguros, superiores en media a los del periodo largo completo. En ambos casos subyace, en definitiva, el problema de una posible falta de representatividad de las series hidrológicas.

A analizar tal posibilidad, relevante para nuestra planificación hidrológica, se destina el epígrafe siguiente.

3.1.8.1.2.2. Variabilidad de los caudales

Es esperable que las rachas secas y húmedas de las aportaciones naturales, a escala peninsular, presenten patrones multianuales de comportamiento similares a los de las precipitaciones que las generan, aunque con diferencias a menor escala temporal debido a los efectos de no linealidad de la respuesta hidrológica.

Una vez estudiado el comportamiento general de las series largas de lluvias, se realizará un análisis similar para las aportaciones en régimen natural. Para ello, se han seleccionado las estaciones foronómicas

con datos disponibles, no afectadas (al menos hasta tiempos recientes), y con registros relativamente completos, cuya evolución de número es la mostrada en la figura 165.

Se observa que empieza a haber algunas estaciones en 1912, y hasta los años 40 no aumenta sensiblemente su disponibilidad. De todas ellas, existen 2 con series anuales con más de 75 años completos desde el año 12, mientras que hay 7 con 65 años completos. El mapa anteriormente mostrado permite ver la situación de las 30 estaciones inicialmente seleccionadas. Sin refinar más el análisis, y limitándonos a obtener una primera impresión de su comportamiento, se han representado en la figura 166 las series de desviaciones unitarias acumuladas correspondientes al conjunto de 2 (M 2), al conjunto de 7 (M 7) y al conjunto de todas las disponibles. En los tres casos, y para obviar los problemas de escala, se ofrecen las medias de los datos específicos (aportación/superficie drenada) y de los datos unitarios (divididos por la media) de las estaciones. Se ha representado, también, la aportación total peninsular obtenida con el modelo distribuido para el periodo estándar, ofrecida en epígrafes anteriores.

Puede verse que, pese a lo simplificado e imperfecto de este análisis, los patrones multianuales son plenamente coincidentes en todos los casos, y las rachas de aportaciones secas y húmedas son, como era de esperar, básicamente las mismas que las de las precipitaciones medias. En el periodo anterior a 1940 no hay un patrón claramente marcado, observándose cierto estancamiento hasta 1935, en que hay una corta racha húmeda. Los efectos de la ventana de referencia de los

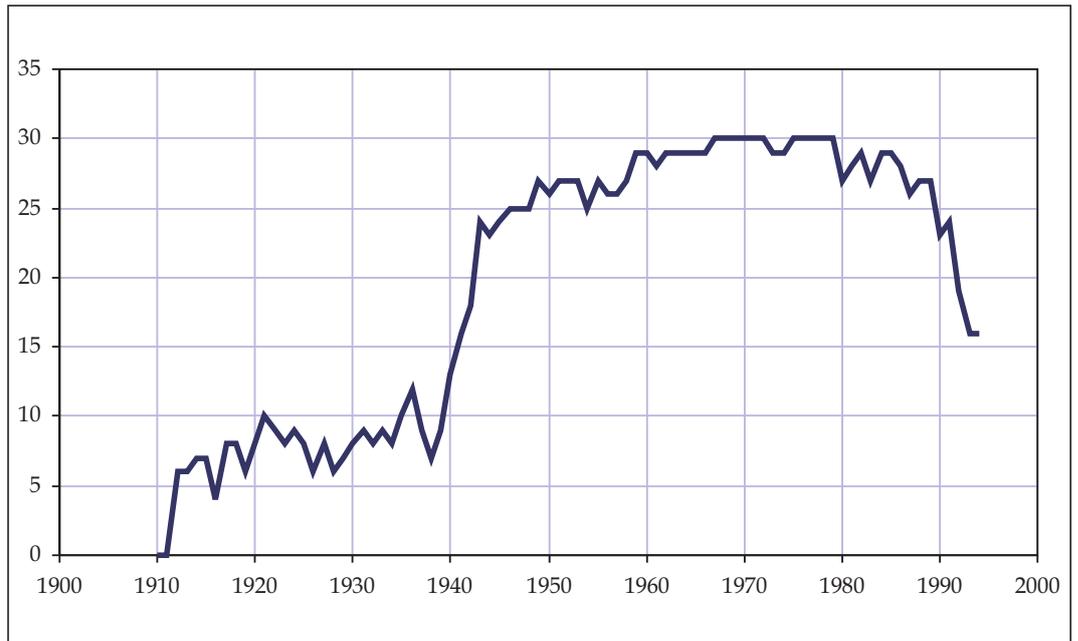


Figura 165. Evolución del número de estaciones foronómicas disponibles con series relativamente completas y no afectadas

Planes (1940-1985) no parecen ser importantes, pues la media de los contrastes de aportaciones específicas de las 7 estaciones más largas resulta ser sólo del 2% (y con apreciable variabilidad entre estaciones), lo que no puede considerarse significativo, y no es posible retrotraerse más en el tiempo por inexistencia de datos.

