GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

fic fundación para la investigación del clima

MEMORIA DE ACTUACIÓN. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS DENTRO DEL PROYECTO:

"Anticipando el Clima para defender las Unidades Hidrográficas (ACDUHA)"

ÍNDICE

ABSTRACT

1. Introducción
   1.1. Antecedentes
   1.2. Objetivos del proyecto

2. Metodologías utilizadas
   2.1. Metodología de regionalización estadística FICLIMA
   2.2. Descripción del Índice FWI
   2.3. Descripción del Índice n
   2.4. Descripción del Índice CI
   2.5. Descripción del Índice de Riesgo de Erosión (IRE)
3. Resultados
   3.1. Análisis de la meteorología y climatología de la zona de estudio
   3.2. Análisis de las variables ambientales y de la vulnerabilidad frente al clima
      3.2.1. Análisis del relieve
      3.2.2. Vulnerabilidad frente a la erosión
   3.3. Proyecciones de escenarios de clima futuro
      3.3.1. Verificación de la metodología
      3.3.2. Validación de la metodología
      3.3.3. Temperatura
      3.3.4. Precipitación
      3.3.5. Viento
      3.3.6. Humedad relativa
   3.4. Proyecciones de impactos climáticos identificados
      3.4.1. Índice FWI
      3.4.2. Índice n
      3.4.3. Índice CI
      3.4.4. IRE (Área de Erosión)

4. Conclusiones

5. Referencias

6. Anexo

ABSTRACT

Esta memoria describe el trabajo y resultados obtenidos en el desarrollo y conclusión del proyecto ACDUHA (Anticipando el Clima para Defender las Unidades HidrogrÁficas).

El objetivo del proyecto es apoyar las defensas naturales (bosques, suelo,…) de las Cuencas Hidrográficas del Júcar y del Segura para combatir el avance de la erosión de sus suelos en las próximas décadas. Los máximos responsables de la erosión del suelo son las precipitaciones torrenciales y los incendios, por lo que se analizó la evolución de los índices de precipitación “n” y “CI”, y del índice de incendios “FWI” mediante su cambio proyectado en diferentes modelos climáticos a través de varias metodologías. También se compuso un Índice de Riesgo de Erosión, IRE, a partir de los anteriores, que permitiera un mejor análisis.

Los resultados de las proyecciones muestran un fuerte incremento del índice FWI en la región de ambas cuencas, especialmente en zonas costeras de Murcia. Los valores del índice n y del CI no sufrirán grandes cambios en ninguna zona concreta durante las próximas décadas, por lo que no se espera cambios en los regímenes de precipitación. Así, el índice IRE muestra un avance paulatino de la zona de riesgo de erosión desde las costas hacia los cursos altos de los ríos, mayormente por incendios. La zona más conflictiva abarcaría todo el sureste de la región con Riesgo Medio, dentro de la cual el Riesgo Severo de erosión se extiende a la práctica totalidad de la Región de Murcia y la mitad sur de la provincia de Alicante antes del año 2050.

Agradecimientos: este proyecto ha sido apoyado por el Ministerio de Transición Ecológica en la convocatoria de 2018 sobre "Concesión de subvenciones a entidades del tercer sector u organizaciones no gubernamentales que desarrollen actividades de interés general consideradas de interés social en materia de investigación científica y técnica de carácter medioambiental".

1. Introducción

1.1 Antecedentes

La pérdida de masa forestal, la desertificación y la erosión son, sin duda, de los mayores retos a los que se enfrentan nuestros bosques y ecosistemas naturales.

Las principales causas que llevan a la desertificación son la aridez, la variabilidad y torrencialidad de las lluvias, el relieve desigual, los incendios forestales, la explotación insostenible de los acuíferos y la actividad urbanística.

La desertificación es ya una amenaza para gran parte del territorio español según los últimos estudios, ya que a los factores anteriormente descritos se une la contribución del cambio climático. Las proyecciones de cambio climático en España apuntan hacia un aumento de la temperatura y de los fenómenos extremos en las precipitaciones: tanto sequías como lluvias torrenciales. También se espera un aumento en la ocurrencia de incendios forestales. De esta manera, la vulnerabilidad de las zonas boscosas tenderá a aumentar, y el problema de la desertificación se agravará en las próximas décadas.

Las proyecciones más recientes de cambio climático para la segunda mitad del siglo XXI estiman que la aridez va a avanzar de manera imparable en España, de manera que hacia finales de siglo casi un 50% de la superficie del país será semiárida. Como consecuencia principal, el riesgo de desertificación por motivos climáticos se disparará, alcanzando valores muy preocupantes en las cuencas hidrográficas consideradas para el estudio.

La irregularidad y torrencialidad de las precipitaciones es un factor añadido que aumenta la vulnerabilidad de las cuencas hidrográficas. Un aumento de las olas de calor, de los períodos de sequía y de la torrencialidad implica directamente un descenso en la disponibilidad de recursos de agua, así como efectos negativos en la agricultura debido al aumento de la evapotranspiración y del estrés hídrico en los cultivos. Y este efecto depende a su vez de la topografía (concavidad/convexidad del territorio, pendiente…).

Los incendios forestales también suponen una amenaza directa a la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas, ya que están directamente relacionados con el aumento de la aridez, de la erosión del suelo y por consiguiente del aumento del riesgo de inundaciones.

El aumento de las situaciones de sequía y de los incendios forestales, junto con el aumento de la presión demográfica, sobre todo en zonas costeras, ha hecho que la desertificación aumente en la gran mayoría de las cuencas hidrográficas y que en algunos puntos sea ya irreversible. Sin embargo, una adecuada evaluación de riesgos que permita llevar a cabo unas determinadas medidas de actuación podrían ayudar a evitar que zonas que actualmente presenten una probabilidad baja de desertificación aumenten su vulnerabilidad debido al cambio climático, y a la vez paliar los efectos del mismo sobre las zonas cuya vulnerabilidad es ya de por sí alta.

La Fundación para la Investigación del Clima (FIC) tiene amplia experiencia en generación de escenarios locales y regionales de clima futuro con una metodología propia, así como en su aplicación en proyectos de investigación encaminados a evaluar los impactos del cambio climático sobre ecosistemas, cubierta forestal o sector agrícola, tanto nacionales como internacionales.

Entre los proyectos de investigación nacionales relacionados con el impacto del cambio climático con la hidrología y el diversidad forestal encontramos proyectos como “Impacto del cambio climático en las aguas fluviales de la Cuenca del Ebro (2012-2016)”, “Investigación científica para la evaluación de impactos del cambio climático sobre los ecosistemas fluviales en España, y definición de medidas de adaptación para su protección (2013)” y “Simulación del clima futuro a escala local para viticultura con implicaciones prácticas en la gestión del viñedo (2011-2012)”. Además, ahora mismo se está participando en el proyecto “Forestería Análoga para la Restauración Ecológica de la Región Mediterránea”.

Entre los proyectos de investigación internacionales, destaca “Asistencia técnica para fortalecimiento de capacidades en adaptación al cambio climático y estrategias de resiliencia de medios de vida en Honduras (2016-2018)” y “*Analysis of Expected Climate Change Impacts in Selected Value Chains and Proposal of Best Options for Adaptation* (2012)”.

1.2. Objetivos del proyecto

En el proyecto “*Anticipando el Clima para defender las Unidades Hidrográficas (ACDUHA)”* se ha estudiado la amenaza sobre las defensas naturales en las cuencas hidrográficas del Júcar y Segura bajo diferentes proyecciones climáticas a escala local generadas mediante una técnica de downscaling estadístico (FICLIMA) a partir de un conjunto de modelos climáticos pertenecientes al Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5).

El **objetivo principal** de este proyecto es apoyar las **defensas naturales** (bosques, suelo,…) de diferentes **cuencas hidrográficas** mediante el desarrollo y la predicción de **índices de peligro** de acuerdo con la **proyección climática** para las próximas décadas.

Como **objetivos específicos** dentro del proyecto se estableció el análisis de dos factores de riesgo con impacto directo sobre el objetivo principal del mismo:

- **Riesgo de Incendios forestales** mediante el análisis de la evolución del **Fire Weather Index** (FWI) hasta el 2050.

- **Riesgo de erosión del suelo** mediante el análisis de la probabilidad de precipitaciones intensas (**Índice n**) y concentradas (**Índice C**).

Para poder alcanzar los objetivos anteriormente citados se realizaron las siguientes actividades:

Tabla 1 Actividades realizadas en el marco del proyecto ACDUHA.

		Descripción de la actividad
Actividad 1	**Recogida de datos de las variables meteorológicas: Temperatura, precipitación, humedad y viento**	En esta actividad se recopilan datos de temperatura, precipitación, humedad y viento en las áreas de estudio. Estos datos se obtienen a partir de los observatorios meteorológicos de la Agencia Estatal de Meteorología, así como de otras redes públicas de estaciones, tales como SAIH o AVAMET. Se aplica un detallado proceso de control de calidad a los datos meteorológicos, dado que errores en estos datos podrían anular las simulaciones climáticas que se utilicen. Por eso, antes de usar los datos, éstos se someten a un proceso de homogeneización.
Actividad 2	**Búsqueda bibliográfica y selección de los indicadores más apropiados para evaluar el estado de la biodiversidad forestal, incluyendo la biomasa, salud y diversidad**	En esta actividad se analiza la topografía (concavidad/convexidad, mapa de pendientes, etc.), y se recogen datos de uso del suelo proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), así como de cobertura vegetal a partir del mapa forestal en las zonas de estudio.
Actividad 3	**Análisis de la vulnerabilidad y probabilidad de plagas y enfermedades de los bosques bajo diferentes condiciones climáticas de acuerdo con los índices seleccionados**	En esta actividad se determinan las zonas que, en base a la topografía, la cubierta vegetal y al tipo de suelo, son más vulnerables al cambio climático. Se pone el foco en el análisis de las zonas boscosas más vulnerables a incendios y en las zonas con el suelo más susceptible de ser erosionado (mediante indicadores de erosión tales como el índice de erosividad y erodabilidad).
Actividad 4	**Proyección de escenarios climáticos para las próximas décadas de las condiciones climáticas favorables al desarrollo de plagas y enfermedades**	En esta actividad se realizan proyecciones a nivel regional de clima futuro en las cuencas hidrográficas a estudiar. Estos escenarios de clima futuro se generan a partir de varios RCPs de los Modelos Climáticos utilizados para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, tienen detalle local y diario y se generan a partir de la metodología FICLIMA, propia de la FIC.
Actividad 5	**Proyección de los posibles impactos climáticosidentificados**	En esta actividad se calcula el índice Fire Weather Index (FWI) en las zonas de estudio para analizar el riesgo de incendios forestales y la consecuente pérdida de masa forestal en las zonas más vulnerables de sufrir incendios. Asimismo, se analizan los indicadores de riesgo de erosión del suelo de acuerdo con la probabilidad de precipitaciones intensas y concentradas (índices n y CI) que pudieran afectar a las zonas más vulnerables a la erosión.

2. Metodologías utilizadas

La pérdida de masa forestal, la desertificación y la erosión son, sin duda, de los mayores retos a los que se enfrentan nuestros bosques y ecosistemas naturales.

Conocer la evolución futura de diversos factores de riesgo que tengan una implicación directa sobre las defensas naturales de las cuencas hidrográficas es de vital importancia, además de suponer un gran reto, ya que permite establecer las medidas necesarias para hacer frente a las consecuencias, tanto negativas como positivas, derivadas del impacto que el cambio climático tendrá sobre ellas.

Por un lado, los incendios forestales son un fenómeno que se ha ido produciendo a lo largo de toda la Historia con distinta frecuencia e intensidad. Desde la irrupción del hombre, la frecuencia de los incendios ha ido en aumento, siendo la zona del Mediterráneo y el Sur de Europa regiones con alta incidencia de incendios forestales (Vélez 2000a).

Los incendios forestales son, probablemente, uno de los principales problemas medioambiental en España de las últimas décadas. Se calcula, que, en promedio, en España se producen más de 20.000 incendios cada año afectando a más de 15.000 hectáreas.

La distribución de los incendios forestales varía según las características de la zona (altitud, exposiciones a fenómenos adversos, pendientes y tipos de vegetación) y como consecuencia de esta distribución espacial desigual los impactos producidos por estos fenómenos no son homogéneos (Vázquez y Moreno, 2001). Además, no todas las superficies vegetales se queman de la misma manera y por lo tanto los incendios forestales tienden a acumularse en ciertas zonas (Moreno, 2005).

El aspecto actual del territorio es consecuencia del manejo del suelo (pastoreo, cultivo y quemado tanto controlado como descontrolado. El uso de las superficies de cultivo varía en función de los escenarios socioeconómicos y se espera que en un futuro se produzca un desplazamiento de las zonas de cultivo hacía regiones más fértiles y se produzca un abandono de tierras marginales.

La relación existente entre los incendios forestales y el clima es de sobra conocida (Clark, 1998; Carcaillet et al, 2002). El clima determina la vegetación dominante de una región y por lo tanto la cantidad y tipos de combustibles sobre los que se puede desarrollar el fuego. Las principales variables meteorológicas que favorecen el desarrollo de un incendio son la temperatura, la humedad relativa, el viento y la precipitación.

Por otro lado, el aspecto del terreno se ve alterado por el fenómeno de la Erosión. La erosión es un fenómeno natural que va a provocar cambios de importancia en el terreno y afectar de forma amplia al territorio, especialmente en aquellos donde se produzcan procesos de desertización y pérdida de suelo. La pérdida de cobertura vegetal post-incendio es una de las causas más frecuentes de estos fenómenos.

En el futuro, se espera que se incrementen estas problemáticas, a causa de:

- El cambio climático, que conllevará condiciones meteorológicas mucho más desfavorables, que facilitarán la ignición y la propagación, y que (salvo que se afronten medidas eficaces de adaptación al cambio climático) debilitarán en general las masas forestales, lo que también incrementará la problemática de incendios (más material muerto en el monte, y material vivo con menos humedad). Además, la vegetación seguramente será poco a poco más xérica como consecuencia del cambio climático, lo que también incrementará la problemática de incendios.

- Los cambios sociales: todo parece indicar que la problemática de la "Interfaz Forestal-Urbano (IUF)" se incrementará, con más zonas afectadas. Este incremento del territorio de IUF conllevará un aumento de las "causas de ignición" y de la vulnerabilidad.

- El cambio climático va a suponer una alteración importante de las condiciones del suelo, que puede tener como consecuencia final graves fenómenos de erosión. El fenómeno más acusado, y al que el sur peninsular está más expuesto, es la desertización, que se intensifica especialmente con el aumento de las temperaturas. Este aumento provoca graves cambios en las coberturas vegetales y en la superficie agrícola, que se pueden ver reducidas por la aparición de sequías prolongadas. La aparición de lluvias torrenciales recurrentes es también causante del arrastre de materiales, y por lo tanto de la pérdida de suelos. Este material puede acabar generando la colmatación de presas, haciendo perder capacidad de agua almacenada por los procesos de sedimentación posteriores. Además, están las propias consecuencias de un aumento de las inundaciones, que son uno de los desastres naturales con más víctimas, así como la anegación de valles y zonas urbanas con grandes pérdidas económicas.

Por tanto, surge la necesidad de evaluar cómo evolucionarán las variables climáticas en las próximas décadas y el impacto de las mismas sobre las defensas naturales a través del análisis de los índices de riesgo.

Para simular las proyecciones climáticas futuras se ha utilizado una metodología de downscaling estadístico (FICLIMA) desarrollada por la FIC, que permite simular series diarias de temperatura y precipitación a lo largo del siglo

XXI y cuyas proyecciones se han utilizado para calcular los bioindicadores identificados dentro del proyecto.

2.1. Metodología de regionalización estadística FICLIMA

A día de hoy, la herramienta más potente en la simulación del clima futuro son los Modelos Climáticos Globales y concretamente los *Earth System Models* (ESMs). Estos modelos muestran una capacidad notable para reproducir las principales características de la circulación atmosférica general. El problema surge cuando se evalúan los resultados a una escala más pequeña (es decir, se seleccionan unos pocos puntos de la rejilla de trabajo) donde las variables, especialmente en superficie, no se aproximan a los valores observados en la realidad.

Estas limitaciones se pueden explicar por varias razones, en general relacionadas con la insuficiente resolución espacial de los modelos que a día de hoy es de unos 2º-3º de latitud/longitud:

- La topografía (cordilleras, líneas de costa, etc.) es descrita con poco detalle, lo que hace que algunos forzamientos relacionados con la misma y de extraordinaria importancia a nivel local sean omitidos y por lo tanto no tenidos en cuenta por el modelo.
- Algunos de los procesos atmosféricos que se presentan a una escala inferior a la de la rejilla de trabajo de los modelos (y que por lo tanto tienden a no ser reflejados por éstos) se recogen mediante parametrizaciones directas, es decir, son representados por un ajuste directo de los parámetros en el modelo. Esas parametrizaciones son ajustadas de manera estadística en todo el planeta pudiendo ser ineficientes en regiones concretas.
- La parametrización del flujo de energía desde las escalas sinópticas (106 km2) hasta las de una escala inferior a la rejilla de trabajo afecta a la fiabilidad de las menores escalas resueltas.

Dado que en la mayor parte de los estudios de evaluación de impactos es necesaria la presencia de escenarios climáticos con resolución local de variables cercanas a la superficie terrestre (temperatura a 2 m., precipitación, etc.), surge la necesidad de adaptar la información proporcionada por los ESMs (de baja resolución espacial) a la información requerida por los modelos de impacto (de mayor resolución espacial-local en superficie). Este proceso de regionalización es conocido como *downscaling*.

Existen dos maneras principales de afrontar el problema de la regionalización:

A. **Aproximaciones estadísticas** (*downscaling* estadístico). Se obtienen relaciones empíricas entre variables a gran escala procedentes de los Modelos Climáticos Globales y variables de alta resolución (en superficie).
B. **Aproximaciones por modelización dinámica** (*downscaling* dinámico). Estos modelos incrementan su resolución sobre la región de interés. Puede realizarse de dos maneras, o bien con una técnica de "zoom" de la propia rejilla del modelo o bien mediante el anidamiento de un Modelo de Área Limitada (LAM) en las condiciones de contorno suministradas por el Modelo Climático. Son los denominados Modelos Regionales del Clima (RCM, del inglés *Regional Climate Model*).

Las aproximaciones estadísticas tienen mucho menor coste computacional (lo que permite aplicarlas a multitud de Modelos Climáticos y escenarios de emisiones), pero sufren de una incertidumbre implícita consecuencia de aceptar la hipótesis de que los campos de efectos en superficie de alta resolución son función exclusiva de las condiciones dinámicas y termodinámicas a gran escala en la atmósfera, considerando las características de la topografía fijas. Es dudoso que en un marco de cambio climático no varíe ningún forzamiento mesoescalar (albedo, humedad del suelo, campos atmosféricos a baja resolución...). Adicionalmente, las relaciones estadísticas entre campos atmosféricos de baja resolución y las variables en superficie a escala local son siempre imperfectas pudiendo resultar no-estacionarias, lo que significa que, aunque estas relaciones se verifiquen en el clima actual, no tienen por qué hacerlo en un clima futuro (un problema conocido como problema de la estacionariedad).

Las aproximaciones dinámicas cuentan con una base física más fuerte (aunque también utilizan relaciones estadísticas en las parametrizaciones). Actualmente, la resolución de los RCMs es de unos 25 Km, lo que resulta insuficiente para simular correctamente variables en superficie a escala local, especialmente en zonas de topografía compleja. Por otro lado, tienen el inconveniente de un coste computacional elevadísimo que pocas instituciones pueden permitirse.