En definitiva, a la escala global, y con el primer análisis simplificado realizado, no es posible extraer conclusiones respecto a la falta de representatividad de la ventana temporal empleada en los Planes Hidrológicos. El valor global de un 2% por encima del registro largo no resulta significativo, aunque, considerándolo conjuntamente con el 1.8-2.5% de las lluvias, permite inferir que, en efecto, puede tra-

tarse de una ventana ligeramente húmeda con respecto a la total disponible del periodo instrumental.

La ventana estándar de este Libro Blanco resulta ya más parecida a la total, por incluir el efecto de la reciente sequía.

3.1.8.2. Las incertidumbres del cambio climático

3.1.8.2.1. Introducción

Lejos de tratarse de una novedad, la discusión sobre posibles cambios climáticos viene produciéndose

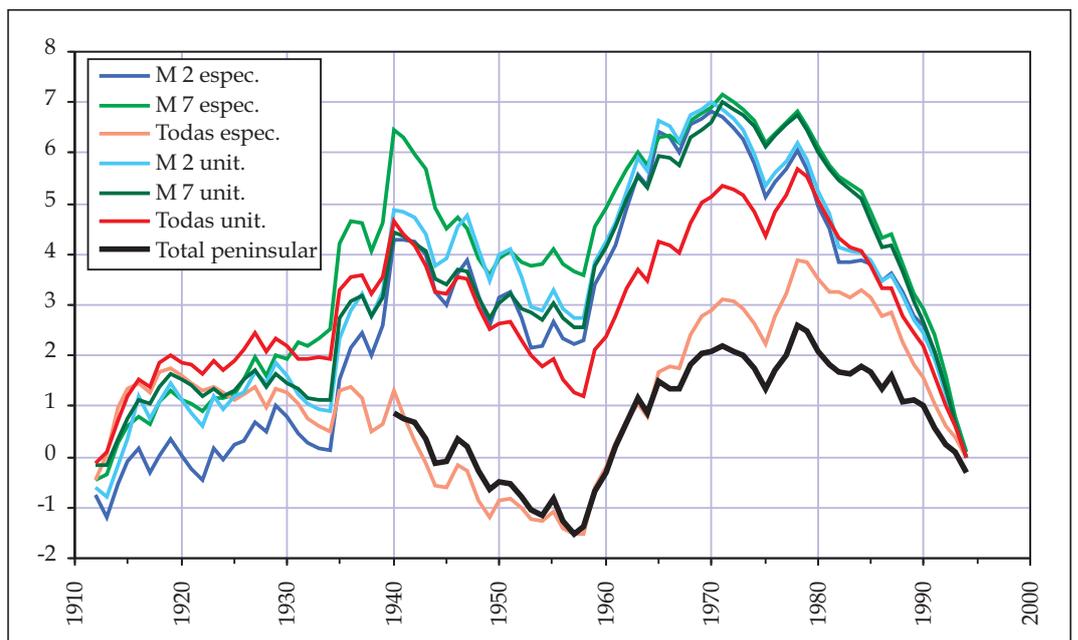


Figura 166. Rachas de aportaciones naturales anuales en España con series largas, a partir de las desviaciones unitarias acumuladas

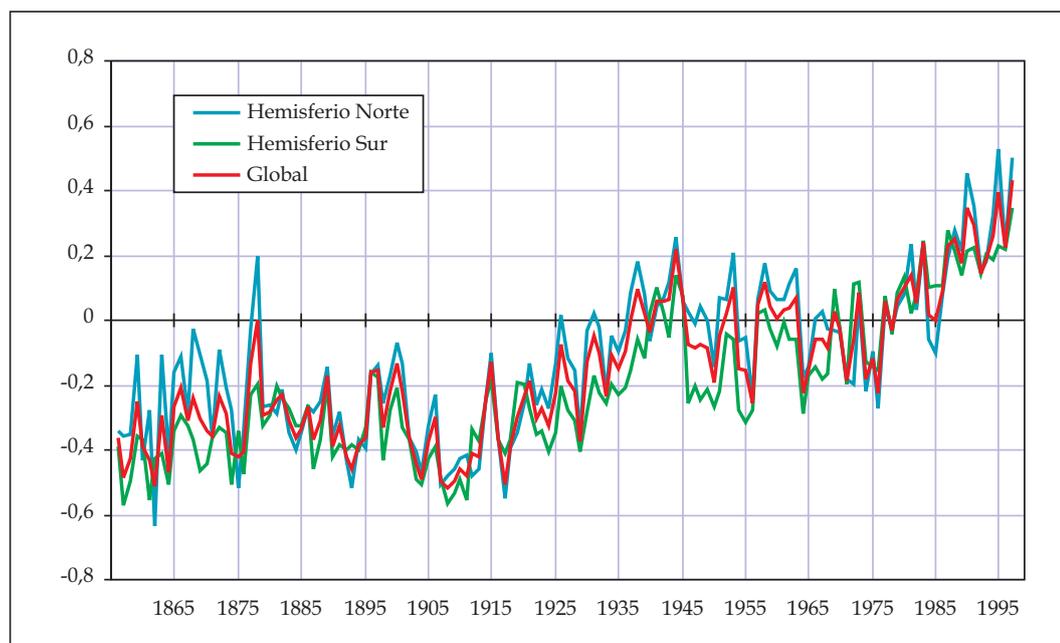


Figura 167. Evolución desde 1855 de la variación de la temperatura media global de la Tierra respecto a la media de la serie (°C)

desde muy antiguo. En España, por ejemplo, fue una polémica de moda a mediados del XIX, tal y como muestran los clásicos trabajos de Rico Sinobas (Font Tullot [1988] p.33). Sin embargo, no es hasta fechas recientes que esta cuestión ha alcanzado un lugar principal en la discusión sobre el futuro de nuestros recursos naturales y la sostenibilidad de su empleo.