Tabla 2. Diferencias ente *downscaling* estadístico y dinámico. (Fuente:Patz, et al., 2005)

	A FAVOR	EN CONTRA	APLICACIONES
Downscaling dinámico	• Simula mecanismos climáticos. • No realiza asunciones *a priori* sobre cómo están relacionados el clima presente y el futuro. • Herramientas científicas permanentemente actualizadas. • Los continuos avances en ordenadores hacen que cada vez se generen más rápidamente y sean más baratos de ejecutar. • Estimula la colaboración entre científicos del clima y de otras disciplinas de estudio.	• Muy costoso, tanto en términos de necesidades informáticas como de formación del personal. • Los resultados son sensibles a las parametrizaciones iniciales. • El posible sesgo existente en los MCG se puede propagar a la escala local. • El formato de salida de los modelos puede no ser útil a otras disciplinas de análisis científico, y es necesario un tratamiento de datos posterior.	• Áreas geográficas con pocos datos iniciales de partida. • Estudios asociados con extremos climáticos y variabilidad no-lineal, como los sanitarios. • Relaciona los resultados con procesos climáticos. • Permite incluir impactos sobre el uso del suelo sobre los resultados.
Downscaling estadístico	• Muy barato (funciona con mucha velocidad en ordenadores personales con software libre). • Aprovecha la experiencia estadística entre investigadores. • Puede corregir los sesgos propios de los MCG. • Permite evaluar los resultados climáticos sobre un grupo de MCGs y sobre diversos escenarios.	• Asume que las relaciones entre el clima local y el de gran escala permanecen constantes. • No incorpora mecanismos climáticos. • No está ajustado para capturar varianzas o eventos extremos.	• Medias climáticas, y ciertos rangos de variabilidad. • Regiones ricas en datos meteorológicos, como las latitudes medias del hemisferio norte. • Permite comparar el clima presente y el futuro de forma consistente. • Puede realizar tests sobre diversos predictores. • Permite medir las escalas de variables hasta lugares concretos.

La necesidad de regionalizar

La metodología FICLIMA de regionalización es una metodología de *downscaling* estadístico. Necesita por lo tanto de una selección previa de campos a utilizar como predictores y una, vez seleccionados éstos, realiza un tratamiento basado en la metodología de análogos. En lo que sigue pasaremos a describir con un cierto grado de detalle los fundamentos de la metodología FICLIMA; si lo que se desea es un mayor detalle, puede acudirse a Ribalaygua et al. (2013).

En términos generales, la metodología sigue el siguiente esquema: se selecciona un día problema “X”, cuyos campos atmosféricos (geopotenciales, temperaturas a distintos niveles de presión...) de baja resolución son conocidos (mediante las salidas de los Modelos Climáticos Globales para el día “X”). A partir de esos campos conocidos, se pretende estimar el valor de las variables meteorológicas en superficie (temperaturas máxima y mínima, precipitación...) para el día “X” en un punto concreto del territorio (observatorio).

El método trabaja en dos pasos sucesivos:

1. El primer paso, denominado estratificación analógica, consiste en seleccionar de un banco de datos aquellos n días con configuraciones atmosféricas más similares a las del día problema “X”. La medida de similitud utilizada compara el parecido entre las variables empleadas para caracterizar las situaciones sinópticas atmosféricas; esas variables determinan el forzamiento sinóptico causante de los descensos y ascensos de aire, generadores de nubosidad y precipitación. Se busca, además, aportar información sobre la dirección del viento en superficie, lo que permite estudiar los efectos que la topografía ejerce en la distribución espacial de la nubosidad y de la precipitación.
2. El segundo paso aplica métodos diferentes en función de la variable que se quiera calcular:

- Para estimar las temperaturas mínimas y máximas diarias, se realiza, por cada variable, una regresión lineal múltiple con selección automática de predictores. La población de trabajo va a estar compuesta por los n días seleccionados en el paso previo. Como predictores se tienen, por un lado, los valores de las variables atmosféricas en la vertical del punto para el que se quiere estimar la temperatura en superficie y por otro, predictores potenciales. Dichos predictores potenciales son un indicador de la duración de la noche en el día en cuestión (proporciona información sobre el potencial de calentamiento / enfriamiento radiativo) y un promedio ponderado de las temperaturas de los días anteriores (se considera el efecto de la inercia térmica del suelo). Una vez establecida la relación lineal existente entre los predictores seleccionados y el predictando (temperatura mínima, máxima o precipitación), se aplica dicha relación a los valores de los predictores del día “X” para estimar el valor del predictando en dicho día.

  La influencia fuertemente no-lineal que la nubosidad y la precipitación ejercen sobre la temperatura en superficie ha sido corregida en la estratificación analógica. Al seleccionar los días con configuraciones atmosféricas más similares, se garantiza que las condiciones de precipitación y nubosidad también lo sean y, por tanto, también, su influencia sobre el predictando. Obtenemos, de esta manera, relaciones

lineales más robustas. Un ejemplo de esto es la relación entre el espesor de la baja troposfera y la temperatura a 2 m, que es de carácter no-lineal. Cuando se trata de días con cielos cubiertos, la temperatura máxima va a depender fuertemente del espesor, entre ambas variables se tendrá una relación bastante lineal. Sin embargo, en días con cielos despejados, la dependencia de la temperatura máxima con el espesor es menor, dependiendo, principalmente, de la insolación y esta a su vez de la época del año.

- Para el caso de la precipitación se han probado varias aproximaciones. La más simple de todas ellas contempla la estima por simple promediado de los k días análogos más parecidos a "X". Además de estimar la cantidad de lluvia, este método permite obtener la probabilidad de lluvia o tiempo seco. En el estudio de las series obtenidas se detectó que, aunque el comportamiento de la predicción de precipitación media en un periodo era aceptable, el número de días de lluvia se sobreestimaba claramente. Ello se debe a que se estaba asociando lluvia a todos los días con probabilidad no nula, aunque ésta fuese muy baja. Para corregir este error, se introdujo una corrección estadística que permite obtener el número de días de lluvia en un mes a partir de las probabilidades de lluvia de cada uno de los días del mes. Conocido el número de días de lluvia y la cantidad de lluvia, se distribuye ésta entre los días con mayor probabilidad y cantidad esperada de precipitación. De esta forma se obtienen mejoras no sólo para el número de días de lluvia, sino también para lluvias extremas y periodos de sequía.

Aunque algunas de las debilidades intrínsecas del método de *downscaling* estadístico son insalvables debido a la propia naturaleza de tal método (dependencia de un conjunto de observatorios meteorológicos con datos fiables y que cubran un periodo temporal extenso; necesidad de sucesivas pruebas de adaptación de la metodología hasta determinar los campos que mejor recogen la variabilidad climática en la zona de estudio), la metodología FICLIMA presenta algunas ventajas con respecto a otras metodologías estadísticas:

Tabla 3. Ventajas de la metodología FICLIMA frente a otras metodologías de *downscaling* estadístico.

	El problema de la estacionariedad va a ser minimizado gracias al criterio de selección de predictores, basado en consideraciones teóricas que reflejen las relaciones físicas entre predictores y predictandos, relaciones físicas que no deben cambiar a lo largo del tiempo.
	Cuando se utiliza el método de selección de análogos, y dado que la simulación final estará basada en los días más análogos, el valor asignado a la variable meteorológica estudiada estará limitado por el valor observado que tenga en esos días análogos, es decir, su margen de variabilidad vendrá dado por la propia variabilidad del pasado (nunca calcularíamos valores superiores o inferiores). Sin embargo, el segundo paso introducido en la metodología FICLIMA nos permite superar esa limitación: las relaciones lineales diarias establecidas para temperatura y la redistribución de la precipitación en base a la función de distribución permiten simular valores que pueden exceder la limitación de los valores observados iniciales.

Con el fin de asegurar que las proyecciones climáticas han sido generadas de la forma más rigurosa posible, se proceden a realizar un proceso de verificación de la metodología y otro de la validación de los modelos climáticos.

Verificación de la metodología de *downscaling*

El proceso de verificación consiste en la comparación de los datos observados (de las diferentes estaciones meteorológicas) con los datos simulados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de *downscaling* sobre el reanálisis (en nuestro estudio, ERA40). Comparando los dos conjuntos de datos, observados y simulados, se puede evaluar si la metodología es capaz de simular correctamente el clima actual (y del pasado reciente). La información resultante es muy importante y tiene que ser tenida en cuenta cuando se trabaje con escenarios climáticos futuros.

La metodología se ha aplicado al reanálisis Europeo ERA40 del ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para el periodo 1958-2000. El reanálisis ERA40 proporciona "observaciones" de los predictores, y cubre con una rejilla de 1.125º x 1,125º toda la superficie terrestre, con resolución seis-horaria (4 datos al día). No obstante, esa información de relativa alta resolución (espacial y temporal), debe relajarse a la de los Modelos Climáticos que se vayan a utilizar posteriormente (rejillas de 2 a 3º de resolución, y en general con un único dato al día), ya que en esta verificación se pretende evaluar el error de la metodología de *downscaling* aplicada en las mismas condiciones que se vayan a aplicar luego a los GCMs. Esto es

importante, ya que algunas metodologías de *downscaling*, y la de la FIC entre ellas, mejoran su capacidad de regionalización cuanta mayor resolución espacial y temporal tenga la información de entrada (los predictores). Por ello, si no se relajase la resolución espacial y temporal del ERA40 a la de los GCMs que se va a regionalizar, obtendríamos errores de verificación menores de lo que en realidad se debería considerar (y corregir).

Lo primero que se debe hacer es obtener los valores de los predictores a partir de la información proporcionada por el ERA40. El siguiente paso es el de obtener las situaciones sinópticamente análogas a las que se presentaron durante el periodo común entre observaciones y reanálisis, en nuestro caso 1958-2000. Esta parte del proceso tiene un elevado coste computacional, ya que para cada día del periodo de verificación (1958-2000) se determinan las situaciones más similares del periodo de referencia (1958-2000), exceptuando los 5 días anteriores, los 5 posteriores y el mismo día problema para evitar el fenómeno denominado *overfitting* o sobreajuste.

Una vez determinadas las situaciones análogas a cierto día problema x, se obtiene el valor simulado de la variable meteorológica a estudiar para ese día x. Realizando este proceso para cada uno de los días del periodo de verificación se obtiene una serie simulada por regionalización de ERA40 para cada uno de los observatorios.

Es importante resaltar que no es necesario que existan observaciones de los predictandos de todos los días del periodo de verificación (cosa que muy raramente sucede), ya que en la serie simulada por regionalización del ERA40 cada día se corresponde con una fecha real. Por tanto, las comparaciones entre las observaciones y la serie simulada por regionalización del ERA40 se realizan día a día (con los días de los que haya observación). Este aspecto es esencial, ya que, si una metodología de regionalización es capaz de reproducir las observaciones día a día, eso sugiere que se están captando las relaciones físicas entre predictores y predictandos, y por tanto el problema de la estacionariedad, la principal desventaja de las metodologías estadísticas, se reduce.

Validación de los modelos climáticos

En general, los modelos climáticos tienden a simular un clima presente más cálido/frío o húmedo/seco de lo que éste es en realidad y la magnitud con la que se alejan de la realidad varía en función de la región concreta en la que se esté trabajando dado que la simulación de los modelos se realiza a escala global. Dado que cada modelo trabaja de forma diferente en la simulación del clima surge la necesidad de evaluar el comportamiento de cada modelo en la zona de estudio que permita determinar cómo de bueno es dicho modelo simulando el clima presente de la región y si su uso es adecuado o por el

contrario no se debería trabajar con él. El proceso mediante el cual se evalúa el comportamiento de un modelo climático es lo que se conoce como validación. Este proceso consiste en comparar las series simuladas obtenidas mediante regionalización del reanálisis (ERA40, en nuestro caso) con las series simuladas obtenidas mediante regionalización del escenario *Historical* de cada modelo (su simulación de control) para un periodo común del pasado, en este caso 1958-2000. *Historical* corresponde a la ejecución de un experimento concreto relativo a datos del pasado y no es por lo tanto un escenario futuro de cambio climático. Su misión es la de permitir disponer de un experimento que nos muestre si el modelo climático a emplear es capaz de reflejar la variabilidad climática natural y por eso abarca un periodo del pasado, el periodo 1951 – 2005 (aunque algunos modelos hacen comenzar tal periodo más atrás).

Debe hacerse notar que la disponibilidad de los datos de los modelos climáticos debe agradecerse al WCRP (*World Climate Research Programme*), un programa de la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization* – WMO) que es el responsable de la iniciativa *Coupled Model Intercomparison* Project 5 (CMIP5), y el desarrollo de la infraestructura necesaria para su almacenamiento y descarga (tanto de hardware como de software) al Departamento de Energía de los Estados Unidos de América. A cada uno de los grupos de trabajo de los modelos empleados debe agradecerse también el trabajo realizado en su modelización y en su ejecución.

Los escenarios de clima futuro

Los Escenarios de Clima Futuro suelen asociarse en los estudios de Cambio Climático a escenarios de emisiones en tanto que descripciones plausibles de cómo serán los cambios futuros en un amplio rango de variables: socioeconómicas, tecnológicas, energéticas, uso del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs), y contaminantes del aire. Para cumplir esta función, se desarrollaron conjuntos de escenarios de emisiones como los IS92 o los SRES (los asociados al cuarto informe del IPCC). Pero en la comunidad científica surgió la necesidad de escenarios provistos de una información más detallada. Atendiendo a esta necesidad, el IPCC propone la definición de nuevos escenarios. En este caso, la propuesta consiste en que sea la comunidad científica quien defina dichos escenarios mediante la colaboración conjunta de los responsables de los distintos centros que generan Modelos Climáticos y de los responsables de los centros de Modelos de Evaluación Integrada. La idea de aunarlos reside en que estos últimos proporcionan una información adicional sobre aspectos socioeconómicos que completan la información generada por los modelos.

Los nuevos escenarios futuros a usar, los asociados al quinto informe del IPCC, han recibido el nombre de *Representative Concentration Pathways* (RCPs) y su definición se basa en los siguientes criterios:

1) Los RCPs se deben basar en escenarios de emisiones ya existentes elaborados por distintos centros y recogidos en la literatura. Al mismo tiempo cada RCP debe, por sí mismo, ser una descripción plausible e internamente coherente con el futuro,

2) deben proporcionar información de todos los forzamientos radiativos necesarios para la modelización climática (uso del suelo, emisiones de GEIs y contaminantes del aire),

3) deben estar armonizados, es decir, la transición continua entre el periodo histórico (el experimento *Historical*) y los periodos futuros debe garantizarse y,

4) deben ofrecer información hasta el 2100 y estar disponibles para simular aún más allá.

El nombre de los RCPs refleja dos de sus principales características:

1. ***Representative***: hace referencia a la idea de que un RCP representa a un conjunto de escenarios de emisiones ya existentes. Es decir, el RCP debe ser compatible tanto con los escenarios extremos como con los medios.

2. ***Concentration Pathway***: este término hace hincapié en que los RCPs no son productos finales, sino que son la herramienta (el input) hacia la generación de escenarios de emisiones, de ahí el uso de concentraciones en vez de emisiones. Los RCP se entienden como un conjunto suficientemente consistente de las componentes de forzamiento radiativo pero no son un conjunto completo de proyecciones climáticas, socioeconómicas y de emisión.

La comunidad científica (formada por más de 20 grupos de trabajo de todo el mundo) determinó en septiembre de 2008 en París que los nuevos escenarios serían los RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 (el nombre hace referencia al forzamiento radiativo alcanzado en 2100); la figura 1 representa el comportamiento de tales escenarios a lo largo del tiempo, expresado como forzamiento radiativo. La figura 4 muestra las características de la definición de cada escenario o RCP.

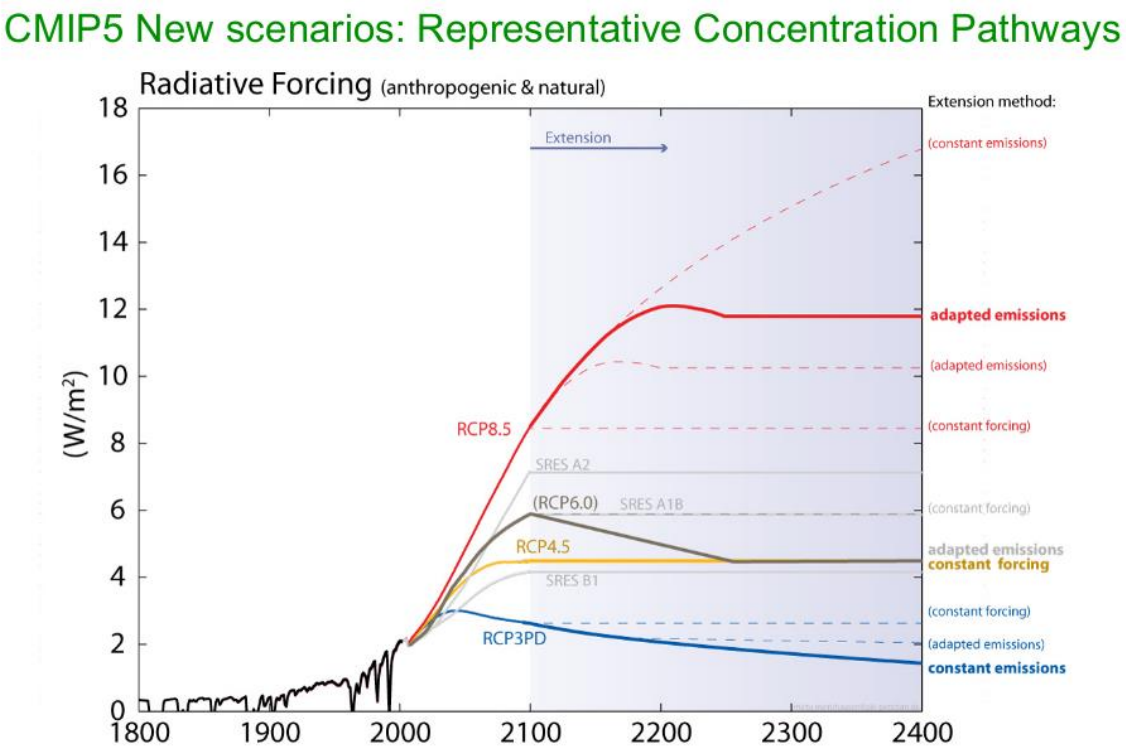

Figura 1. Forzamiento radiativo a lo largo del siglo XXI asociado a los diferentes RCPs y su relación con los escenarios del 4º informe del IPCC (SRES). El escenario RCP2.6 aparece con su nombre originario, RCP3PD. Fuente: Meinshausen, Smith, et al. (2011).

Tabla 4. Características principales de los diferentes RCPs.

RCP	Características
2.6	Se alcanza un pico de 3 W/m^2 antes de 2100 para luego descender hasta los 2.6 W/m^2
4.5	Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de 4.5 W/m^2 (equivalente a unos 650 ppm) en el 2100
6.0	Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de 6.0 W/m^2 (equivalente a unos 850 ppm) en el 2100
8.5	Alcanza 8.5 W/m^2 (equivalente a unos 1370 ppm de CO2 eq.) en 2100

Junto con los nuevos RCPs se formó el CMIP5 (*Climate Model Intercomparasion Project* 5) con el objetivo de crear una base de trabajo donde poner a disposición de la comunidad científica toda la información climática a emplear en los trabajos relacionados con el 5º informe del IPCC.

Debido a la enorme información generada por los diferentes centros de investigación, el CMIP5 ha dividido la información en diferentes niveles con el

objetivo de que todos los centros de investigación aporten un mínimo de información común que permita la comparación entre ellos. Así, el primer nivel, denominado "*Core*" y que debe ser proporcionado por todos los miembros, lo forman los RCPs 4.5 y 8.5. En un segundo nivel y denominado "*Tier* 1" se encuentran los RCPs 2.6 y 6.0 y experimentos más detallados, y en el último nivel, denominado "*Tier* 2" se encuentran experimentos más complejos, como, por ejemplo, los *Extended Concentration Pathways*, extensiones de los RCPs hasta el año 2300.

La elección del modelo climático empleado en este estudio no ha sido determinada por ningún criterio científico específico ya que, dado lo reciente de los modelos asociados al CMIP5, todavía no existe la suficiente literatura científica relativa al comportamiento de todos los modelos existentes, con lo que por ahora es completamente imposible establecer una clasificación (mejores modelos/peores modelos) de los modelos existentes. Para la selección del modelo elegido de entre los existentes se impuso que

1. Mostrara un buen comportamiento en el pasado informe del IPCC o al menos fueran generado por los mismos organismos científicos, buscando un cierto grado de confianza en la capacidad de los equipos involucrados a la hora de generar un modelo y,

2. Dando preferencia a modelos que fueran del tipo Modelos de Sistema Terrestre (ESM por las siglas en inglés de *Earth System Model*), los modelos climáticos más avanzados. Estos modelos son un conjunto de ecuaciones que describen los procesos que tienen lugar dentro y entre la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera marina y terrestre. Estas ecuaciones recogen los mecanismos físicos, químicos y biológicos que gobiernan a los elementos del sistema terrestre y también incluyen erupciones volcánicas y variaciones de la radiación solar entrante. Su principal avance frente a los Modelos de Circulación General tradicionales es que permiten la interacción del sistema con el ciclo del carbono y tienen en cuenta la bioquímica y la biogeología marina.

La corrección del error sistemático

Tal y como hemos comentado anteriormente, si necesitamos que los datos regionalizados en un punto de un cierto modelo climático se puedan interpretar en sus valores absolutos y no sólo en términos de incrementos relativos entonces debemos corregir los posibles errores que han conducido introducir sesgos en la regionalización para así poder obtener valores que podamos estudiar en su magnitud absoluta. Esta corrección es lo que denominamos Corrección del Error Sistemático. Por lo tanto, antes de estudiar las simulaciones obtenidas al regionalizar las proyecciones futuras de los 9 modelos considerados debemos llevar a cabo la corrección de tal error.

Sea cual sea el método de corrección empleado, buscaremos no corregir todos los datos de la misma forma (no sumarles o multiplicarles la misma cantidad), sino de forma proporcional, de manera que a los valores que tengan mayor error se les apliquen mayores correcciones, y los valores que tengan menor error se les apliquen menores correcciones. Para determinar qué valores tienen mayor o menor error estudiaremos la función de distribución de esos valores, comparando la función de distribución de los valores observados frente a los de ERA40 regionalizados, y la de los valores de ERA40 regionalizados frente a la de los modelos regionalizados. En concreto usaremos la función de distribución acumulada empírica o ECDF (*Empirical Cumulative Distribution Function*) que nos permite, al comparar dos entre sí, comparar la diferencia entre las mismas magnitudes (en rigor, entre los mismos cuantiles, ya que estamos trabajando con funciones de distribución) y establecer relaciones de proporcionalidad entre las magnitudes que dependerán de las propias magnitudes en sí. Este método nos proporciona una forma no-lineal (como buscábamos) de establecer las diferencias entre dos grupos de datos diferentes; la medida de esas diferencias será lo que nos permita corregir el error entre ambos grupos de datos.

La forma de aplicar este método se ejemplifica en la figura 2. Aunque en rigor el método está basado en el uso de la ECDF, aquí hemos representado el periodo de retorno de cada cantidad de precipitación (que gráficamente es más ilustrativa que la temperatura), entendido como la inversa de su probabilidad, dado que visualmente es mucho más ilustrativo (y también es una manera de representar su función de distribución). Lo que vamos a ver es un ejemplo de la forma en que funciona la corrección, donde los círculos negros representan valores observados; los azules, valores simulados del periodo de control (se correspondería con el experimento *Historical* de un modelo climático); y los verdes, los valores simulados de un escenario futuro.

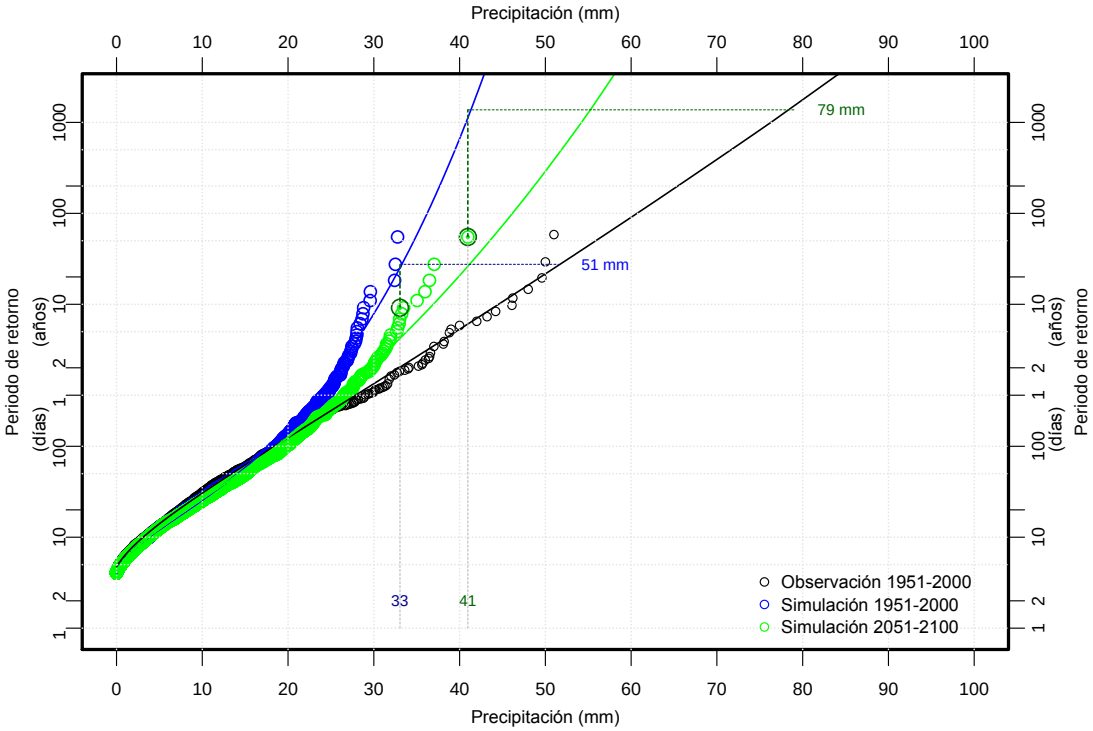

Figura 2. Visualización, con ejemplos, de la corrección del error sistemático. Los puntos negros se corresponden con valores observados, los azules con simulados para un periodo de control, y los verdes con simulaciones de periodos futuros. Las líneas continuas son las distribuciones teóricas de cada grupo. El uso del periodo de retorno (como inversa de la probabilidad) muestra las relaciones entre los grupos, ejemplificadas en los casos de 33 y 41 mm.

En resumen, el proceso de generación de escenarios de clima futuro a escala local a partir de la metodología FICLIMA comprende: 1) un proceso de caracterización climática de la zona a través de la cual se determinan los predictores potenciales a emplear; 2) verificación de la metodología, es decir, el funcionamiento de la misma en la zona de estudio; 3) validación de los modelos climáticos a emplear, es decir, determinar la manera en la que cada modelo climático simula el clima actual; 4) generar las proyecciones climáticas a partir de varios modelos climáticos bajo diferentes escenarios de clima futuro y 5) corregir el error sistemático asociado al proceso completo de regionalización. Llegados a este punto se disponen de proyecciones climáticas robustas que se utilizan en el cálculo de índices de riesgo.

2.2. Descripción del Índice FWI

Se define el peligro de incendio como la medida de probabilidad de que ocurra un incendio forestal estimado en función de la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la precipitación.

El índice canadiense ***Fire Weather Index*** (**FWI**) fue diseñado para identificar y cuantificar el peligro de incendio y sus componentes (iniciación, consolidación y propagación). Se basa, exclusivamente, en datos meteorológicos, y calcula un

único valor diario. Este índice fue desarrollado considerando un bosque de pino típico en Canadá por lo que presenta ciertas limitaciones al aplicarse en otras regiones del mundo, pero en general presenta un buen funcionamiento en cualquier región.

Su desarrollo comenzó en 1993 y se fue consolidando hasta su estado actual. El índice pretende:

- Definir la estación de fuego
- Determinar las medidas adecuadas en la prevención de incendios
- Estudiar la probabilidad de ocurrencia de un incendio
- Evaluar la capacidad de extinción
- Capacidad de proporcionar información pública
- Toma de decisiones relacionadas con las áreas de riesgo, los permisos de quemas de rastrojos e incendios controlados.

El FWI se basa en el contenido de humedad de tres tipos de combustibles forestales y en el papel del viento en el comportamiento del fuego. Partiendo de las variables meteorológicas se calculan una serie de subíndices que tras su combinación determinan el valor del FWI.

En total el cálculo del índice Canadiense consta de seis componentes: 3 componentes relacionadas con la humedad del combustible, dos componentes relacionadas con el comportamiento del fuego y un índice final conocido como FWI (tabla 5).

Tabla 5. Descripción de los subíndices o componentes relativos al cálculo del índice FWI.

Códigos de humedad de combustible	**FFMC** Código de humedad de combustible fino representa el contenido de humedad de combustible fino en el suelo del bosque **DMC** Código de humedad del humus representa el contenido de humedad de la horajasca suelta y de la materia orgánica **DC** Código de sequía representa el contenido de humedad del estrato profundo de material orgánico compactado
Índices de comportamiento del Fuego	**ISI** Índice de Propagación Inicial representa el grado de propagación sin considerar las cantidades de combustible. Se calcula a partir de los datos de viento y los obtenidos para el FFMC **BUI** Índice de Combustión representa el total de combustible disponible para la propagación del fuego. Se calcula como una combinación del DMC y del DC
	FWI Índice meteorológico de Fuego representa la intensidad de propagación del fuego y la energía liberada por unidad de longitud del frente de fuego. Se calcula como la combinación de los índices ISI y BUI

Partiendo de los datos meteorológicos se calculan primero los códigos de humedad del combustible, a continuación, y partiendo de los códigos de humedad, se calculan los índices de comportamiento del fuego y finalmente, y a partir de estos últimos, se calcula el FWI. El esquema de trabajo se muestra en la figura 3.

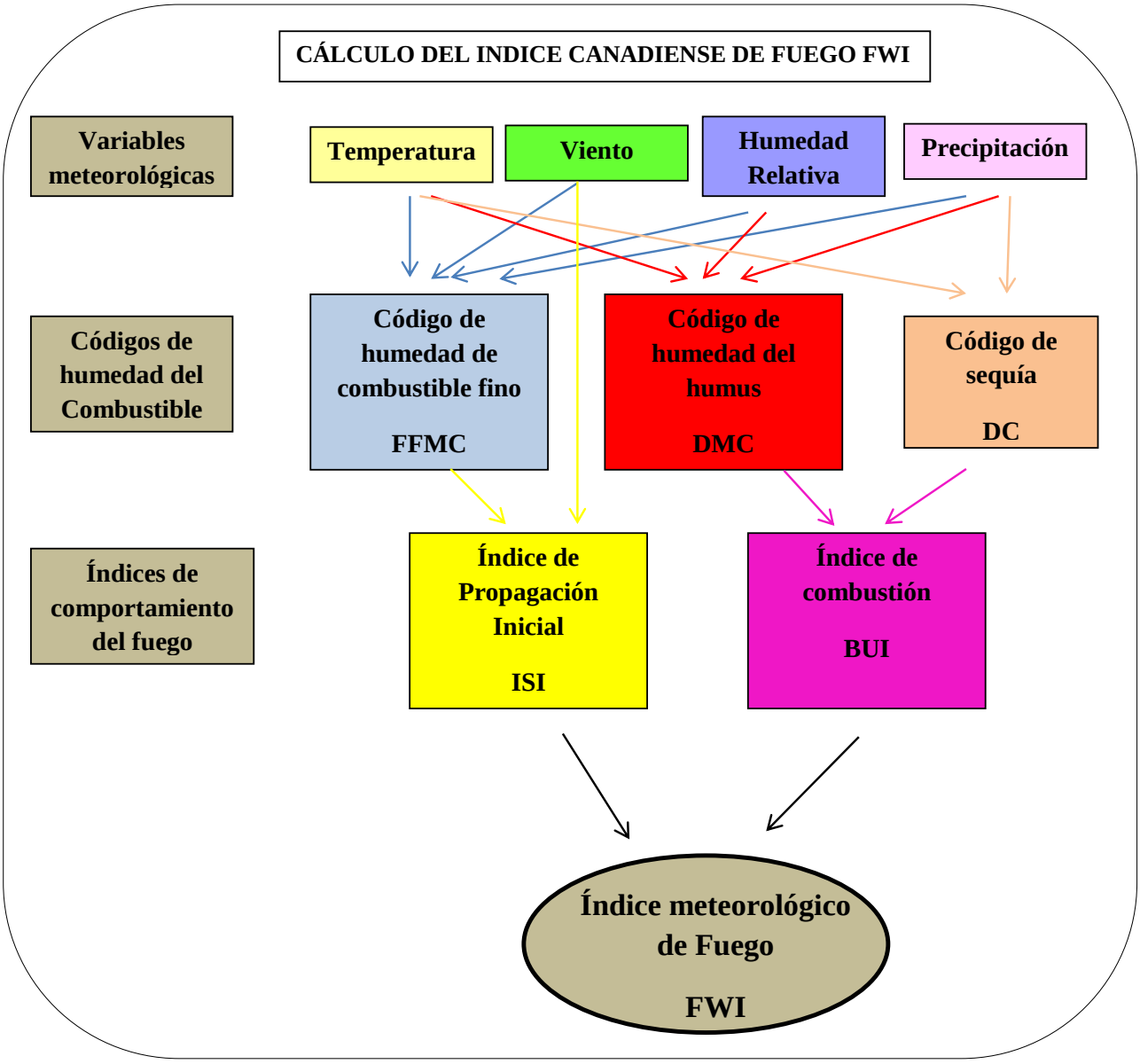

Figura 3. Esquema de cálculo del índice canadiense del fuego FWI.

2.3. Descripción del Índice n

El índice *n* es un indicador carente de dimensión de la irregularidad temporal de la precipitación (Monjo, 2016). Dado un evento específico de precipitación, los acumulados máximos para diferentes intervalos de tiempo pueden ser ordenados acorde con la duración del evento. Si los acumulados máximos son divididos por el intervalo de tiempo (t), se obtiene una curva de intensidades máximas promedio (MAI), definida por:

$$I(t) \equiv \frac{P(t)}{t}$$

Donde I(t) es el MAI de un tiempo *t,* y *P(t)* la acumulación máxima en el tiempo. Considerando la evolución de las acumulaciones e intensidades con el tiempo, se define mejor el MAI como:

$$I(t) = I(t_o)\left(\frac{t_o}{t}\right)^n$$

El índice *n* queda definido como el exponente del MAI (Moncho *et al.*, 2009), acotado entre 0 y 1, cuyos valores definen el carácter de la precipitación dentro de un intervalo predefinido de tiempo, siendo n=0,5 el correspondiente a precipitación "eficiente", cuanto más cercano a 1 corresponderá con precipitación de tipo más irregular (convectivo) y cuanto más cercano a 0 con precipitación de tipo más regular y persistente (orográfica o frontal).

2.4. Descripción del Índice CI

El Índice de Concentración (CI, *ConcentrationIndex*) (Martin-Vide, 2004) es un índice de medición del carácter pluviométrico anual de una región determinada. El CI determina cuál es la aportación media de cada día de precipitación sobre el total anual, en función del total de días de lluvias anuales medio y la precipitación recogida en cada uno de ellos, lo cual determina lo regular o irregular del carácter pluviométrico de una zona.

El CI se obtiene de forma empírica a través de las mediciones de precipitación observadas, obteniendo "curvas de concentración", de aspecto marcadamente exponencial, a partir de los acumulados de precipitación y de los días de precipitación. El área bajo la curva se define como:

$$A \approx \left[\frac{a}{b}e^{bx}\left(x-\frac{1}{b}\right)\right]_{x=0}^{x=1}$$

donde a y b son las constantes de ajuste de las curvas exponenciales $Y=aX\cdot e^{bX}$. El CI queda entonces definido como:

$$\mathrm{CI} = \mathrm{A}/5000$$

Su valor queda acotado entre 0 y 1, siendo aquellos valores más próximos a 1 aquellos propios de zonas con una alta irregularidad en la precipitación, siendo el número de días de lluvia anual relativamente bajo, y el porcentaje de la lluvia recogido en pocos de ellos muy alto (propio de zonas Mediterráneas, n valor de 0.61 se corresponde con el hecho de que el 70% del total pluviométrico se concentra en el 25% de los días lluviosos).

2.5. Descripción del Índice de Riesgo de Erosión (IRE)

Con el fin de caracterizar de una manera más concisa aquellas zonas que tanto a día de hoy como en los plazos futuros son, o serán, susceptibles de sufrir procesos de erosión agresivos, se ha definido *ad hoc* un Índice de Riesgo de Erosión (IRE). Éste está relacionado con los anteriores tres índices tomados en cuenta en el estudio: FWI, n-*Index* y CI. Para definirlo, se han determinado los valores umbral de cada índice que caracterizan aquellas zonas proclives a sufrir una erosión fuerte en el futuro; bien por el tipo de precipitación bien por el riesgo de incendios. Los valores críticos son: n-*Index* (0,7), CI (0,65) y FWI (>12). En aquellas zonas donde al menos dos de los tres umbrales sean superados, se define el IRE en función de los valores alcanzados de la siguiente forma:

IRE	FWI			
	<12	12-15	15-18	>18
n≥0.7, CI≥0.65	0	1	2	3
n<0.7, CI≥0.65	0	0	1	2
n≥0.7, CI<0.65	0	0	0	1
n<0.7, CI<0.65	0	0	0	0

Tabla 6. Distribución de valores asignados al IRE en función de aquellos que toman los tres índices que tiene por base: n-Index, CI y FWI. Los valores de 1 asocian Riesgo Bajo, los de 2 Riesgo Medio y los de 3 Riesgo Severo.

Debido a la naturaleza de la precipitación y su evolución prevista en el futuro, los umbrales correspondientes a sus índices (n y CI) se han mantenido constantes, mientras que la variación del FWI sí determina el nivel del IRE. A la hora de cuantificar el área correspondiente a cada índice en los periodos de estudio fijados, se ha considerado, gracias al CORINE *LandCover* (CLC), que el suelo sea susceptible de erosión (se eliminan zonas urbanas y de cultivo, por ser zonas altamente antropizadas y en constante mantenimiento, figura 4).

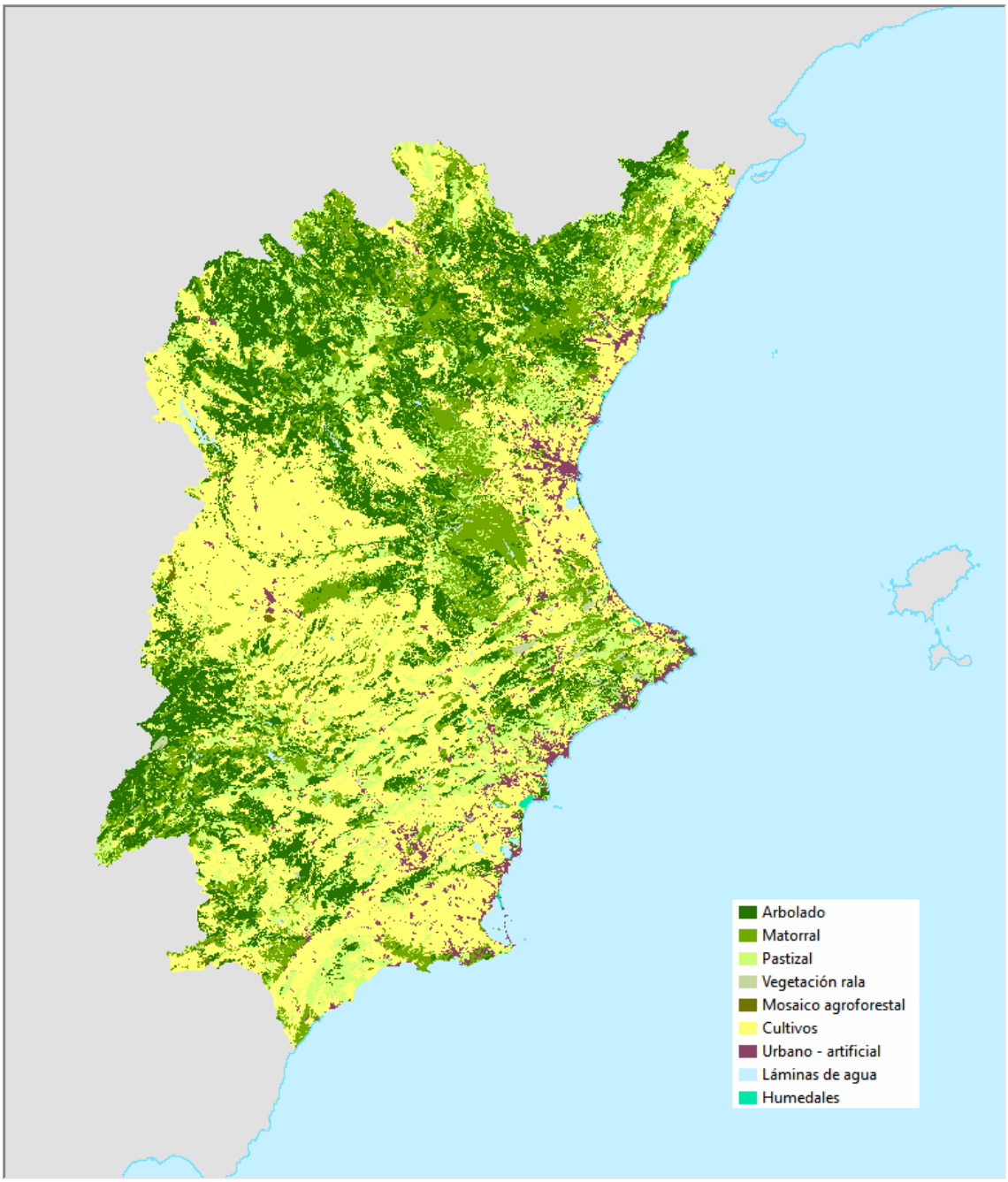

Figura4. Usos del suelo registrados y catalogados en el CLC en la zona de estudio (Cuencas Hidrográficas de los ríos Segura y Júcar).