Así, en los últimos años se ha producido una gran preocupación científico-social acerca del posible cambio climático inducido por el aumento del contenido del dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Esta preocupación ha dado lugar a importantes iniciativas internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, ratificada por España en 1993 (MIMAM, 1998e).

El fundamento del problema es la probable intensificación del efecto de invernadero natural que tendría como consecuencia un aumento de la temperatura media mundial de la superficie de la Tierra, conocido como calentamiento global, y los complejos procesos atmosféricos relacionados (Linés Escardó, 1990).

La gravedad potencial del problema es creciente al observar que los ritmos de cambio de las tasas de emisión de los GEI han aumentado, en la mayor parte de los casos. En realidad, el aumento de los GEI en la atmósfera y las variaciones de otros factores como son la energía solar entrante, las erupciones volcánicas o las modificaciones del albedo planetario (parte de la energía entrante reflejada hacia el espacio) se cuantifican mediante los denominados "forzamientos radiativos" o alteraciones del flujo neto de energía en

la tropopausa. Los forzamientos asociados a los incrementos de los GEI atmosféricos son positivos y mucho mayores que los asociados a los otros fenómenos, lo que fundamenta la preocupación social existente. Sin embargo, también existen forzamientos negativos. Entre ellos, el más importante y capaz de contrarrestar parcialmente el de los GEI, es el debido a la presencia de aerosoles atmosféricos sulfurosos. Es previsible que su contribución relativa disminuya con el tiempo al estar limitado su ritmo de aumento. Por otra parte, su distribución poco homogénea, localizada geográficamente sobre los grandes focos de contaminación mundial, introduce un factor de incertidumbre.

Los registros climáticos disponibles indican una tendencia hacia un calentamiento global durante el último siglo, con un calentamiento anterior a 1940, un ligero enfriamiento durante el periodo 1940-70 y un calentamiento posterior especialmente notable durante la última década. La figura 167 (elaborada con datos de la Climatic Research Unit de la Universidad de East Anglia) muestra claramente estas tendencias térmicas.

Como se observa, las temperaturas medias del hemisferio norte, del hemisferio sur, y global de la superficie de la Tierra han aumentado entre 0,3 y 0,6 °C, aproximadamente, desde finales del siglo pasado hasta la actualidad. Aunque existe bastante incertidumbre sobre si la tendencia observada es producto de una variación natural del clima, similar a las existentes en el pasado, o si debiera atribuirse, en su mayor parte, al aumento de GEI atmosféricos durante los últimos 200 años, la mayoría de estudios llevados a cabo reflejan que el ori-

gen de la tendencia que muestra el calentamiento observado es poco probable que sea completamente natural. La capacidad para cuantificar la influencia humana sobre el clima mundial es, en la actualidad, limitada, debido a que la señal detectada es una señal que empieza a emerger del ruido de la variabilidad natural (Labajo, 1996), y no resulta aún claramente discernible de ese ruido. Sin embargo, según el Panel Intergubernamental de Expertos para el cambio climático (IPCC), las pruebas y estudios realizados sugieren en conjunto la existencia de una influencia humana detectable sobre el clima global (IPCC, 1995).

Las herramientas utilizadas para investigar todos estos efectos son los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA). En la mayoría de estos modelos existe un cierto acuerdo sobre las tendencias de algunas variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, aunque con una mayor incertidumbre en el caso de esta última.

Una modificación de la temperatura o de la precipitación repercutiría sobre los recursos hídricos de un territorio, pues, a largo plazo, su escorrentía es igual a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. Según los informes de evaluación científica realizados por el IPCC, un incremento de temperatura de uno a dos grados centígrados, unido a una disminución del 10% en las precipitaciones, podría llegar a producir en zonas semiáridas una reducción del 40% al 70% en la escorrentía anual (IPCC, 1995).

Si, de acuerdo con los escenarios climáticos disponibles para España, las precipitaciones medias anuales disminuyen ligeramente y las temperaturas aumentan, se producirá en el futuro una disminución de la escorrentía.

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, modificando la estacionalidad de los flujos.

Si ocurre un cambio climático estos impactos potenciales probablemente tendrán lugar de forma gradual. Aunque la incertidumbre es grande y se necesitará tiempo para confirmar los cambios, ello no impide señalar que la amenaza existe y que es lo suficientemente importante como para que sea tenida en cuenta dentro del marco de la planificación hidrológica.

3.1.8.2.2. Escenarios de precipitación y temperatura

Aunque para evaluar el efecto sobre el clima inducido por el aumento de las concentraciones de CO₂ y otros gases efecto invernadero se han venido utilizando los

MCGA-OA, esto no significa que en su estado de conocimiento puedan proporcionar la distribución espacial y la evolución temporal precisa de la respuesta del sistema climático a una variación en las concentraciones en la atmósfera del CO₂ y otros GEI. No obstante, los MCGA-OA son actualmente las únicas herramientas de que se dispone para obtener los patrones de respuesta climática ante diversas acciones exógenas. 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 que la posibilidad de un cambio climático plantea 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.). Por esta razón se están desarrollando modelos climáticos regionales. Hoy en día se encuentran en sus comienzos y los resultados que proporcionan aún no son suficientemente fiables para utilizarlos como escenarios futuros. En la actualidad sólo se dispone de escenarios regionales obtenidos a partir de los resultados de uno o varios MCGA-OA, con todas las limitaciones y cautelas que ello supone.

Tradicionalmente, esos escenarios climáticos futuros se han generado mediante la técnica de composición de resultados de los MCGA-OA. Así se hace en el documento *Programa Nacional sobre el Clima*. (MOPTMA, 1995c), elaborado por la Comisión Nacional del Clima, donde se analizan los resultados que proporcionan distintas composiciones de modelos.

Con estas composiciones se evalúa el efecto que tendría una duplicación de CO₂ mediante distintos tipos de análisis: de respuesta *en estado de equilibrio*, de respuesta *en transición* hasta alcanzar ese nuevo valor de CO₂, y como respuesta *dependiente del tiempo*. Se prevé que esa duplicación de CO₂ podría tener lugar aproximadamente en el año 2030.

Sin perjuicio de las cautelas e incertidumbres asociadas al problema, la evolución más probable del clima peninsular español, como resultado de esos análisis, se sintetiza en los siguientes escenarios de temperatura y precipitación:

- Se estima, en general, que una duplicación de CO₂ 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.

- Se estima que podrían producirse descensos generales de los valores de la precipitación media anual comprendidos entre el 5% y el 15%, siendo 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. Esta tendencia implicaría un aumento de los períodos secos y una mayor torrencialidad de las precipitaciones. Los MCGA-OA no proporcionan todavía respuestas que cuantifiquen estos efectos.

Científicamente, estos resultados están expuestos, además, a las incertidumbres que existen sobre la función de las nubes y los aerosoles en el sistema climático, que pueden reducir el calentamiento debido a la intensificación del efecto invernadero, especialmente en las latitudes medias del hemisferio Norte.

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.

Las incertidumbres existentes en los resultados que proporcionan los MCGM obligan a trabajar con escenarios y no con predicciones. Las conclusiones obtenidas como resultado de los estudios de impactos sectoriales deberían, por tanto, estar más orientadas a poner de manifiesto las debilidades de los sistemas que a modificar sus criterios de diseño o funcionamiento.

3.1.8.2.3. Impacto sobre los recursos hídricos

La identificación de impactos sobre los recursos hídricos vinculados a posibles cambios climáticos se ha producido en nuestro país desde antiguo. Así, y a título de ejemplo, existen referencias de comienzos de siglo a la merma de caudales del Segura y sus acusados estiajes, como consecuencia de la deforestación de su cuenca y posibles cambios de clima (Díaz Cassou, 1900), cambios de los que se venía hablando, como dijimos, desde mediados del XIX. Ya entonces Díaz Cassou concluyó la explicación natural de los cambios observados, sosteniendo lo que hoy denominaríamos la *hipótesis de estacionariedad* de los registros hidrológicos.

Existen asimismo indicios de posibles cambios en el régimen hidrológico de España en siglos pasados. Es probable, por ejemplo, que los recursos hídricos del país en el siglo XVIII hayan sido, en su conjunto, superiores a los de la inmediatamente anterior

Pequeña Edad Glacial (1550-1700), circunstancia que puede haber sido coadyuvante para que Carlos III emprendiese el gran programa de obras hidráulicas de la Ilustración (Font Tullot [1988] p.106).

Ya en los albores del siglo XXI, y dado el interés que modernamente despierta la hipótesis de cambio climático, y los cada vez mayores indicios de su existencia, es conveniente comenzar a hacer estudios en España sobre la sensibilidad de los sistemas de explotación de recursos hídricos a las posibles variaciones de las condiciones climáticas del futuro. Las incertidumbres existentes, de toda índole, no permiten por el momento atribuir a estos estudios más que un carácter indicativo, pero, aún admitiendo este carácter, el esfuerzo de indagación y de análisis resulta inexcusable.

A diferencia de otras políticas sectoriales que abordan el cambio climático desde criterios limitativos, como agentes productores del mismo que deben autoregularse para minimizar sus efectos (caso de las emisiones industriales de gases atmosféricos), afrontar el problema del cambio climático desde la perspectiva de la planificación hidrológica requiere adoptar una posición adaptativa. El fenómeno se supone externo al sistema de utilización del agua, para el que deben buscarse, en su caso, estrategias de adaptación que permitan mitigar las consecuencias adversas.