3. Resultados

3.1. Análisis de la meteorología y climatología de la zona de estudio

El estudio se ha desarrollado en las cuencas hidrográficas del Júcar y el Segura. Debido a la intrincada orografía de las cuencas hidrográficas del Júcar y Segura, la climatología de la zona es muy variada. Por lo que, para entender

el comportamiento climático de la zona de estudio, y poder desarrollar mejor su estudio meteorológico, se ha partido de la clasificación climática de Koeppen-Geiger para extraer los climogramas típicos dentro de la zona de estudio (figura 5).

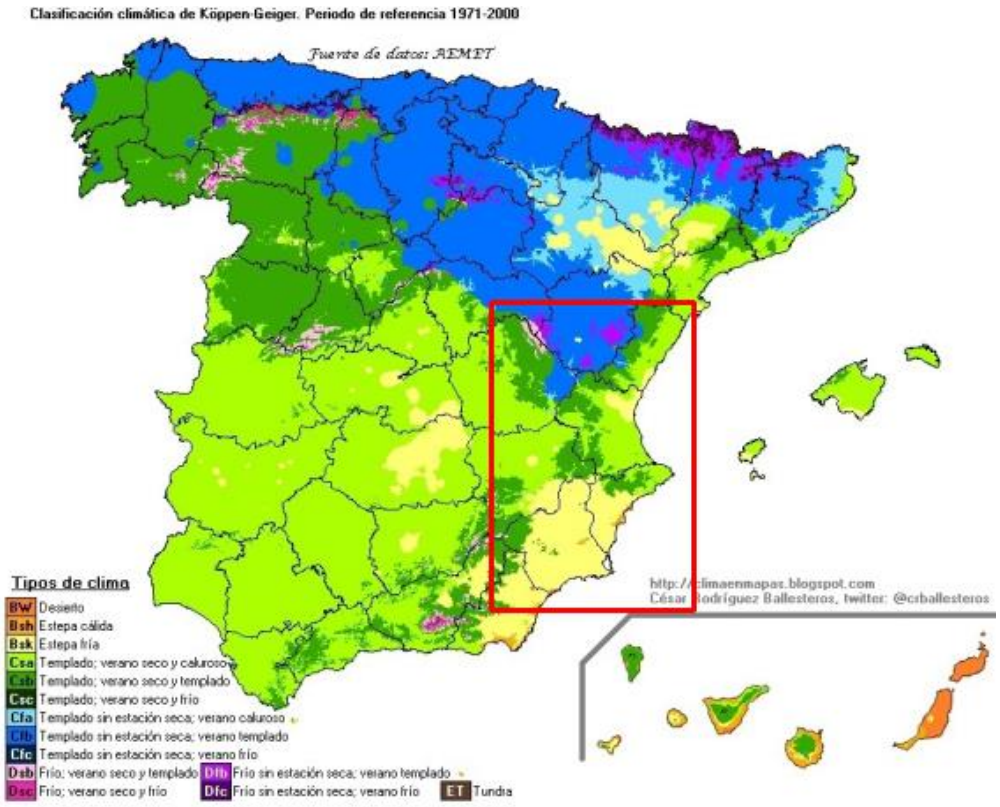

Figura 5. Clasificación climática de Köepen-Geiger para el periodo de referencia 1971-2000. Fuente de datos Aemet, fuente representación: @crballesteros

Así pues, la cuenca hidrográfica del Segura se puede asimilar al clima predominente: bsk, estepa fría, que coincide también bastante bien con la provincia de Murcia y la zona de Almería que pertenece a dicha Cuenca (figura 6).

La Cuenca del Júcar es mucho más variada y compleja para poder extraer un climograma tipo, así que para discriminar diferentes comportamientos climáticos acordes con su orografía se ha asimilado que la zona montañosa del norte de la demarcación hidrográfica del Júcar (Cuenca y Teruel), se corresponde con una zona homogénea de temperaturas más bajas y lluvias más repartidas a lo largo del año, el clima medio que ha resultado según la clasificación de Köeppen-Geiger ha sido el Csb, incumpliendo el criterio de precipitación mínima para la estación seca, no el de regularidad de lluvia, para no ser un Cfb (figura 7).

Entre ambas ubicaciones, en la Cuenca del Júcar, tenemos una zona de transición; con unas temperaturas ligeramente más bajas que las del clima de la cuenca del Segura. Pero que a diferencia de esta e incluso del clima de la zona norte destaca por estar muy bien expuesta a los vientos mediterráneos

húmedos, con lo que las acumulaciones de precipitación media anual son los mayores de las tres áreas en la provincia de Valencia, que se ha escogido como representativa de este tipo de clima: Csa. (figura 8).

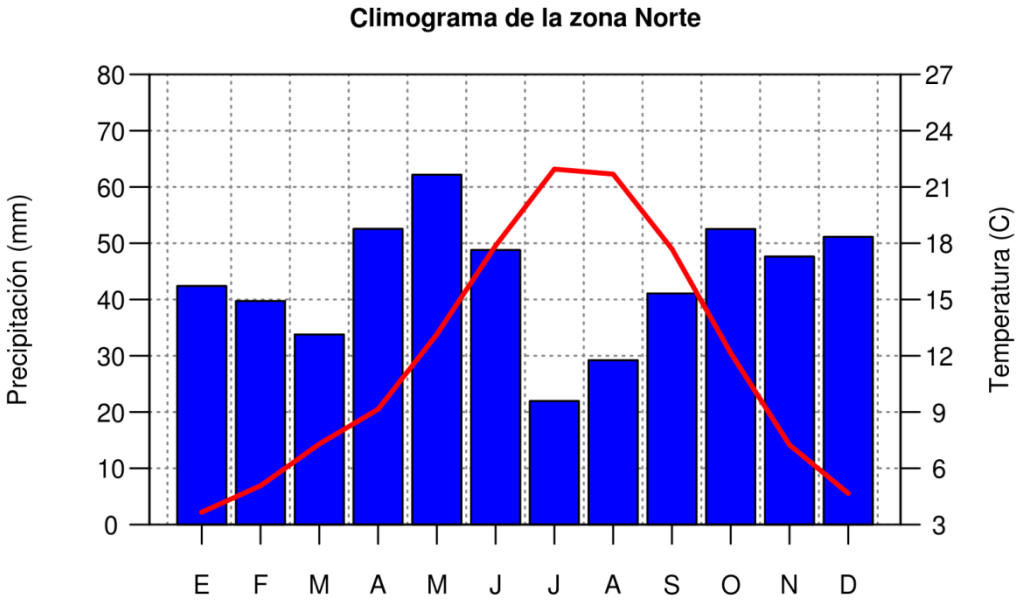

Figura 6. Climograma promedio para el periodo 1971-2000 del área norte de la zona de estudio. Clima (Csb), zona muy influenciada por el sistema Ibérico

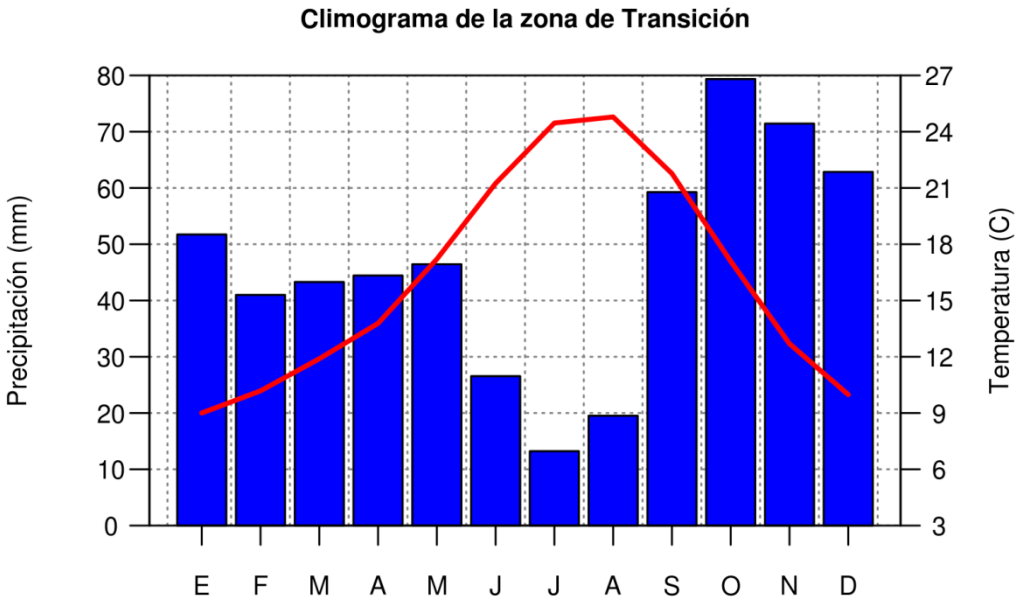

Figura 7. Climograma promedio para el periodo 1971-2000 del área de transición de la zona de estudio. Clima (Csa), zona muy influenciada por su abertura a los vientos mediterráneos

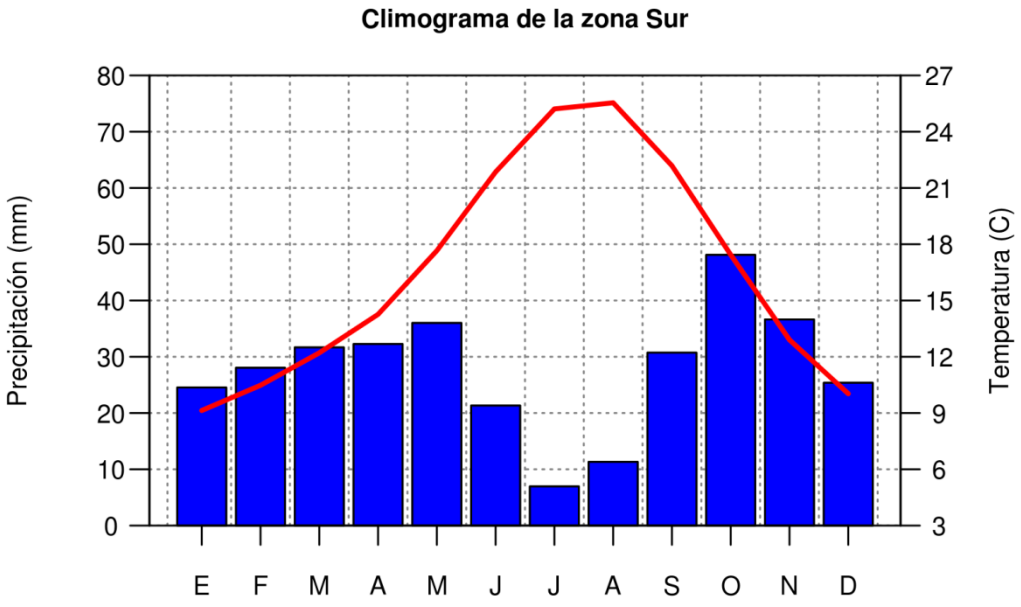

Figura 8. Climograma promedio para el periodo 1971-2000 del área sur de la zona de estudio. Clima (BSh), zona muy influenciada por la orografía al quedar a sotavento de la mayor parte de los vientos húmedos.

Una vez aproximados a los tipos de clima en los que estamos inmersos en cada zona se pueden estudiar las condiciones meteorológicas que favorecen la estratificación estable de la baja atmósfera y la mala ventilación por debajo de la capa límite que se suele dar con la presencia de inversiones térmicas. Existe gran cantidad de literatura sobre este fenómeno, como por ejemplo (Watson et al., 2015) o (Conesa et al., 2014), siendo este último a microescala en la zona del medio Segura.

Todos los datos meteorológicos a emplear (temperaturas máxima y mínima diarias del aire y precipitación diaria) se han obtenido de estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet). Dado que para el cálculo de los bioindicadores es necesario poseer datos tanto de precipitación como de temperatura, sólo se han considerado observatorios meteorológicos que tuvieran datos diarios de ambas variables. Además, y puesto que más adelante necesitaremos regionalizar los datos de los modelos climáticos sobre tales observatorios, necesitaremos imponer un número mínimo de datos observados en cada observatorio (para así caracterizar bien su clima), al menos 4.000 datos diarios en nuestro caso, lo que ha impuesto una nueva condición sobre los observatorios.

Antes de emplear tales datos se hace necesario un trabajo previo de control de calidad de los datos y de la homogeneización de éstos.

- El control de calidad de los datos consiste en desarrollar un conjunto de pruebas sobre tal serie que garantice que los datos son coherentes

dentro de la propia serie de estudio. Los dos controles automáticos principales a emplear en un control de calidad son:

- Coherencia básica. Rechazo directo de valores manifiestamente erróneos, como por ejemplo las precipitaciones negativas.
- Puntos atípicos u *outliers*. Valores desacostumbradamente atípicos dentro de un conjunto dado de datos, es decir, valores que parecen provenir de fuentes de datos diferentes o haber sido generados de una forma distinta al resto de los datos. En este caso, la dificultad teórica de su detección provendrá de la definición que hagamos de “atípicos”. En la práctica, la detección se refiere generalmente a valores de magnitud absoluta desacostumbradamente alta.

➢ La homogeneización de los datos de una serie temporal hace referencia al control de calidad de los datos en tanto que elementos de una serie temporal, es decir, estudia la posible coherencia de los datos exactamente en el orden en el que son presentados. Nótese que los controles anteriores podrían realizarse sobre las mismas series, pero desordenadas, pero no nos informan sobre la posible variabilidad temporal de los datos, algo que casi siempre viene ligado cuanto menos a ciclos anuales.

Debe hacerse notar que el proceso de homogeneización de una serie puede presentarse también como parte del proceso general del control de la calidad de los datos de una serie; si se presenta aquí como un punto separado es para subrayar la importancia de tal proceso y de sus resultados.

En la figura 9 podemos ver los datos reales de temperatura máxima diaria de un observatorio meteorológico real. Como se puede apreciar mediante mera inspección visual de la representación gráfica de los valores diarios de la temperatura máxima, entre los años 1960 y 1965 se presenta una fuerte irregularidad de los datos. Esa irregularidad ha sido perfectamente detectada por el test de homogeneidad (las líneas rojas verticales), y por lo tanto los datos de tal periodo deben ser rechazados.

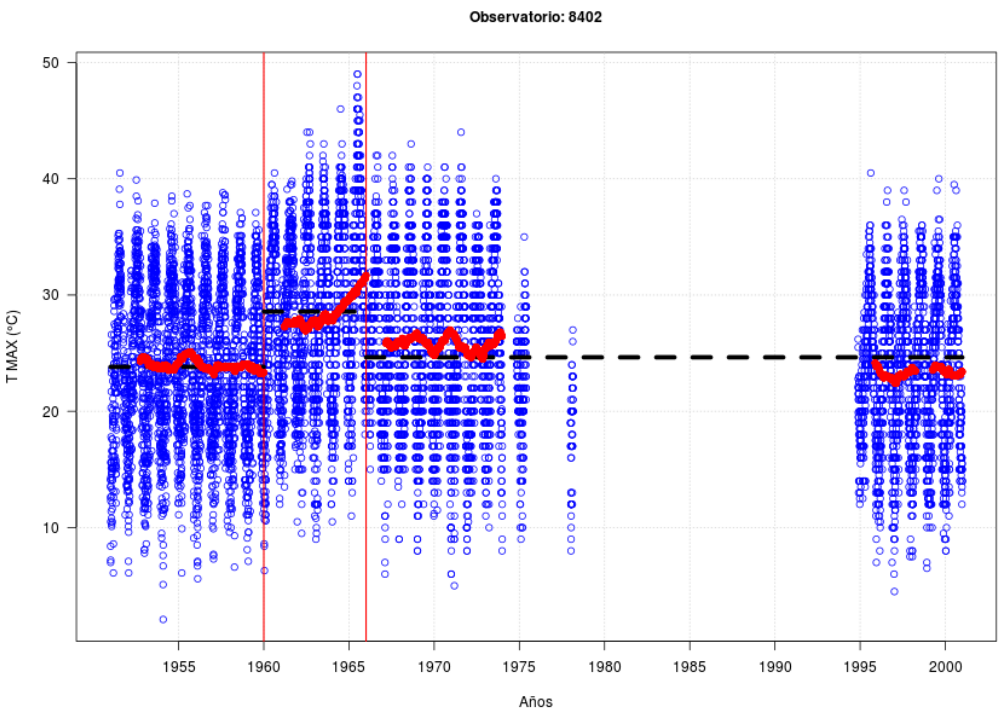

Figura 9. Serie observada diaria de temperatura máxima correspondiente a un observatorio real utilizado como ejemplo.

Para realizar la búsqueda de inhomogeneidades, empleamos un test de comparación de distribuciones de Kolmogorov-Smirnov, un test estadístico no-paramétrico (que no presupone distribuciones de la variable a estudiar, por tanto) que nos proporciona un p-valor que podemos emplear como medida del parecido entre dos años. Si un cierto año ha sido marcado como posible indicador de inhomogeneidad entonces se le somete a una prueba más genérica, averiguando el p-valor de cada uno de los años de toda la serie con respecto a esos dos años. Si se presenta un salto o una ruptura entre todos esos p-valores en los años que estamos considerando entonces sí que se considera que tenemos una inhomogeneidad verdadera para toda la serie.

Tras el proceso de control de calidad y homogeneización de las series meteorológicas proporcionadas por los distintos modelos y considerando que deben disponer de datos tanto de temperatura como de precipitación se han seleccionado para el estudio 265 observatorios (figura 10).

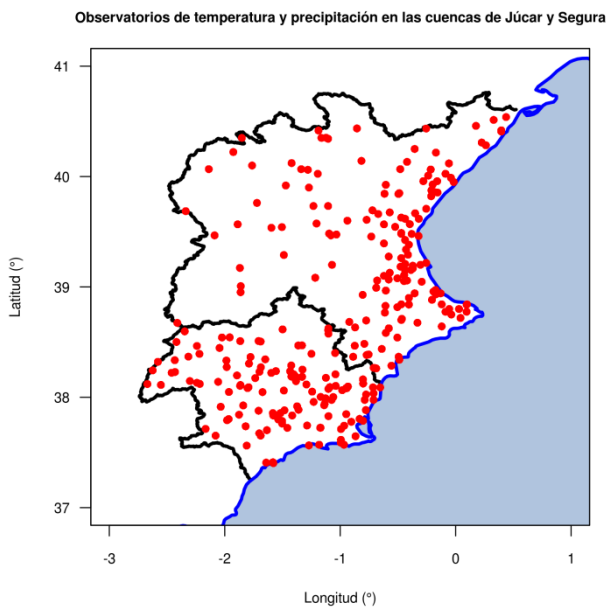

Figura 10. Observatorios con datos diarios suficientes tanto para temperatura como para precipitación seleccionados finalmente para el estudio.

3.2. Análisis de las variables ambientales y de la vulnerabilidad frente al clima

Análisis del Relieve

- Análisis sobre la Cuenca del río Segura

Esta cuenca tiene una gran singularidad geográfica sobre un extenso territorio que va desde los 2000 metros hasta el litoral mediterráneo. La parte más abrupta del relieve de la cuenca se encuentra al norte, destacando al sureste la depresión prelitoral del Guadaletín y del propio Segura en el tramo medio, la depresión del campo de Cartagena-Mar Menor. Al norte de la cuenca destacan los altiplanos de Yecla-Jumilla y de Corral de Rubio entorno a los 750 m de altitud. Las zonas de mayores pendientes corresponden con los relieves montañosos descendiendo hacia los valles de las vegas litorales.