La influencia del cambio climático sobre los sistemas de explotación de recursos hídricos opera en dos fases sucesivas. En primer lugar, la modificación de las condiciones atmosféricas induce una modificación del ciclo hidrológico natural - de los recursos hídricos naturales - que supondrá cambios en la magnitud y estacionalidad de los flujos de agua y de su calidad. En segunda instancia, esta modificación hidrológica puede afectar a los distintos requerimientos hídricos, e influir sobre la utilización del agua a través de los sistemas de explotación, sus infraestructuras y sus reglas de gestión.

El impacto final real requiere, pues, una identificación de estas dos fases distintas. Dada la diversidad de sistemas existentes (diferentes vulnerabilidades, garantías, resiliencias, fragilidad de ecosistemas, etc.), no resulta posible generalizar resultados más allá de los estrictamente hidrológicos, debiendo, en su caso, realizarse tal análisis posterior para cada sistema, de forma singularizada. En consecuencia, analizaremos aquí el posible impacto sobre los recursos hídricos, dejando para otras secciones el posible impacto sobre las demandas sectoriales de agua.

Para abordar el problema hidrológico, una posible opción es partir de las hipótesis de escenarios previsi-

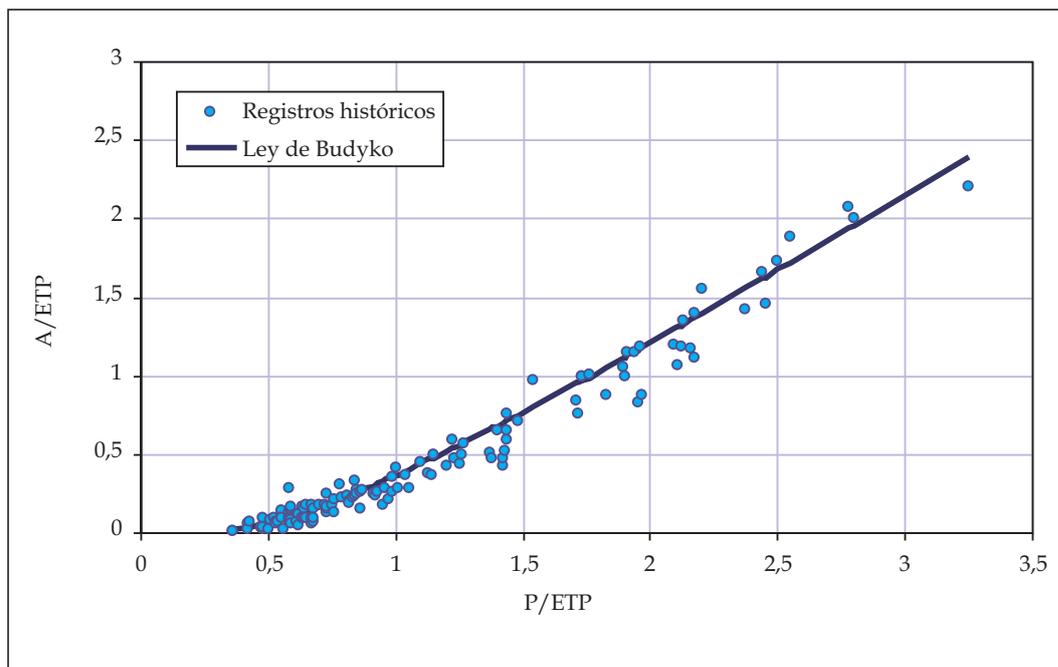


Figura 168. Relaciones entre aportación (A), precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) en los puntos de control

bles de cambio climático para España. Un primer análisis lo constituye el estudio de cómo pueden repercutir esas variaciones climáticas en la escorrentía media anual en régimen natural en los distintos ámbitos territoriales de la planificación hidrológica. La estimación de este impacto permitiría adoptar supuestos razonables sobre las series de aportaciones naturales o recursos hídricos totales de los ríos, y obtener así unas series de diseño que, introducidas en los modelos de los sistemas de explotación, permitirían evaluar el impacto del cambio climático supuesto sobre nuestros sistemas hídricos. Como ya se ha indicado, y conviene reiterar, tales análisis son, en buena medida, puramente teóricos, y están sometidos a grandes márgenes de incertidumbre, pero parece conveniente abordarlos con objeto de obtener alguna cuantificación inicial, por dudosa e incierta que ésta resulte.

Así, el empleo de técnicas de modelización matemática que simulen dinámicamente la fase terrestre del ciclo hidrológico permitiría realizar una estimación del impacto del cambio climático sobre las series de aportaciones mensuales en los ríos. Los modelos de este tipo, como el empleado en este Libro, 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 la actualidad no existe información sobre escenarios climáticos lo suficientemente detallada que justifique la

aplicación de este tipo de modelos a escala nacional. Sin embargo, y 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.

Para estimar espacialmente el impacto sobre la escorrentía media anual derivado de distintos escenarios climáticos, se ha utilizado una ley regional, la de Budyko (1961), que relaciona la escorrentía (A) con la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP). Esta ley ya fue utilizada en un análisis experimental realizado en cuencas españolas de distintas características climáticas e hidrológicas (Estrela et al., 1995). Aquí también se ha contrastado con los puntos de control en régimen natural seleccionados para calibrar el modelo de simulación de aportaciones mensuales. Como se observa en la figura 168, el ajuste es aceptable y justifica la utilización de esta sencilla ley regional.