La Cuenca del Segura tiene una gran complejidad y heterogeniedad geológica. Las morfologías de los cauces aparecen como el resultado de la larga interacción entre el agua y los materiales que han sido fuertemente erosionados. Destacan los materiales sedimentarios calizos y dolomíticos en la cabecera, mientras que en los cursos medios aparecen materiales néogenos.

Respecto a la morfología es destacable la presencia de fallas de gran importancia que provocan encajonamientos de los valles y cambios de dirección. La cuenca del Segura también presenta una gran diversidad de tipos de suelo, destacando los xerosoles, regosoles y litosoles.

- Análisis sobre la Cuenca del río Júcar

El relieve está constituido por una serie de grandes unidades en forma de extensos altiplanos, sierras y valles interiores, cuyas direcciones responden a las de los distintos dominios tectónicos que concurren en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar: catalánide, ibérico, bético, así como las diferentes áreas de transición. En el Norte, las sierras (Maestrazgo, Pina y Espadán) se alinean en el sistema Ibérico, en dirección NO-SE. En el centro, sobre el piedemonte del bajo Turia y Júcar, se eleva la meseta de Requena. Al Oeste la cuenca está atravesada por parte de las cordilleras Ibérica y Oretana en las que destacan la Sierra de Albarracín, la Muela de San Juan, etc. Hacia el NO se desarrolla la zona oriental de la llanura manchega mientras hacia el SO se extiende la Sierra de Taibilla, los Caleses y la Sierra de Alcaraz. En el Sur de la cuenca se desarrollan las sierras de Benicadell, Mariola y Aitana pertenecientes al extremo oriental de las cordilleras Béticas.

El 30% de la superficie de la cuenca tiene altitudes inferiores a 200 m; la mayor parte está comprendida entre 200 y 1.000 m y sólo algunas zonas reducidas superan los 1.000 m.

Los materiales del triásico componen gran parte de la cuenca, estando la mayor parte de los terrenos permeables en las zonas de relieve más acusado, generalmente de estructura anticlinal muy tectonizada, mientras que los materiales impermeables ocupan preferentemente los valles sinclinales.

Vulnerabilidad frente a la erosión

Es de destacar que las zonas naturales de la cuenca ocupan un 45%, la mayor parte en las áreas montañosas con grandes extensiones de coníferas y matorral. Otros usos son la ocupación de suelo urbana con un 5% de concentrada en el área litoral y en las vegas, destacando las ciudades de Murcia y Valencia. Otro de los usos destacables de las vegas es el agrícola, siendo zonas de gran fertilidad y escasa pendiente.

Se identifican como usos del suelo potencialmente más vulnerables los que se encuentran bajo coberturas vegetales, especialmente arbolados y matorral, que por sus características y ubicación en zonas de pendiente pueden sufrir graves procesos de erosión que afecten seriamente a las cuencas.

Los problemas relativos a los procesos de erosión y sedimentación afectan a las cuencas medias de los grandes ríos principalmente. También se ven afectadas la totalidad de las cuencas de los ríos menores, existiendo una especial incidencia en los de la provincia de Alicante, donde los procesos de la desertización son patentes.

Los procesos de erosión y sedimentación se trasladan inmediatamente al ciclo del agua, e inciden de modo directo en reparto de la lluvia útil entre la cantidad

final superficial y subterránea, en los tiempos de concentración de la escorrentía y en la carga sólida transportada.

En las zonas de cabecera de la cuenca, las masas forestales se encuentran fuertemente arraigadas con un alto grado de conservación, con lo que el grado de erosión actual es bajo. La cobertura vegetal de los macizos de la cuenca media del río Júcar se encuentra muy afectada por los incendios forestales de gran calado en las últimas décadas. Se han estimado altas tasas de erosión cercanas 200 y 300 Tm/Ha/año.

Sin embargo, en el caso de una degradación de la cobertura vegetal después de un incendio forestal, el riesgo potencial de pérdida de suelo se vuelve muy elevado, pudiendo haber graves consecuencias sobre el territorio que pueden dar lugar a una situación irreparable en ambas cuencas.

3.3. Proyecciones de escenarios de clima futuro

Como se ha comentado en el apartado de metodología, antes de generar los escenarios de clima futuro han de llevarse a cabo los procesos de verificación y validación que nos permiten corregir el error sistemático a las series “puras” para obtener los escenarios futuros finales.

En los cálculos de los índices de riesgo en las próximas décadas las variables meteorológicas usadas han sido:

Tabla 7. Relación de variables meteorológicas necesarias en la simulación de los índices de riesgo.

Campo	Fuente
Temperatura	Obtenida mediante *downscaling* de cada uno de los modelos climáticos y para los RCPs 4.5 y 8.5.
Precipitación	Obtenida mediante *downscaling* de cada uno de los modelos climáticos y para los RCPs 4.5 y 8.5.
Viento	Salida directa de cada uno de los modelos climáticos y para los RCPs 4.5 y 8.5.e interpolada a los observatorios
Humedad relativa	Salida directa de cada uno de los modelos climáticos y para los RCPs 4.5 y 8.5. e interpolada a los observatorios

Los modelos climáticos que se han utilizado en el estudio y sus características se resumen en la tabla 8.

Tabla 8. Relación de modelos climáticos usados en el estudio.

Climatic Model	Spatial /temporal Resolution	Research Center	References
GFDL-ESM2M	2ºx2,5º daily	National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), E.E.U.U.	Dunne et al. (2012)
CanESM2	2,8ºx2,8º	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CC-CMA),	Chylek et al. (2011)

	daily	Canadá.	
CNRM-CM5	1,4ºx1,4º daily	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, Francia.	Voldoire et al. (2013)
BCC-CSM1-1	1,4ºx1,4º daily	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China.	Xiao-Ge et al. (2013)
HADGEM2-CC	1,87ºx1,25º daily	Met Office Hadley Center, United Kingdom.	Collins et al. (2008)
MIROC-ESM-CHEM	2,8ºx2,8º daily	Japan Agency for marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), and National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan.	Watanabe et al. (2011)
MPI-ESM-MR	1,8ºx1,8º daily	Max-Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany.	Raddatz et al. (2007); Marsland et al. (2003)
MRI-CGCM3	1,2ºx1,2º daily	Meteorological Research Institute (MRI), Japan.	Yukimoto et al. (2011)
NorESM1-M	2,5ºx1,9º daily	Norwegian Climate Centre (NCC), Norway.	Bentsen et al. (2012); Iversen et al. (2012)

Verificación de la metodología

La verificación es un proceso en el cual se analiza la capacidad de la metodología aplicada para simular el clima pasado; en este caso se comparan las series de observaciones simuladas mediante la regionalización del reanálisis ERA40 (tanto de precipitación como de temperatura) con las observaciones reales del periodo común (1958-2000) de la zona de estudio.

En cuanto a la variable de Temperatura, los resultados de la verificación son bueno, con unos valores de MAE notablemente por debajo de aquellos que se obtendrían mediante el mero uso de la climatología como predictor, cometiendo un error medio inferior a 2ºC en la predicción diaria. El Bias se comporta de la manera esperada, con un valor aproximado de 0 (Figura 11).

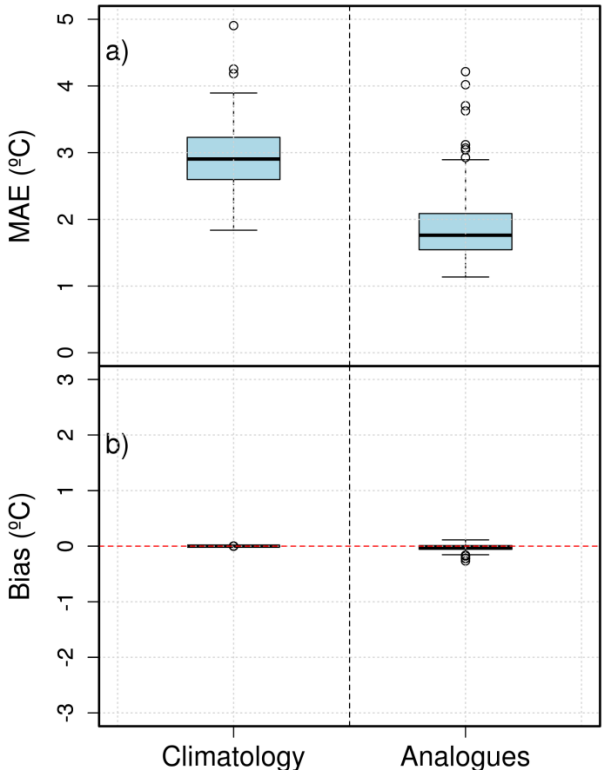

Figura 11. Resultados del proceso de verificación de la Temperatura donde se han comparado los resultados de regionalizar el ERA40 frente a datos observados para las estaciones de las cuencas hidrográficas del Segura y del Júcar (derecha). Con el fin dar calidad a los resultados, se representa a la izquierda los resultados de tomar de referencia la climatología de cada estación. Los estadísticos empleados son el MAE (a) y el Bias (b).

Respecto a la Precipitación, los resultados de los estadísticos son muy satisfactorios. El valor del MAE se encuentra bajo el de la climatología, con un error medio de menos de 2mm. El Bias se sitúa en torno a 0, mientras que en el test KS la mediana de las estaciones se haya por encima del valor umbral de la significancia, lo que mostraría que la distribución de datos obtenida del *downscaling* presenta un comportamiento igual a la serie observada original (Figura 12).

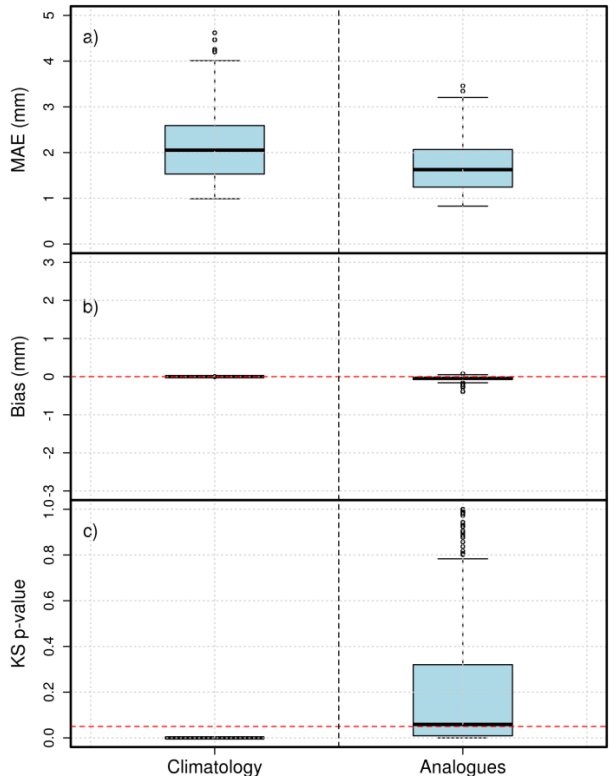

Figura 12. Resultados del proceso de verificación de la Precipitación donde se han comparado los resultados de regionalizar el ERA40 frente a datos observados para las estaciones de las cuencas hidrográficas del Segura y del Júcar (derecha). Con el fin dar calidad a los resultados, se representa a la izquierda los resultados de tomar de referencia la climatología de cada estación. Los estadísticos empleados son el MAE (a), el Bias (b) y el test Kolmogorov-Smirnov (c).

Validación de la metodología

Mediante la validación, se estudia el error introducido por el Modelo de Circulación General (MCG) utilizado. Para ello se comparan las series obtenidas al regionalizar las salidas de control del modelo con las series obtenidas mediante la aplicación de la metodología FICLIMA verificada con anterioridad sobre las proyecciones de los MCG para un periodo común (1958-2000). Los modelos climáticos utilizados en el estudio se resumen en la tabla 6.

Los resultados obtenidos de la validación de la variable Temperatura son buenos. El estadístico Bias muestra una tendencia general de los modelos a sobreestimar el valor de la temperatura alrededor de 0,5ºC, siendo en CNRM-CM5 el modelo con el menor sesgo. La relación de SD es buena para prácticamente todos los modelos, con una SD semejante a la observada, con la excepción del GFDL-ESM2M, cuyo cociente es elevado. El test KS es ampliamente aprobado por todos los modelos (Figura 13).

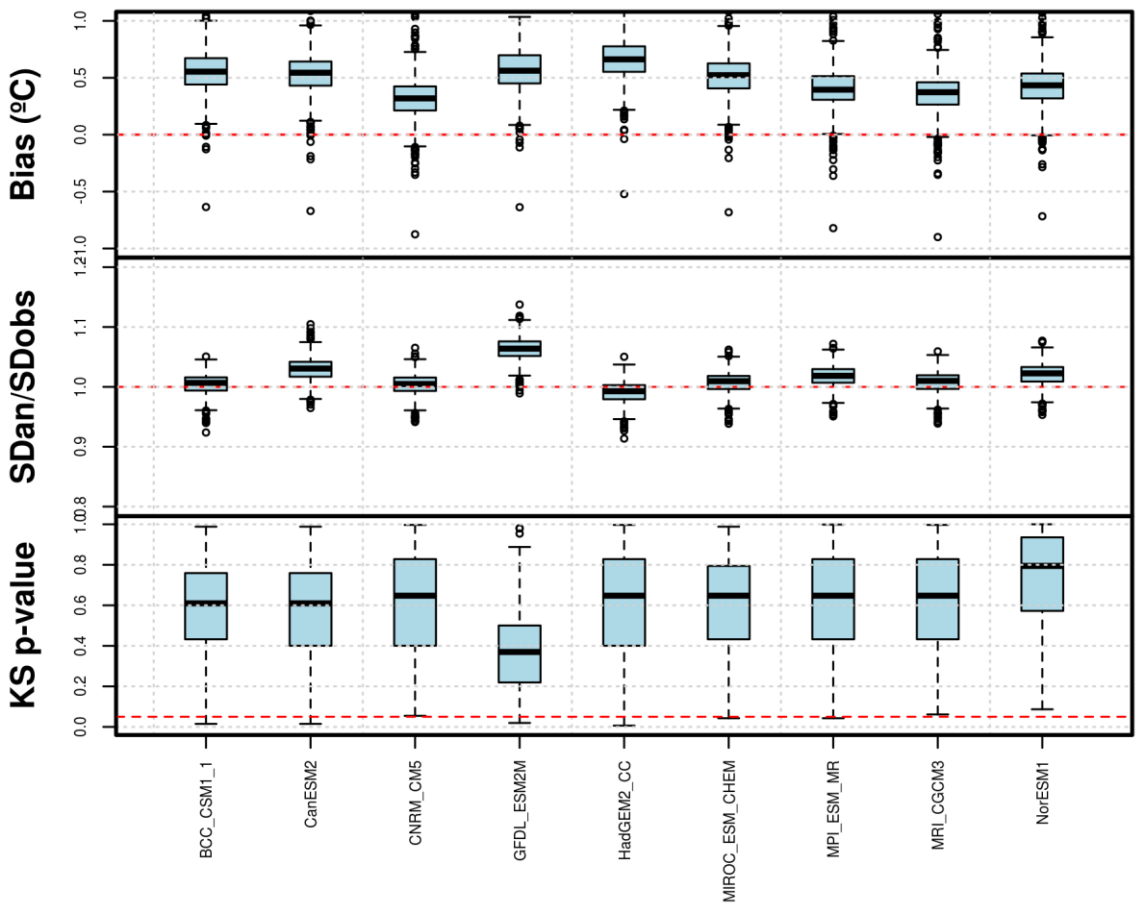

Figura 13. Resultados del proceso de validación de la Temperatura para los MCG regionalizados a las estaciones de las cuencas hidrográficas del Segura y del Júcar. Los estadísticos empleados son el Bias (superior), el cociente entre sendas SD (medio) y el test Kolmogorov-Smirnov (inferior).

Respecto a la Precipitación, los resultados son igualmente muy buenos. Se observa que, en este caso, los modelos tienden a subestimar ligeramente el total de precipitación, entre 0 y -0.15mm/día en el peor de los casos. La relación de SD es buena con la salvedad del modelo MIROC-ESM-CHEM, cuyo valor es algo bajo comparado al resto. En cuanto al test KS entre la salida de control de los MCG y la obtenida mediante el método FICLIMA, todos los modelos lo superan con creces, lo que muestra la buena similitud entre ambas distribuciones (Figura 14).

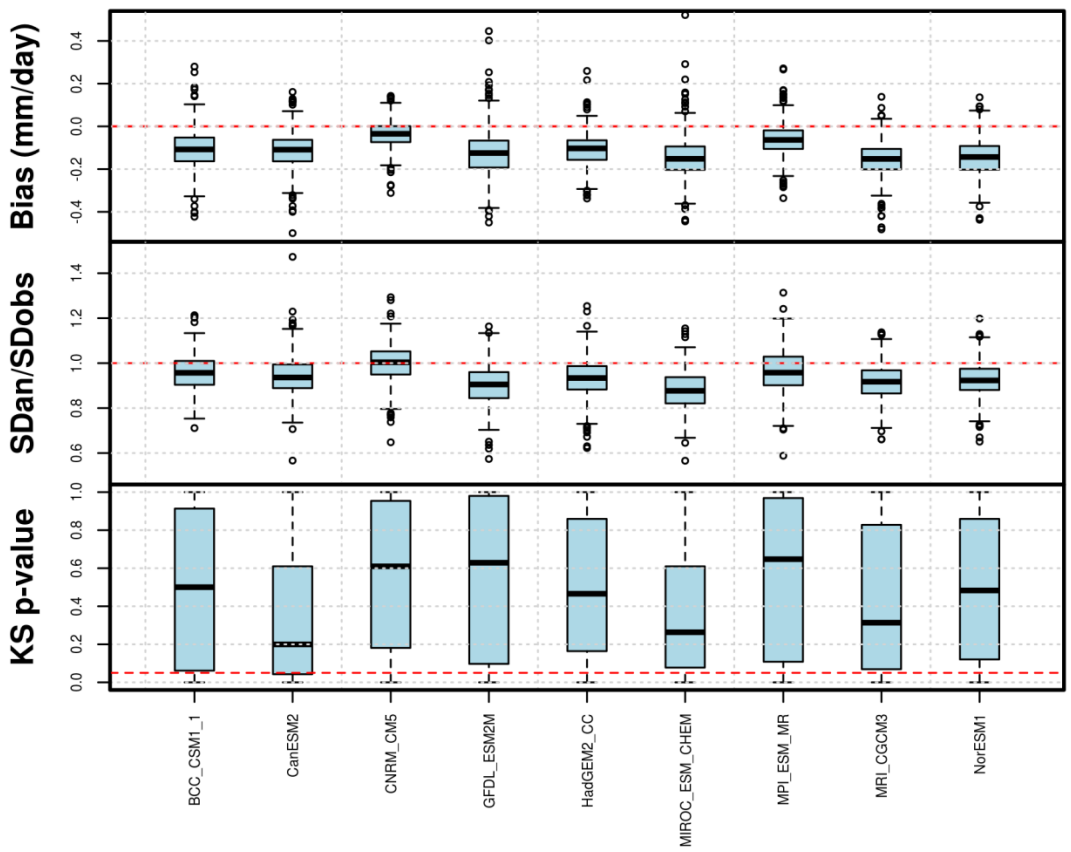

Figura 14. Resultados del proceso de validación de la Precipitación para los MCG regionalizados a las estaciones de las cuencas hidrográficas del Segura y del Júcar. Los estadísticos empleados son el Bias (superior), el cociente entre sendas SD (medio) y el test Kolmogorov-Smirnov (inferior).

Escenarios climáticos futuros de Temperatura

La media anual de temperaturas máximas sufrirá un incremento paulatino hasta el año 2050. Este incremento se situará entre los 1.7ºC y los 2.2ºC hacia mitad de siglo respecto al período de referencia. Este aumento de temperatura tenderá a ser mayor en verano y otoño, con subidas de hasta 3ºC (figura 15).

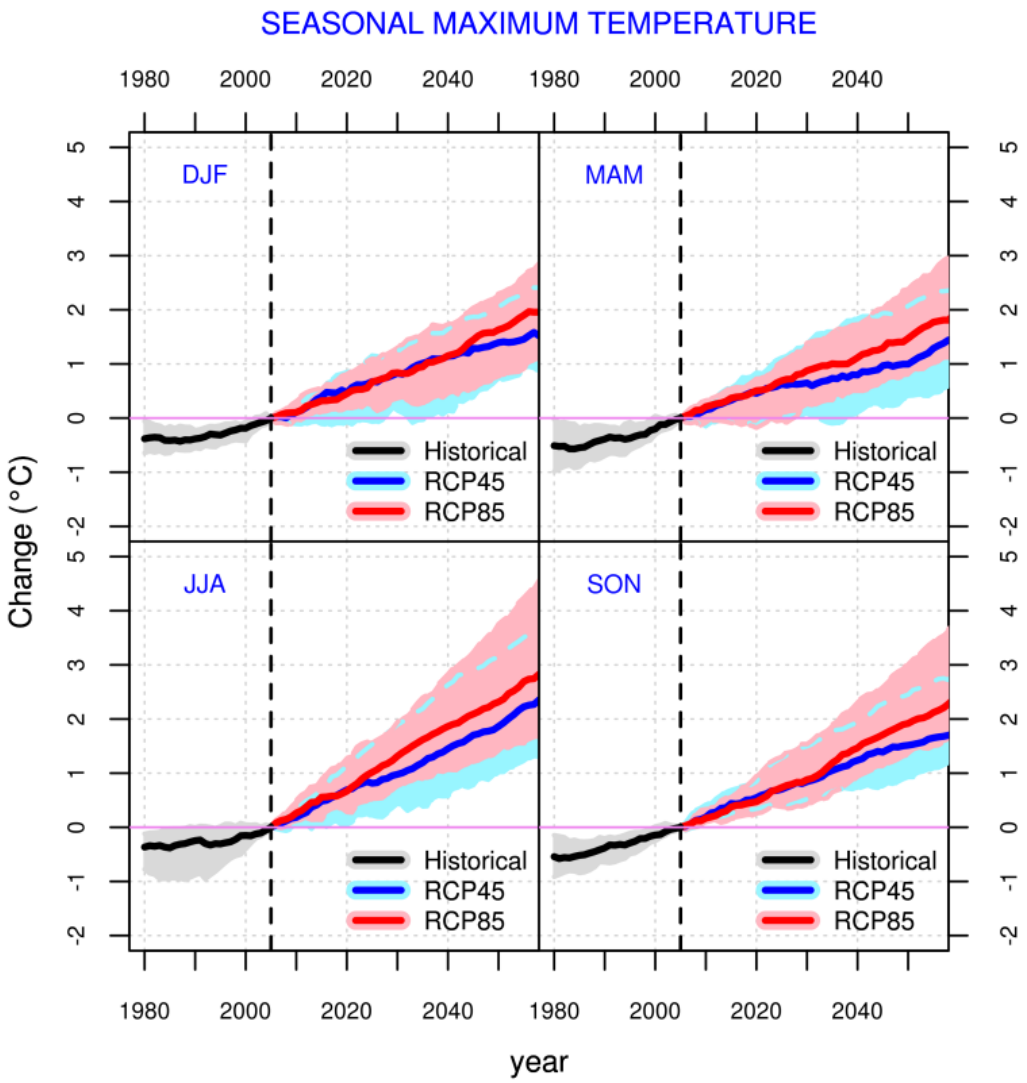

Figura 15: Incrementos estacionales relativos esperados de la Temperatura Máxima para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90

En el caso de las temperaturas mínimas, se observa una tendencia similar pero más atenuada. Los incrementos de temperatura se situarán entre 1.5ºC y 2.0ºC, pudiendo alcanzar en los meses de verano subidas de hasta 2.5ºC (figura 16).

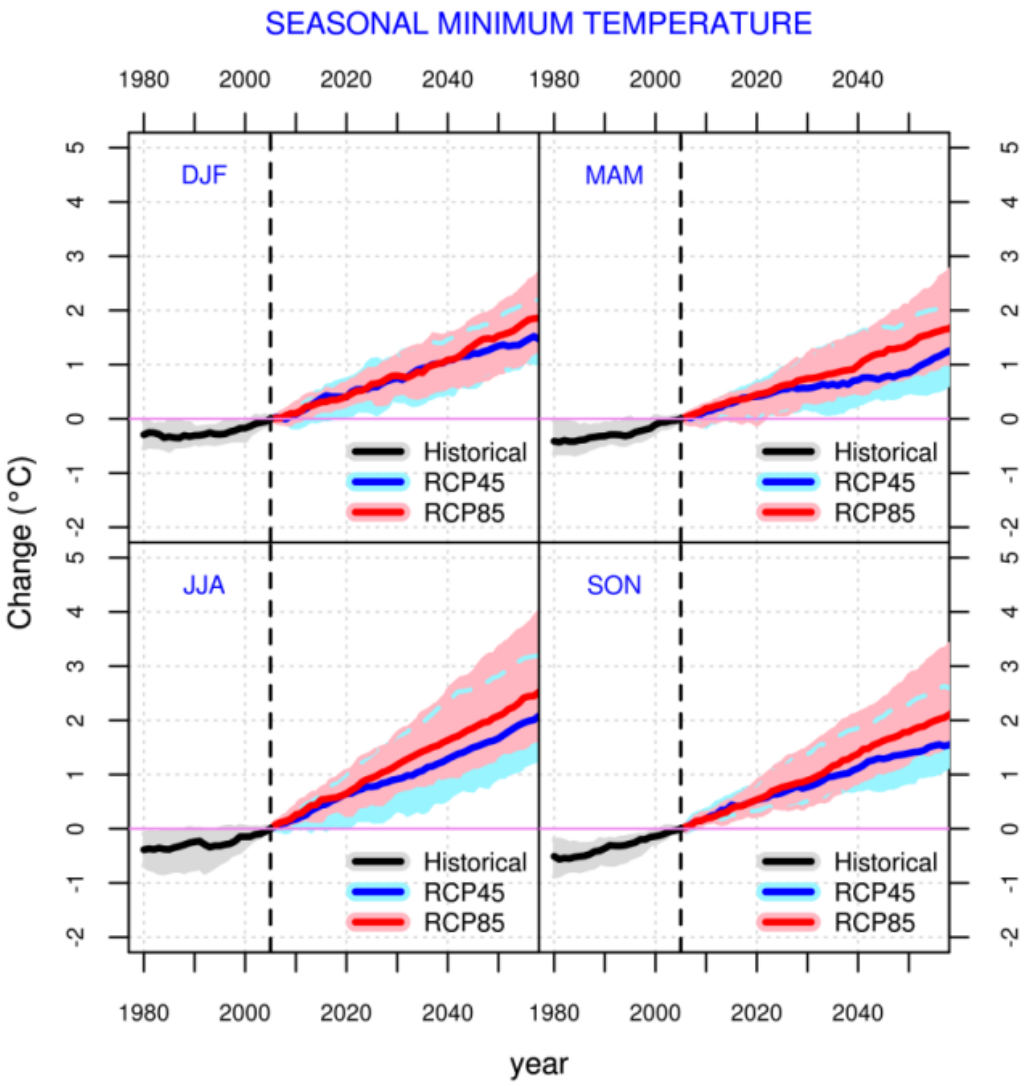

Figura 16Incrementos estacionales relativos esperados de la Temperatura Mínima para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90

Escenarios climáticos futuros de Precipitación

La precipitación presenta distintas tendencias dependiendo de la estación del año que se analice. Exceptuando los meses de primavera, la precipitación tiende a disminuir ligeramente, alcanzando en el año 2050 un descenso medio de entre un 4% y un 6%. Esta tendencia descendente será más marcada en los meses de otoño, con disminuciones de hasta un 10%. En cambio, en primavera las proyecciones más probables sugieren un ligero aumento de la precipitación, que podría ser de hasta un 8% (figura 17). Hay que resaltar que todas estas tendencias presentan un nivel muy alto de incertidumbre, habiendo un abanico de proyecciones que sugieren desde descensos en la precipitación de un 20% hasta aumentos de un 20%.

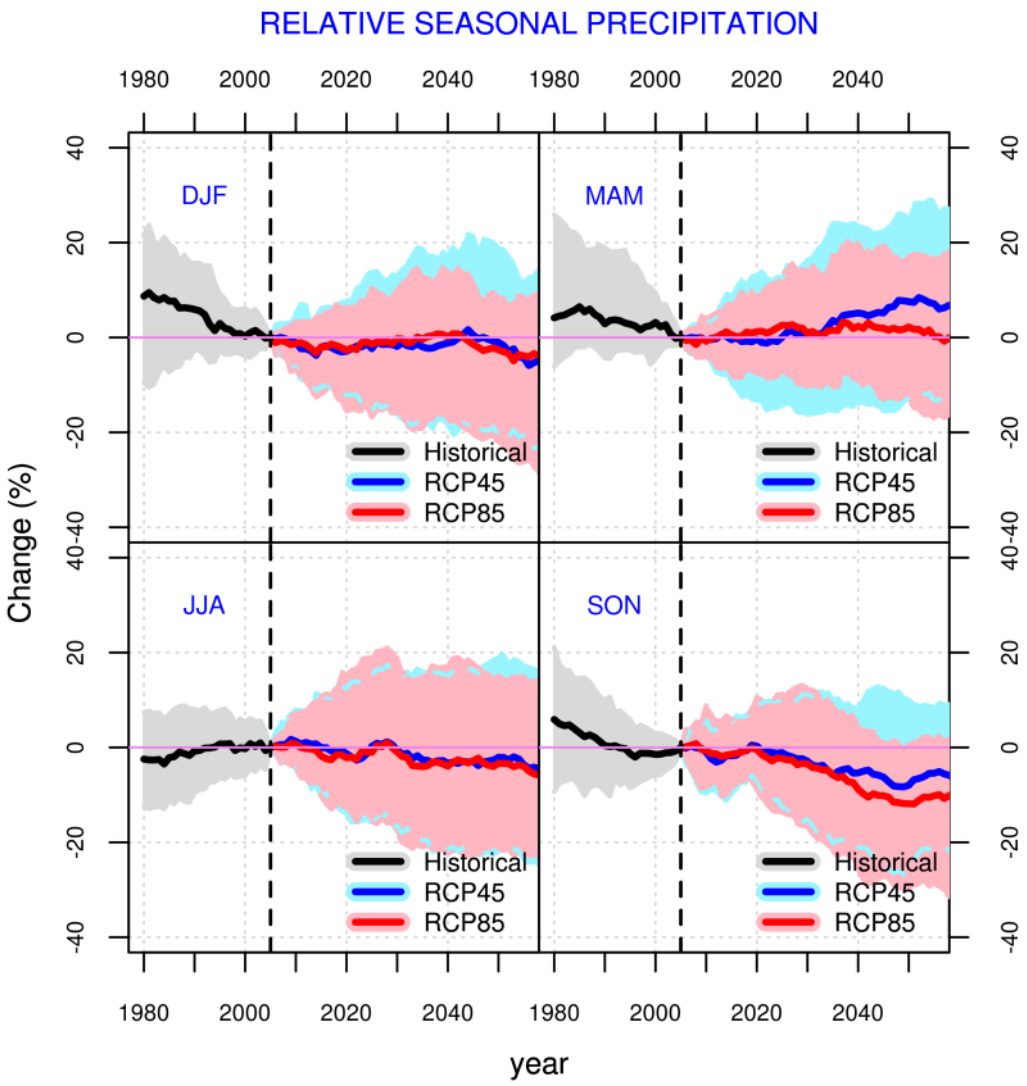

Figura 17: Incrementos estacionales relativos esperados de la Precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90

Escenarios climáticos futuros de Viento

El viento es una variable de compleja simulación y con un marcado carácter caótico. Como se observa en la siguiente figura, no se esperan cambios muy significativos en esta variable respecto al período de control (1976-2005). Se observa en verano un leve reforzamiento del viento, mientras que en invierno se estima que se debilite muy ligeramente, siendo ambos incrementos inferiores a 0.2m/s en cualquier caso. En los meses de primavera y otoño no se observan tendencias concretas (figura 18).

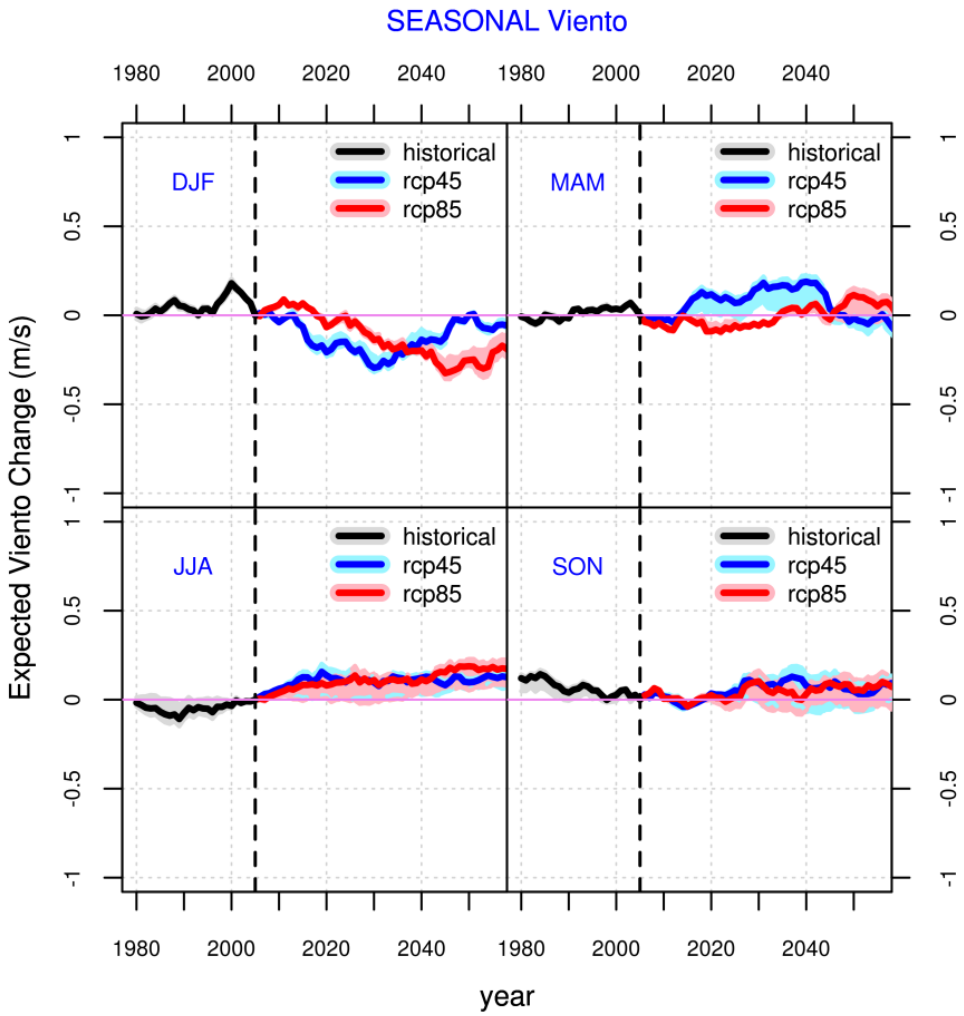

Figura 18: Incrementos estacionales relativos esperados de viento para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90

Escenarios climáticos futuros de Humedad relativa

Las proyecciones de humedad relativa muestran como la tendencia general es una disminución continua hasta el año 2050 en todas las estaciones del año. La tendencia más abrupta se espera para los meses de verano, con descensos de la humedad media de hasta un 10%. En el resto del año, la disminución de la humedad relativa sería de entre un 3% y un 6% (figura 19).

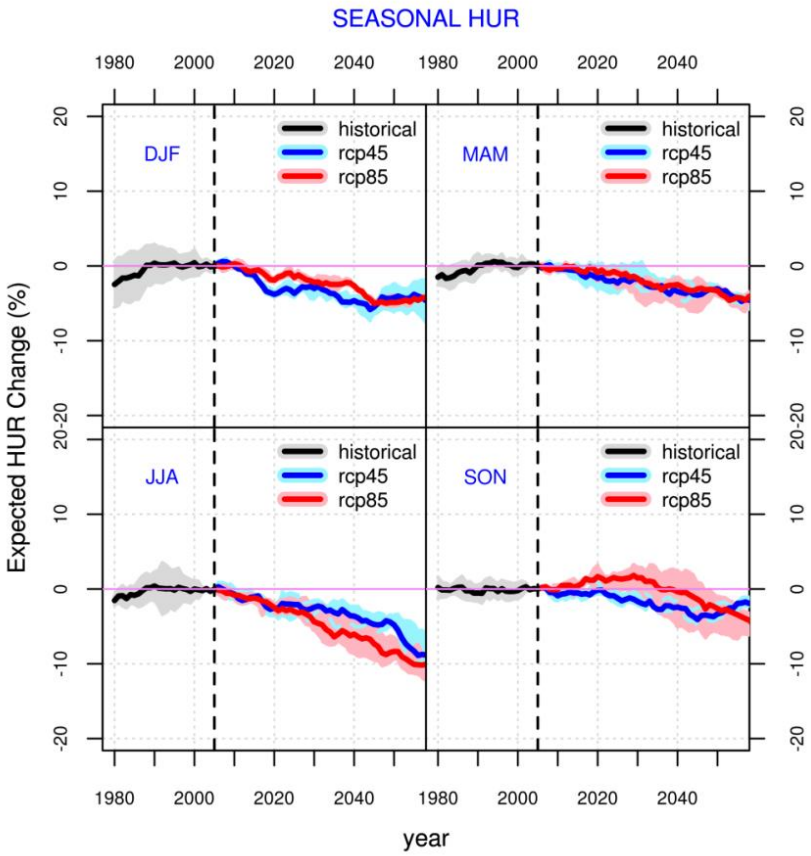

Figura 19: Incrementos estacionales relativos esperados de la humedad relativa para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90

A continuación, se resumen los cambios esperados en función de la variable considerada.

Tabla 9. Resumen de los resultados obtenidos como valor promedio de todos los modelos climáticos y todos los observatorios utilizados en el estudio representando la variación de cada variable en el periodo 2020-2050 con respecto al periodo de control 1976-2050. En azul valores correspondientes al RCP4.5 y en negro los correspondientes al RCP8.5.

	DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
Tmax	+1.6/+2.0	+1.5/+1.9	+2.4/+2.9	+1.8/+2.3	+1.7/+2.2
Tmin	+1.5/+1.9	+1.2/+1.8	+2.0/+2.5	+1.6/+2.1	+1.6/+2.0
Precipitación (mm/día)	-0.05/-0.10	0.0/+0.1	0.00	-0.10/-0.15	-0.05/-0.10
Precipitación (%)	-4.0/-6.0	0.0/+8.0	-4.0/-5.0	-5.0/-10.0	-3.0/-6.0
Viento (m/s)	-0.05/-0.20	-0.05/+0.05	+0.15/+0.20	+0.10	0.00
Humedad (%)	-4.0	-4.0	-8.0/-10.0	-2.0/-4.0	-4.0/-6.0

3.4. Proyecciones de impactos climáticos identificados

Escenarios climáticos futuros del Índice FWI

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en el cálculo del índice FWI, el cual representa la intensidad de propagación del fuego y la energía liberada por unidad de longitud del frente de fuego, en la zona de estudio de acuerdo con la metodología explicada con anterioridad. Éste índice es un valor derivado de la composición de otros 5 subíndices relativos a la humedad de combustible y el comportamiento del fuego. Los resultados obtenidos en el cálculo de estas 5 componentes, imprescindibles para obtener el FWI, se adjuntan en el Anexo 1.

Se aprecia cómo los valores más altos del índice FWI, en el contexto histórico, se concentran de manera mayoritaria en la zona costera, con especial énfasis en la Región de Murcia y provincia de Alicante, al igual que zonas del interior de la provincia de Valencia.

La evolución prevista del índice durante el periodo 2021-2050, en cuanto al RCP 4.5, es de un avance de los valores más altos desde el sureste hacia el interior de las cuencas hidrográficas (cursos altos). Los valores superiores a 12, donde se empieza a considerar riesgo apreciable de incendio, se extienden hasta ocupar buena parte de Albacete, Castellón y la totalidad de Valencia. En el caso del Riesgo Medio (FWI>15), no se observa una evolución notable; caso aparte es el valor de Riesgo Severo, que pasaría de estar relegado de una fracción de la costa murciana a abarcar la práctica totalidad del sur de Murcia y Alicante. Los cambios en el RCP 8.5 son prácticamente idénticos al RCP 4.5, con un ligero incremento de los valores del FWI (figura 20).