En el análisis se han supuesto los siguientes escenarios climáticos, considerados representativos de lo que podría suceder en nuestro país en el futuro inmediato bajo la hipótesis de duplicación del 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.

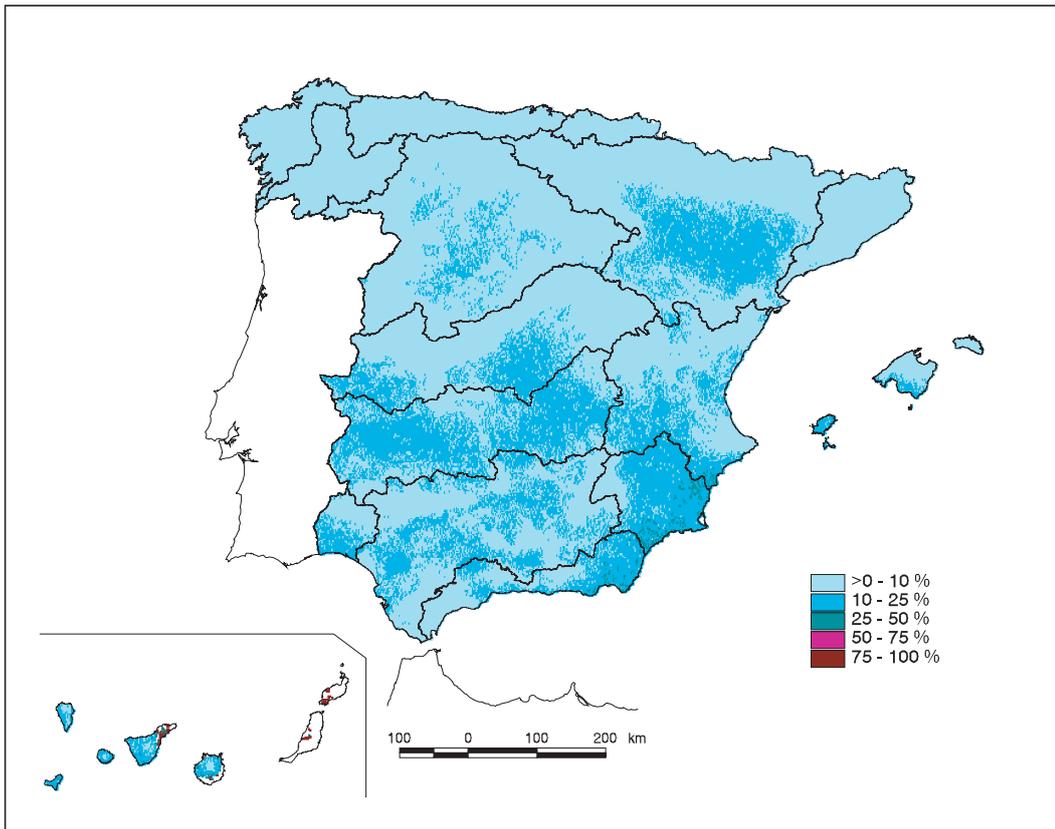


Figura 169. Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 1

En las figuras 169 y 170 se muestran las disminuciones porcentuales de escorrentía media anual respecto a la situación actual, resultantes para estos dos escenarios.

En la tabla 42 se cuantifican estos efectos, mostrándose, para cada ámbito territorial, el valor medio del porcentaje de disminución de las aportaciones totales en estos dos escenarios climáticos considerados.

También se ha analizado un escenario extremo, muy poco verosímil, suponiendo una disminución de un 15% en la precipitación media anual y un aumento extremo de 4 °C en la temperatura. Las reducciones en la aportación, en este caso, son mucho mayores, alcanzando en algunos ámbitos valores superiores al 50%.

El análisis realizado permite concluir que el sureste peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular, son las áreas donde el impacto sobre los recursos hídricos se manifestaría más severamente.

Los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud que las estimaciones de impacto sobre los recursos realizadas en otras regiones del mundo similares hidrológicamente a España, como es el caso de California. En todo caso, y como ya se ha dicho, estos resultados no deben ser tomados en modo alguno como definitivos, sino como una llamada de atención, y un punto de partida para poste-

riores, y más precisos, estudios de impacto. Se debe, además, tener presente que, como se apuntó, los escenarios utilizados se corresponden con la hipótesis de duplicación del CO₂ prevista para el 2030 y que este año queda fuera de los horizontes de la planificación hidrológica actual. Esto no impide apuntar que, si el cambio climático antropogénico realmente ocurre, España podría enfrentarse en el futuro a un problema serio de agravamiento de la escasez de agua en algunas zonas.

Por otra parte, se han propuesto otros escenarios climáticos que, junto al aumento de temperaturas en todo el año, prevén para nuestro país una disminución de precipitaciones en verano, unida a un aumento de las mismas en invierno. Ello hace que las menores aportaciones por incremento de temperaturas y merma de lluvias en verano (aumento de las sequías estivales) pudieran verse compensadas por mayores caudales en invierno, generando un saldo final incierto, que podría incluso ser favorable si se dispone de suficiente almacenamiento para las mayores escorrentías invernales. Ello vuelve a ilustrar sobre las importantes incertidumbres actualmente existentes.