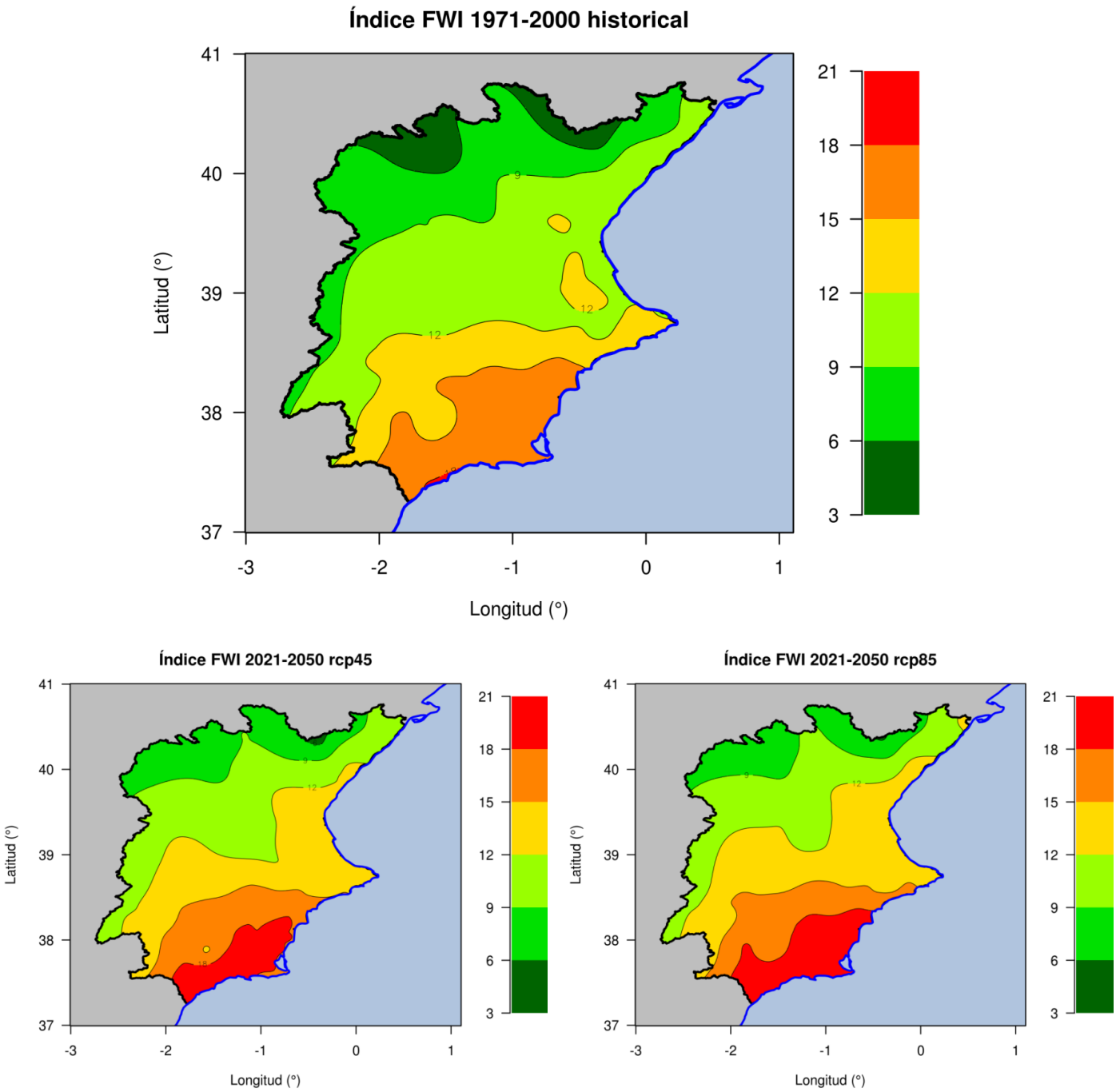

Figura 20. Representación de la distribución de valores del índice FWI para el periodo histórico 1971-2000 (superior), el periodo 2021-2050 para el RCP 4.5 (inf. Izq.) y el RCP 8.5 (inf. der.), en la zona de estudio.

En el caso del FWI, debido a sus futuros cambios proyectados, se han calculado también las plumas de cambio del índice FWI hasta el año 2050 tanto a escala anual como para cada una de las cuatro estaciones. Las plumas representan los cambios esperados para el total de la región de estudio y están calculadas con todas las estaciones consideradas.

A escala anual, la tendencia esperada del índice FWI es de un incremento constante con los años, en función del RCP considerado, hasta un aumento de +2 según el RCP 4.5 y de algo más de 2.5 según el RCP 8.5. La incertidumbre asociada a cada uno de los RCP evoluciona de manera similar, aumentando la amplitud de la pluma hasta ±1.5 aproximadamente para el final del periodo.

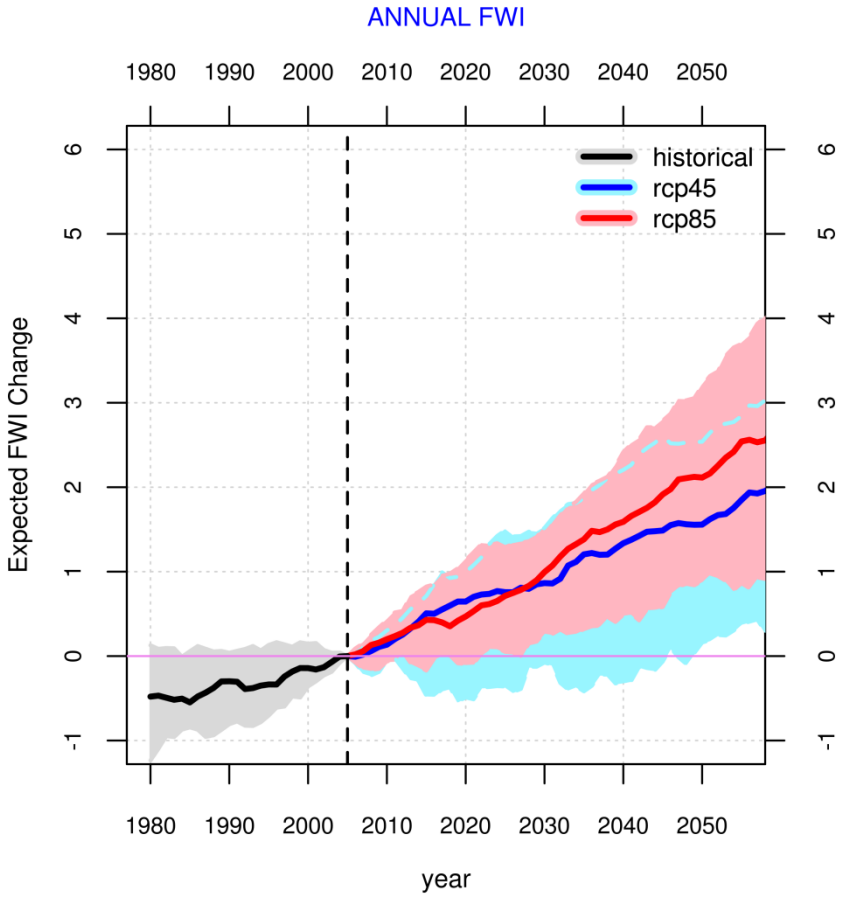

Figura 21. Incrementos anuales relativos esperados del Índice FWI para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

En cuanto a la evolución separada por estaciones climáticas, el cambio se proyecta ser muy similar en los periodos de invierno, primavera y otoño. En ellos el RCP 4.5 aumenta de manera algo más irregular, aunque la tendencia es creciente en los tres casos, con aumentos hacia el final del periodo de +1.5 aproximadamente con una incertidumbre asociada de ±1.5 en invierno y otoño;

en primavera la incertidumbre resulta mucho mayor, con incrementos negativos posibles en algunas partes del futuro. Para el RCP 8.5 el incremento es más constante, de hasta +2, con una incertidumbre igual que en el RCP 4.5.

En el caso del verano, la evolución del FWI es mucho más extrema, con incrementos de +3 para el RCP 4.5 y de más de +4 para el RCP 8.5. Esto es algo a tener muy en cuenta ya que se trata de la época del año más susceptible de ver la aparición de incendios graves.

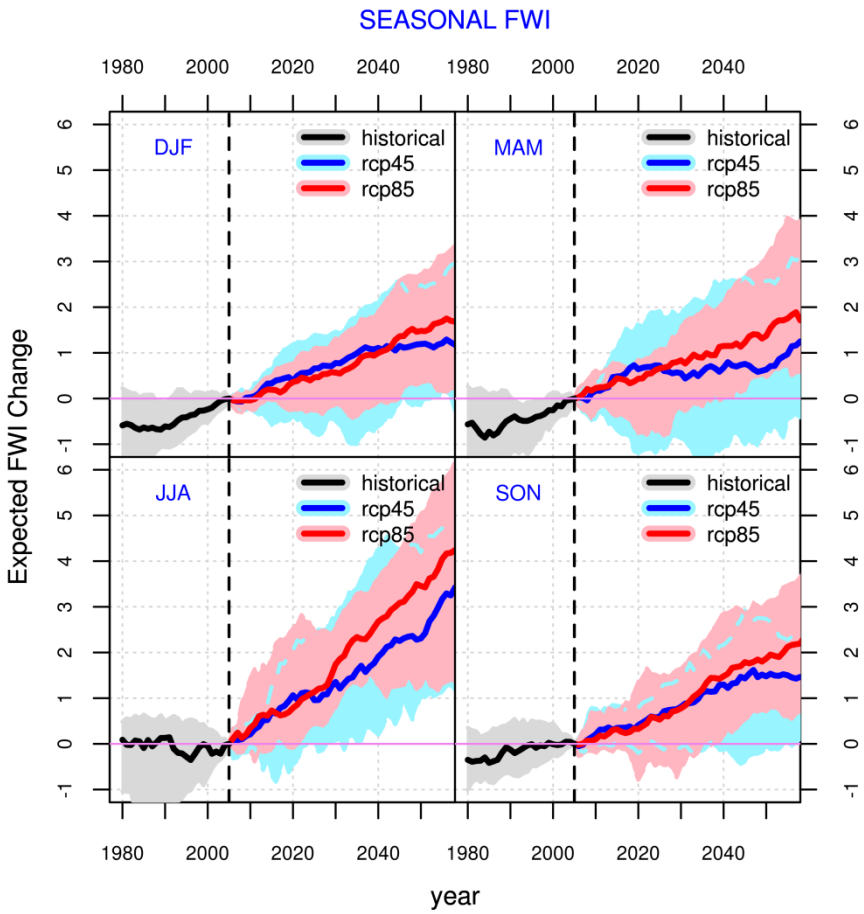

Figura 22. Incrementos estacionales relativos esperados del Índice FWI para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

Escenarios climáticos futuros del Índice n

Se muestran en este apartado los resultados obtenidos en lo referente al Índice "n" (n-*Index*) y su evolución proyectada de acuerdo con la metodología utilizada para el periodo de tiempo considerado en el estudio. Como se ha especificado con anterioridad, el n-*Index* (Monjo, 2016) es un índice que denota el carácter

de la precipitación en una zona a través del estudio de la distribución temporal de sus intensidades dentro de cada evento de precipitación. Valores superiores a 0.5 se corresponden con un carácter de la precipitación más convectivo. Se ha considerado como valor de riesgo para la erosión n≥0.7.

La distribución en el contexto histórico de las zonas que superan dicho umbral se limita a todo el litoral de ambas cuencas hidrográficas al igual que buena parte de la Región de Murcia, con los valores disminuyendo hasta 0.5 a medida que nos desplazamos al interior. Los valores más altos (n≥0.75) se concentran en el litoral de Murcia y Alicante al igual que en pequeñas zonas de litoral de Castellón, lo que muestra que en estas zonas las precipitaciones suelen ser esporádicas, de corta duración y alta intensidad.

El cambio proyectado del índice en el periodo 2021-2050 es de prácticamente nulo. Se aprecia una pequeña expansión del área de n=0.65 hacia el interior al igual que del área más extrema, n=0.8, en las costas del Campo de Cartagena; sin embargo, en el contexto de la región de estudio no se puede concluir que el índice “n” vaya a sufrir un cambio significativo en las próximas décadas (figura23).

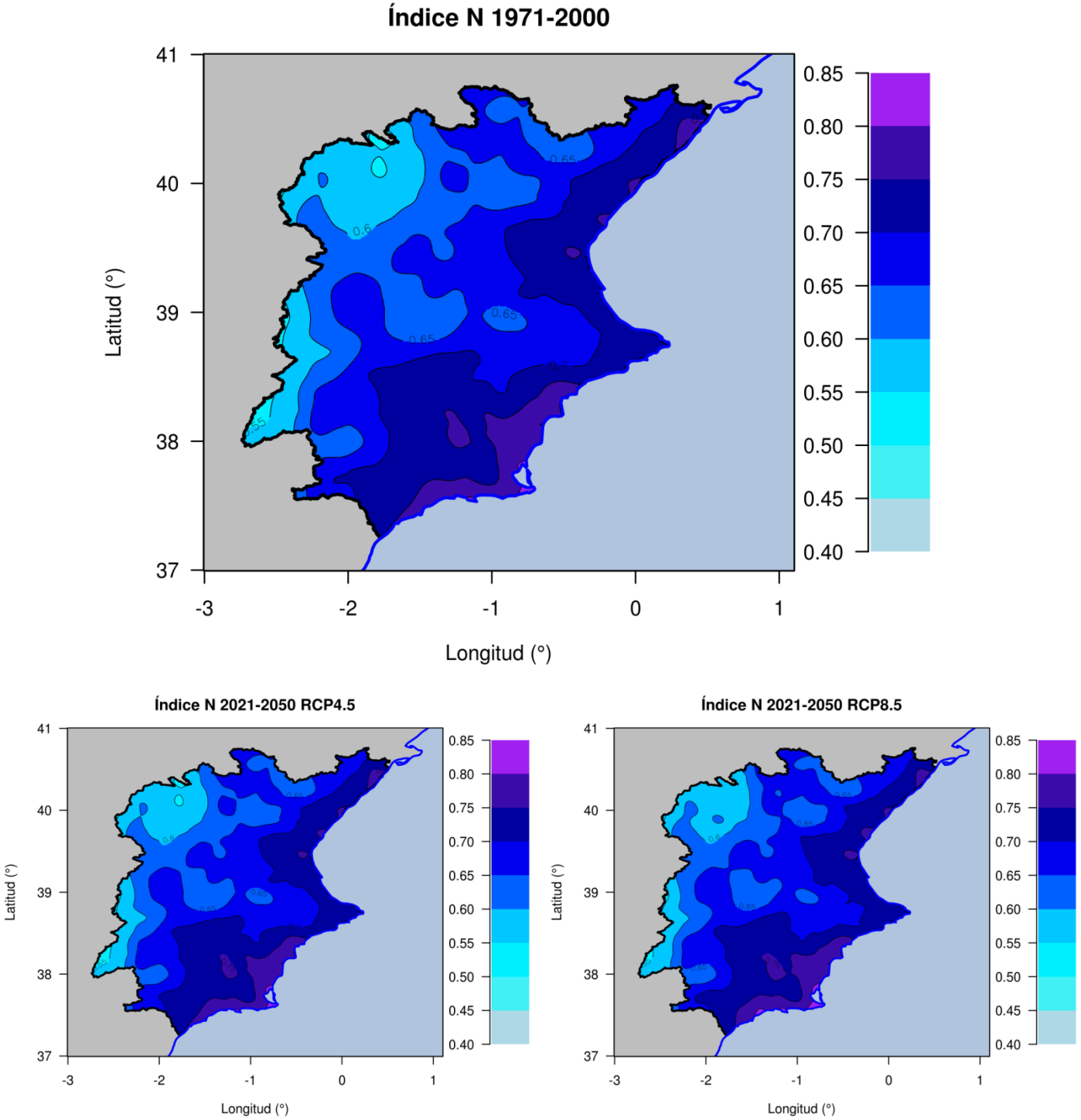

Figura 23.Representación de la distribución de valores del n-Index para el periodo histórico 1971-2000 (superior), el periodo 2021-2050 para el RCP 4.5 (inf. Izq.) y el RCP 8.5 (inf. der.), en la zona de estudio.

Escenarios climáticos futuros del Índice CI

Se comentan a continuación los resultados que se han obtenido referentes al índice CI y su evolución proyectada para las próximas décadas en la región de estudio. El índice CI (Martín-Vide, 2004) es un índice que caracteriza la precipitación de una zona en cuanto a su concentración anual relativa al número de días de lluvia y su aportación al acumulado anual. Se infiere a través de él así si en una determinada región se esperan pocos días de lluvia con altas cantidades (valores próximos a 1), es decir mayor escorrentía y erosión, o al contrario. Determinamos CI≥0.65 como umbral de riesgo para una erosión elevada.

Se puede apreciar en el mapa histórico cómo la distribución de los valores de CI es muy semejante a la del n-Index. Los valores más elevados se hallan distribuidos a lo largo de la costa de la región de estudio, extendiéndose algo más por el interior de la provincia de Valencia y de la Región de Murcia; es aquí donde se dan los valores más altos (CI≥0.75) en la costa sur del Campo de Cartagena.

Los cambios para el periodo 2021-2050 no son significativos, ya que no se aprecia ninguna variación general o con algún patrón específico en las áreas del CI para ninguno de los RCP. No se espera por tanto un cambio en la naturaleza de la concentración de la lluvia en la zona de estudio en las próximas décadas (figura 24).

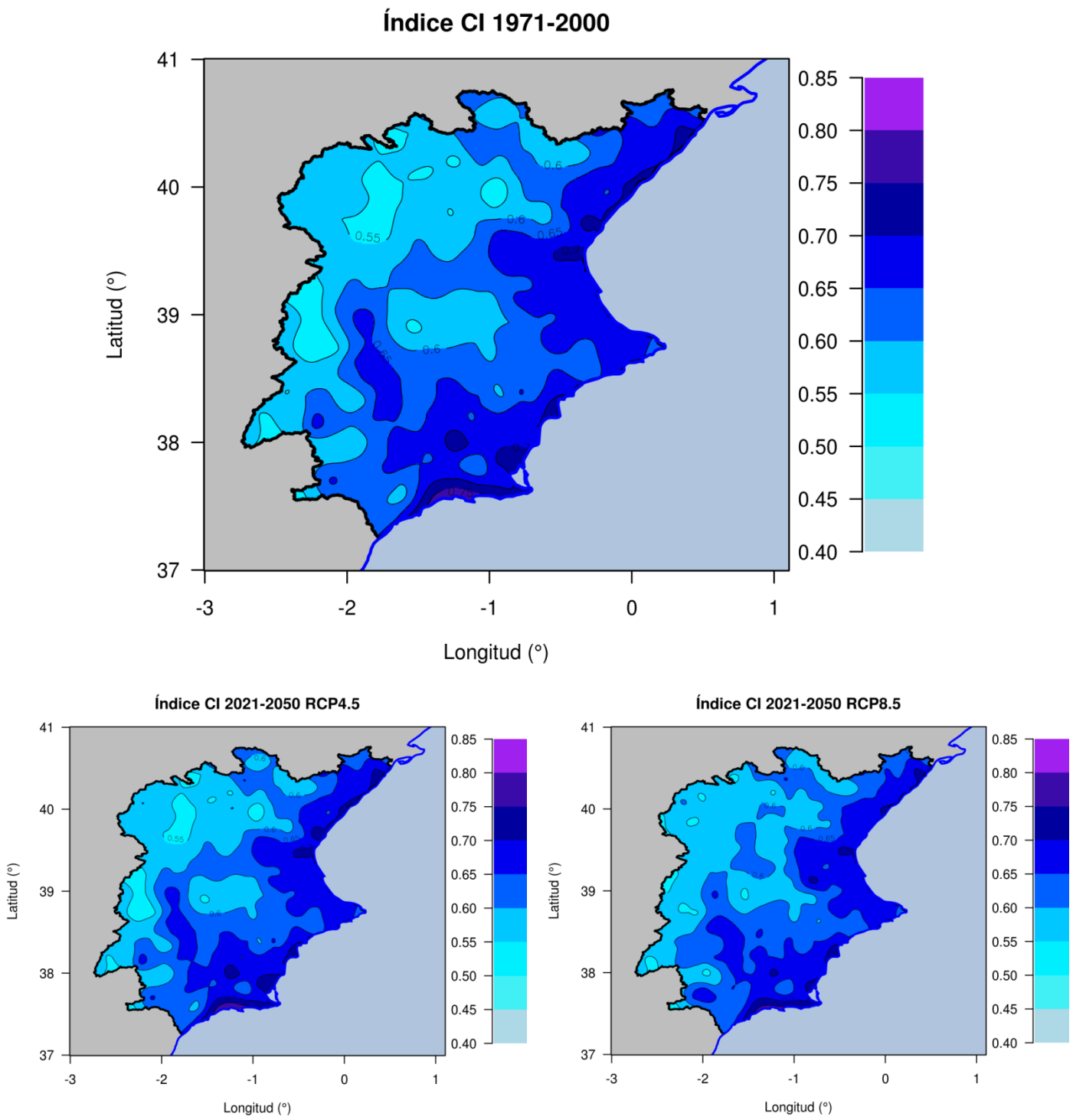

Figura 24.Representación de la distribución de valores del índice CI para el periodo histórico 1971-2000 (superior), el periodo 2021-2050 para el RCP 4.5 (inf. Izq.) y el RCP 8.5 (inf. der.), en la zona de estudio.