Volviendo a los dos escenarios considerados, una cifra media global representativa de ese cambio, proyectada al segundo horizonte de la planificación hidrológica, y sensiblemente encajada en todas las horquillas de los distintos ámbitos, sería del orden del 5-6 %, tal y como

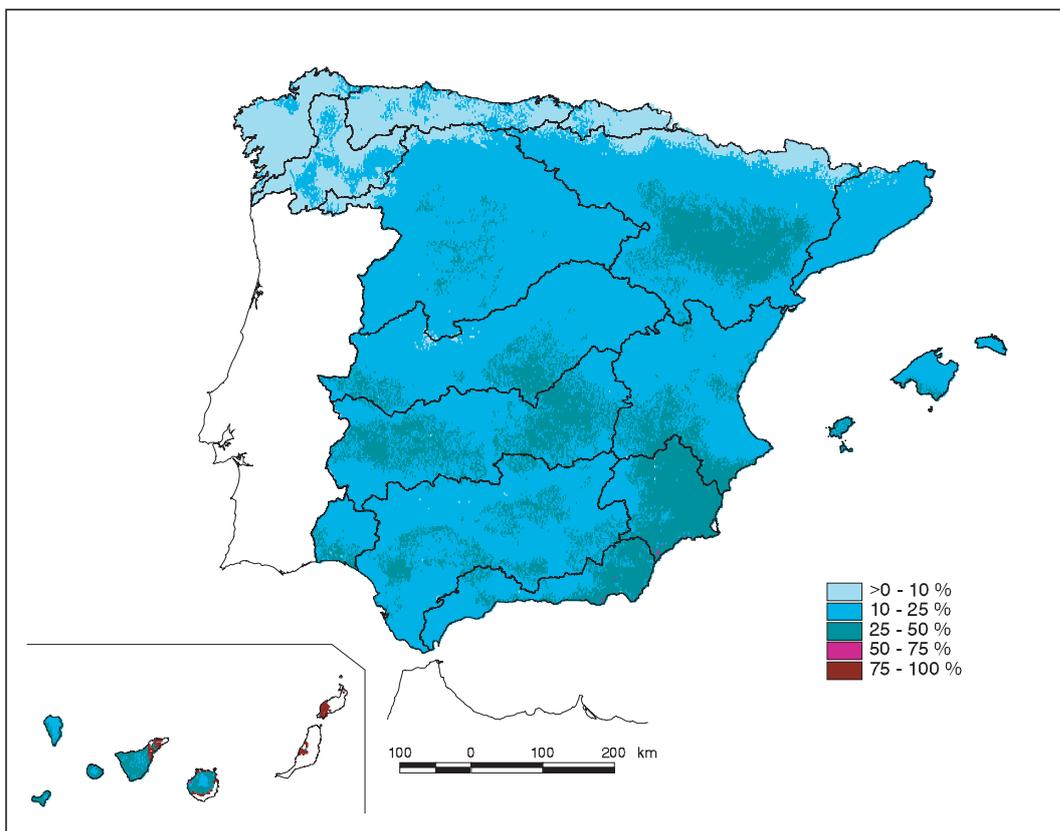


Figura 170. Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 2

muestra el gráfico de la figura 171. El efecto que esta disminución de los recursos naturales podría tener en los recursos disponibles peninsulares se ha evaluado, de modo global, en torno a un 4% (Garrote et al., 1999).

Dadas las grandes incertidumbres que actualmente conllevan semejantes estimaciones, no parece razonable avanzar más allá -y ya es bastante aventurado- de estas grandes cifras agregadas (como ejemplo, los modelos climáticos suelen considerar a toda España como una región climática única), debiendo considerarse por ahora un ejercicio ilusorio y puramente espe-

culativo descender a mayores detalles o niveles de desagregación espacio-temporal.

En definitiva, y aunque, como se ha dicho, la realidad de este proceso no está aún contrastada científicamente de forma indiscutible, si se desea una estimación prudencial y razonable de los impactos del posible cambio climático antropogénico sobre los recursos hídricos en España, podría admitirse para todo el país, de forma global y genérica, una disminución del 5% en las aportaciones totales en régimen natural al segundo horizonte (o largo plazo) de la planificación hidrológica.

Ámbito	Escenario 1	Escenario 2
Norte I	-3	-10
Norte II	-2	-10
Norte III	-2	-9
Duero	-6	-16
Tajo	-7	-17
Guadiana I	-11	-24
Guadiana II	-8	-19
Guadalquivir	-8	-20
Sur	-7	-18
Segura	-11	-22
Júcar	-9	-20
Ebro	-5	-15
C.I. Cataluña	-5	-15
Galicia Costa	-2	-9
Baleares	-7	-18
Canarias	-10	-25
España	-5	-14

Tabla 42. Porcentaje de disminución de la aportación total, por ámbitos de planificación, para los escenarios climáticos considerados

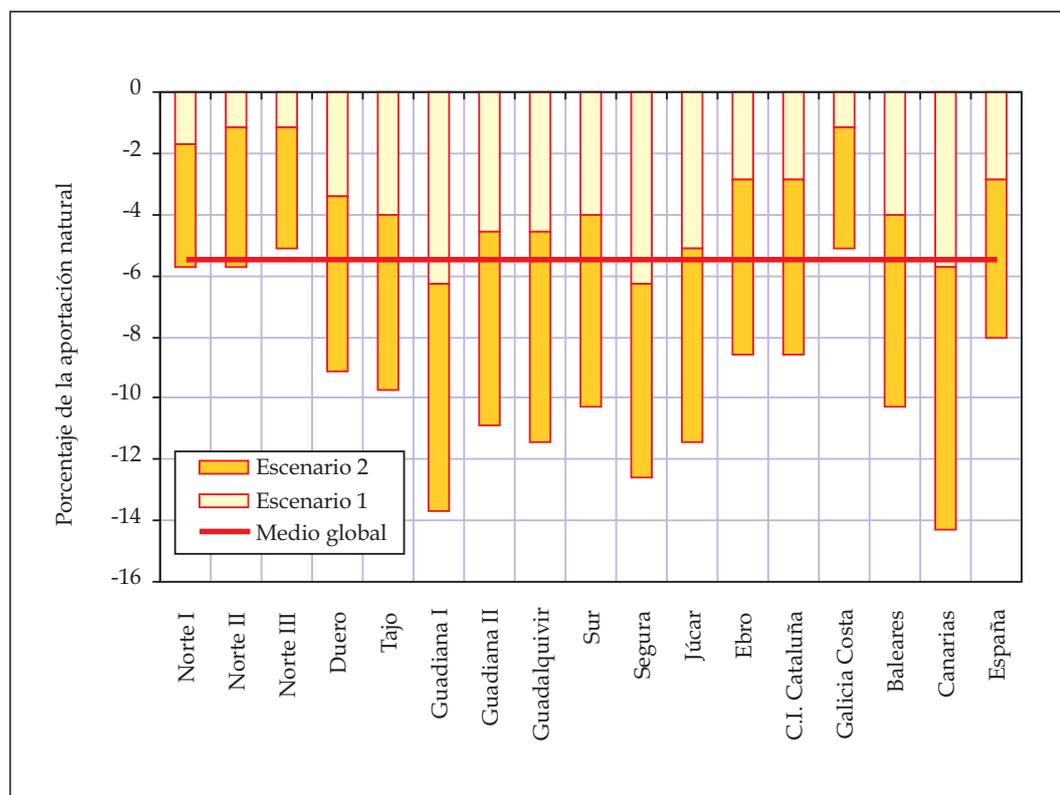


Figura 171. Porcentajes de disminución de la aportación total, para los escenarios climáticos considerados, en el largo plazo de la planificación hidrológica

Junto con esta disminución, parece esperable una mayor variabilidad anual e interanual, que se expresaría por un aumento en el rango de los caudales, y cuya cuantía, hasta el momento, se ignora.

3.1.8.3. Conclusiones

Tanto por razones de la variabilidad natural de los fenómenos hidrológicos, como por la posible incidencia de un cambio climático de origen antropogénico, es dudoso que deba admitirse, como supuesto de diseño desde el punto de vista de la planificación y gestión del agua, que el registro hidrológico del futuro será igual al del pasado, o dicho de otra forma, que los flujos hidrológicos deban ser considerados estacionarios en el largo plazo.

La incertidumbre intrínseca de nuestra actual estimación de valores medios de aportaciones naturales en España (error estándar de la media), debida a la longitud de las muestras disponibles, oscila entre un 3 y un 12%, según el ámbito de planificación considerado, y con un valor medio para todo el país próximo al 5%. Además, aún en ausencia de cambio climático de origen antrópico, el clima europeo muestra variaciones multi-decadales, con diferencias apreciables entre

tales periodos, aunque el análisis estadístico de esta variabilidad, en las muestras disponibles, no permita concluir la hipótesis de no estacionariedad de las series hidroclimáticas. En el caso español, hay indicios para suponer que el periodo de referencia empleado en la planificación hidrológica de cuenca puede ser ligeramente más húmedo que el periodo hidrometeorológico instrumental, aunque esto no pasa de ser una mera hipótesis, no confirmada estadísticamente.

Visto en este contexto, el posible cambio climático aparece como un elemento más de incertidumbre añadida, que puede quedar embebido dentro de esta variabilidad natural, o discernirse de ella en un futuro más o menos lejano.

En definitiva, y como resultante de todas estas circunstancias superpuestas, parece oportuno reconsiderar la forma en que los recursos hídricos son evaluados en el largo plazo desde el punto de vista de la planificación hidrológica. Acaso una prudencial reducción de sus valores esperados (p.e. en torno al 5% en el segundo horizonte de la planificación), junto con un cierto aumento de su irregularidad estacional (incremento del rango de caudales), sea una buena práctica preventiva en tanto en cuanto avanza nuestro conocimiento del fenómeno.