Escenarios climáticos futuros del Área de Erosión

En este apartado se comentará los resultados más relevantes del estudio, aquellos relativos a la variación del IRE, el índice nombrado con el fin de caracterizar mejor aquellas áreas con especial riesgo de erosión y su futura evolución acorde a las proyecciones climáticas realizadas por FICLIMA. La caracterización del IRE fue definido en el apartado 2.5. Teniendo en cuenta los distintos usos de suelo catalogados en la región de estudio, y aquellos considerados susceptibles de riesgo de erosión, se han contabilizado las hectáreas totales que comprenden cada uno de los tipos de suelo dentro de las áreas en las que IRE≥1 (Tabla 8), tanto para el periodo histórico como para el futuro.

Tabla 10. Contabilización del área total (Ha) que abarca cada una de las tres extensiones posibles del IRE especificado para cada tipo de suelo considerado y horizonte temporal**.**

Tipo	Índice de Riesgo de Erosión (IRE)	Superficie afectada (Ha) histórico	Superficie afectada (Ha) RCP 4.5	Superficie afectada (Ha) RCP 8.5
Arbolado	1	205219	261786	290289
	2	60373	147041	171796
	3	0	25159	40796
Matorral	1	144207	312335	378990
	2	70128	76624	93712
	3	177	45546	59218
Pastizal	1	185153	212061	215640
	2	143912	178186	164414
	3	3563	68985	115204
Vegetación rala	1	11994	19786	18688
	2	6267	5182	4899
	3	68	3199	5248

Cada valor observado en la tabla está calculado a partir del recuento del área total ocupada por cada uso de suelo dentro de cada contorno de IRE. Éstos están representados de forma gráfica en la figura24.

La distribución del IRE tanto histórico como futuro está fuertemente condicionada por el FWI, ya que como vimos el *n-Index* y el CI apenas sufren variaciones en las proyecciones de los próximos años. La evolución del IRE es por lo tanto muy similar a la del FWI, con una extensión y avance de los valores desde la costa y el SE hacia el interior de la región, aumentando especialmente la zona de Riesgo Severo, pasando a ocupar todo el sur y centro de la Región de Murcia y parte de Alicante.

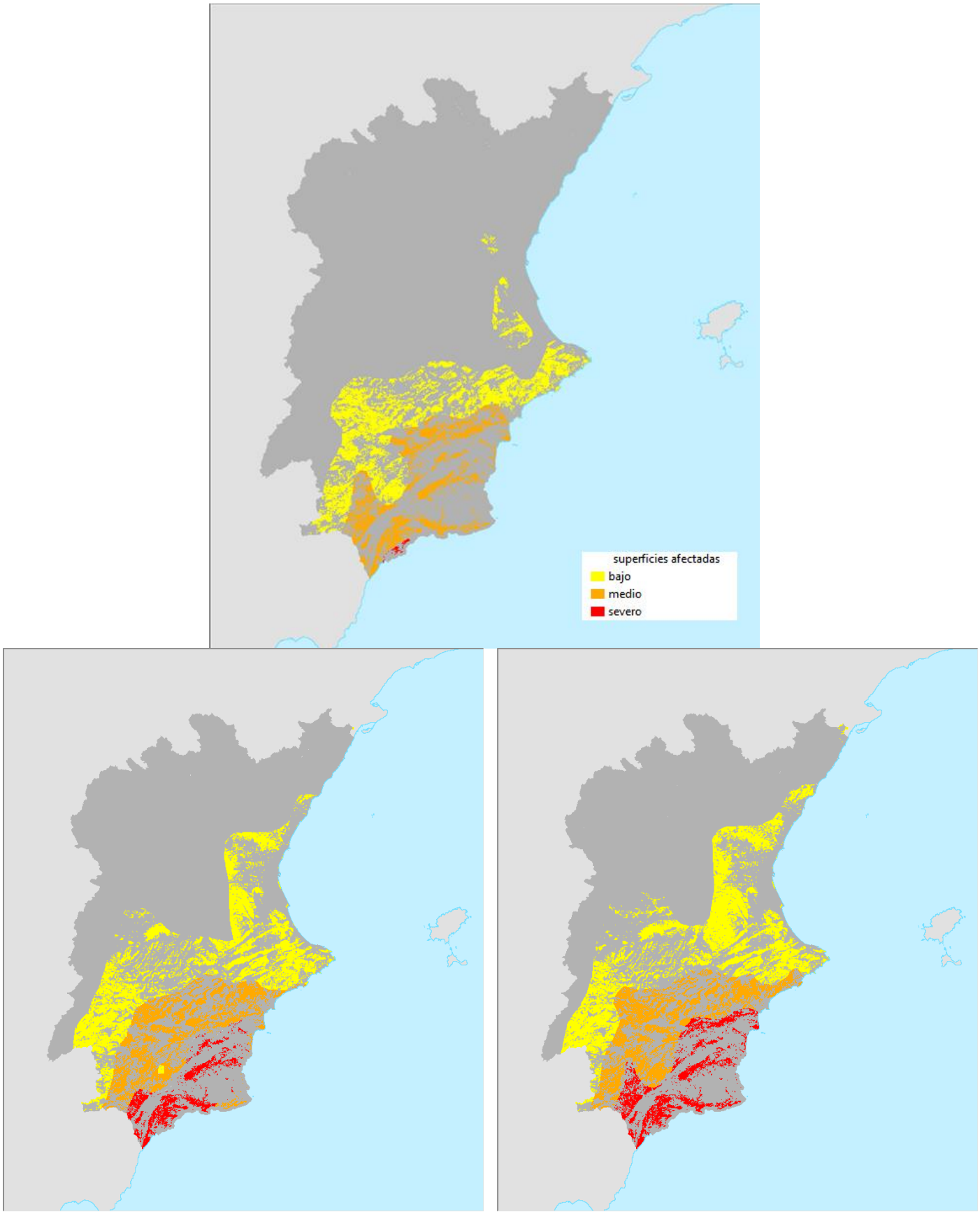

Figura 25. Representación de la distribución del IRE en el periodo histórico en la zona de estudio. Los colores se encuentran distribuidos en función de las zonas que cumplen los criterios de numeración del IRE y cuyo Uso de Suelo entra dentro de los tipos considerados válidos. Los niveles “bajo-medio-severo” se asocian con los niveles “1-2-3” correspondientemente.

Los datos mostrados en la Tabla 10 han sido tratados de diferentes formas con el fin de mostrar de una manera más explícita la evolución de las áreas afectadas por los cambios futuros en el IRE. En lo referente a la evolución de cada uno de los tipos de suelo considerados como "de riesgo" por el efecto de la erosión en ellos, vemos que la extensión de las áreas susceptibles de riesgo bajo la extensión del IRE es de alrededor de +50% para el RCP 4.5, y de unos +65% para el RCP 8.5, con la excepción de "matorral", que siendo la zona más extensa, es también la que más aumentaría: un 100% y un 150% en el 4.5 y 8.5 correspondientemente (Tabla 11).

Tabla 11. Contabilización del área total (Ha) que abarca cada tipo de suelo considerado en cada horizonte temporal y su cambio correspondiente**.**

Tipo	Histórico	RCP 4.5	RCP 8.5
Arbolado			
Sup. Total (Ha)	265590	433986	502880
Variación (%)		+60	+90
Matorral			
Sup. Total (Ha)	214512	434504,1	531919
Variación (%)		+100	+150
Pastizal			
Sup. Total (Ha)	332627	459231	495257
Variación (%)		+40	+50
Vegetación rala			
Sup. Total (Ha)	18329	28167	28834
Variación (%)		+50	+60

En cuanto al cambio de área de cada uno de los contornos del IRE, más específicamente, la evolución de las zonas bajo los valores 1 y 2 es muy similar, alrededor de +50% y +60% para el RCP 4.5 y el RCP 8.5 correspondientemente en ambos casos. El cambio más significativo es para IRE = 3, que pasaría de ocupar una zona mínima en el sur de Murcia a extenderse más de un 3500% en el RCP 4.5 y más de un 5500% en el RCP 8.5, aumentando así de manera muy notable la zona donde el riesgo de erosión pasaría a ser muy elevado (Tabla 12).

Tabla 12. Contabilización del área total (Ha) que abarca cada contorno del IRE y su cambio para cada horizonte temporal considerado.

IRE	Histórico	RCP 4.5	RCP 8.5
Riesgo bajo - 1			
Sup. Total (Ha)	5465712	805968	903607
Variación (%)		+50	+65
Riesgo medio - 2			
Sup. Total (Ha)	280680	407034	434821
Variación (%)		+45	+55
Riesgo severo - 3			
Sup. Total (Ha)	3808	142888	220465
Variación (%)		+3650	+5700

4. Conclusiones

Con el fin de estudiar la futura evolución de la erosión de los suelos en las Cuencas Hidrográficas del Júcar y del Segura, el proyecto ACDUHA ha estudiado la evolución futura de diferentes índices y variables que determinan dicha erosión. Para ello se ha creado un índice específico que determina el riesgo de erosión del suelo, el IRE. Dicho índice se formula a partir de los índices FWI, n y CI.

Para poder estudiar cada índice, se han tomado datos meteorológicos de la zona y proyectado sus valores con modelos climáticos. Los resultados muestran que la temperatura sufrirá un incremento notable en sus valores para el año 2050, de hasta 2ºC que podría llegar a 4ºC en verano. El viento no es esperable que sufra cambios en su velocidad media, mientras que la humedad y la precipitación verán disminuidas ligeramente sus valores medios en escala anual para el año 2050.

Acorde con la futura evolución de las variables meteorológicas, el índice FWI proyectado hasta el año 2050 bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5 se incrementa de manera muy notable en las zonas costeras de la región, especialmente en la Región de Murcia y Alicante, viendo también extendido su área de riesgo hacia el interior de las cuencas. Por el contrario, los índices n y CI no sufrirán cambios significativos durante el periodo de estudio debido a la gran incertidumbre obtenida en los resultados. Como resultante de esto, los valores finales proyectados del IRE están muy ligados a los resultados del FWI. Por ello, el área susceptible de sufrir de erosión intensa en el futuro se incrementará notablemente a la casi totalidad de la Comunidad Valenciana, Región de Murcia y partes de Castilla la Mancha. Especial mención para el área de Riesgo Severo, inexistente prácticamente en la actualidad y que pasaría a abarcar casi toda la Región de Murcia y Alicante, por lo que se debería considerar esta zona para futuros planes de prevención.

5. Referencias

Bentsen M, Bethke I, Debernard JB, Iversen T, Kirkevåg A, Seland Ø, Drange H, Roelandt C, Seierstad IA, Hoose C, Kristjánsson, JE. 2012. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation. Geoscientific Model Development Discussion 5: 2843-2931. doi:10.5194/gmdd-5-2843-2012.

Carcaillet C. , H. Almquist, H. Asnong, R.H.W. Bradshaw, J.S. Carrion, M.-J. Gaillard, K. Gajewski, J.N. Haas, S.G. Haberle, P. Hadorn, S.D. Muuller, P.J.H. Richard, I. Richoz, M.Roosch, M.F. Sanchez Goñi, H. von Stedingk, A.C. Stevenson, B. Talon, C. Tardy, W. Tinner, E. Tryterud, L. Wick, K.J. Willis. Holocene biomass burning and global dynamics of the carbon cycle. Chemosphere 845-863. 2002. PII: S0045-6535(02)00385-5

Conesa García, C., Espín Sánchez, D., García Marín, R., Castejón Porcel, G., & Moreno Muñoz, D. (2014). Inversiones térmicas con advección cálida inferior en la Vega Media del Segura (Región de Murcia). Estudios Geográficos, 75(277), 521-552. doi:http://dx.doi.org/10.3989/estgeogr.201416

Clark J.S. (1998) Effect of climate change on fire regimes in Northwestern Minnesota. Nature 334:233-235.

Chylek P, Li J, Dubey MK, Wang M, Lesins G. 2001. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. AtmosChemPhys Discuss 11: 22893-22907, doi:10.5194/acpd-11-22893-2011.

Collins M, Tett SFB, Cooper C. 2001. The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. Climate Dynamics17: 61–81. doi:10.1007/s003820000094.

Confederación Hidrográfica del Júcar. Web:www.chj.es

Confederación Hidrográfica del Segura. Web:www.chsegura.es

CORINE Land Cover. Web:https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover

Dunne, J.P., John, J.G., Adcroft, A.J., Griffies, S.M., Hallberg, R.W., Shevliakova, E., et al., 2012. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon Earth System Models. Part I: physical formulation and baseline simulation characteristics. J. Clim. 25, 6646–6665.

J. A. Patz, D. Campbell-Lendrum, T. Holloway & J. A. Foley, Impact of regional climate change on human health, Nature, 2005.

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

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K. et al. Climatic Change (2011) 109: 213. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z

Monjo R. 2016. Measure of rainfall time structure using the dimensionless n-index. Climate Research, 67: 71-86. doi: 10.3354/cr01359.

Moncho R, Belda F, Caselles V (2009) Climatic study of the exponent 'n' in IDF curves: application for the Iberian Peninsula. Tethys 6: 3−14

Moreno .J.M (2005) Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente.

Marsland SJ, Haak H, Jungclaus JH, Latif M, Roeske F. 2003. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. Ocean Modelling5: 91-127. doi: 10.1016/S1463-5003(02)00015-X.

Iversen T, Bentsen M, Bethke I, Debernard JB, Kirkevåg A, Seland Ø, Drange H, Kristjánsson JE, Medhaug I, Sand M, Seierstad IA (2012) The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 2: Climate response and scenario projections. Geosci Model Dev Discuss5: 2933-2998. doi:10.5194/gmdd-5-2933-2012.

Ribalaygua J, Torres L, Pórtoles J, Monjo R, Gaitán E, Pino MR. 2013. Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. Theoretical and Applied Climatology, 114: 253-269. doi:10.1007/s00704-013-0836-x.

Vázquez A. y Moreno J.M. (2001). Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (Central Spain). Forest Ecology and Management 147: 55-65.

Vélez R. (2000a) Perspectiva histórica de los incendios forestales en España. La defensa contra Incendios Forestales. McGraw Hill; Madrid, España, Pags.3.15-3.31

Voldoire A, Sanchez-Gomez E, Salas y Mélia D, Decharme B, Cassou C, Sénési S, Valcke S, Beau I, Alias A, Chevallier M, Déqué M, Deshayes J, Douville H, Fernandez E, Madec G, Maisonnave E, Moine M-P, Planton S, Saint-Martin D, Szopa S, Tyteca S, Alkama R, Belamari S, Braun A, Coquart L, and Chauvin F. 2013. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, Climate Dynamics40: 2091-2121, doi: 10.1007/s00382-011-1259-y.

Watanabe S, Hajima T, Sudo K, Nagashima T, Takemura T, Okajima H, Nozawa T, Kawase H, Abe M, Yokohata T, Ise T, Sato H, Kato E, Takata K, Emori S, and Kawamiya M. 2011: MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. Geoscientific Model Development4: 845-872. doi:10.5194/gmd-4-845-2011.

Watson L., Lacressonniere G., Gauss M., Engardt M., Andersson C., Josse B., Marecal V., (...), Vautard R. (2015) The impact of meteorological forcings on gas phase air pollutants over Europe Atmospheric Environment, 119 , pp. 240-257.https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.037

Xiao-Ge X, Tong-Wen W, Jie Z. 2013. Introduction of CMIP5 Experiments Carried out with the Climate System Models of Beijing Climate Center. Advances in Climate Change Research4: 41-49. doi: 10.3724/SP.J.1248.2013.041.

Yukimoto S, Yoshimura H, Hosaka M, Sakami T, Tsujino H, Hirabara M, Tanaka TY, Deushi M, Obata A, Nakano H, Adachi Y, Shindo E, Yabu S, Ose T and Kitoh A. 2011. Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) - Model Description. Technical Report of MRI, No. 64, 83 pp.

ANEXO 1

En el presente Anexo se recogen los valores medios esperados por las distintas componentes del índice de incendio para el periodo 2021-2050 (mapas) así como los incrementos esperados con respecto al periodo de control. La elaboración de las figuras queda explicada en el texto principal de la presente memoria.

Escenarios de clima futuro del índice FFMC

El código de humedad del suelo, nos informa sobre la cantidad de humedad del combustible fino en el suelo del bosque. Es un parámetro que depende de la humedad relativa, de la temperatura, de la precipitación y del viento. Valores inferiores a 1.5 se consideran valores bajos, mientras que valores por encima de 4.5 son valores extremos.

Extremo	Muy alto	Alto	Moderado	Bajo
>4.5	3.5 a 4.5	2.5 a 3.5	1.5 a 2.5	0 a 1.5

Leyenda 1. Escala de valores del FFMC

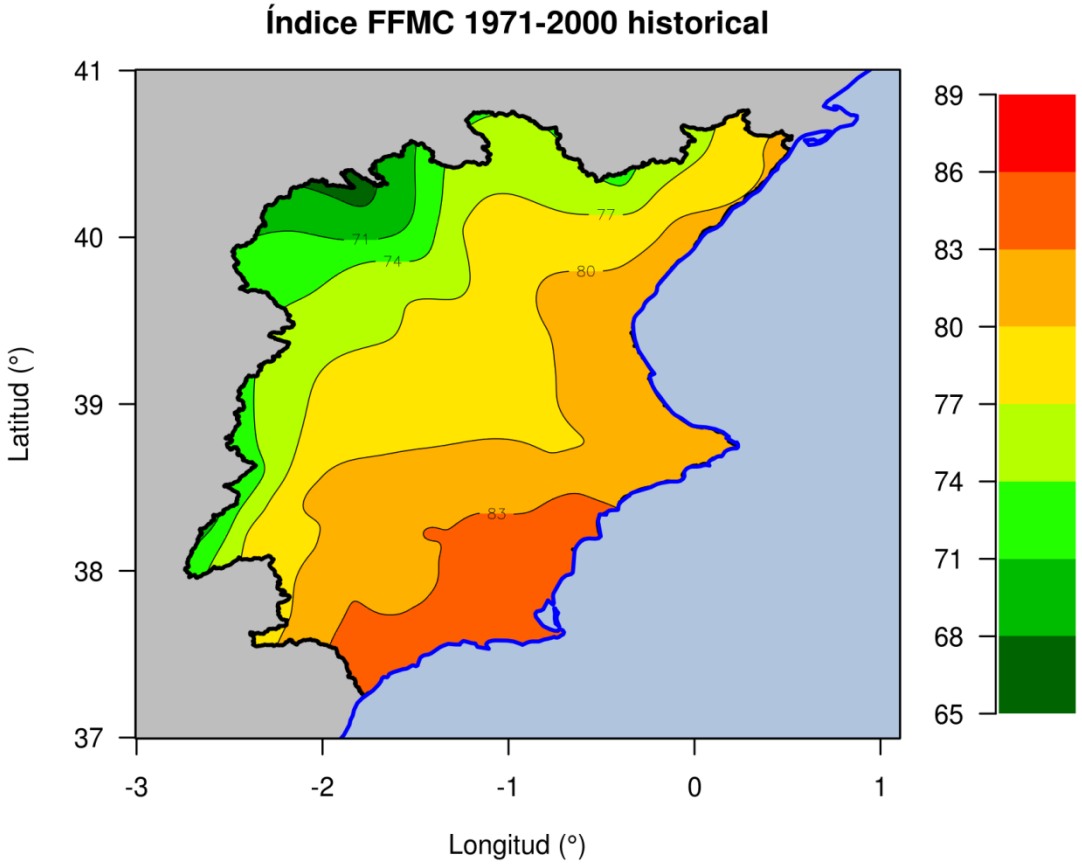

Figura A1. Representación espacial del índice FFMC para el periodo histórico 1971-2000.

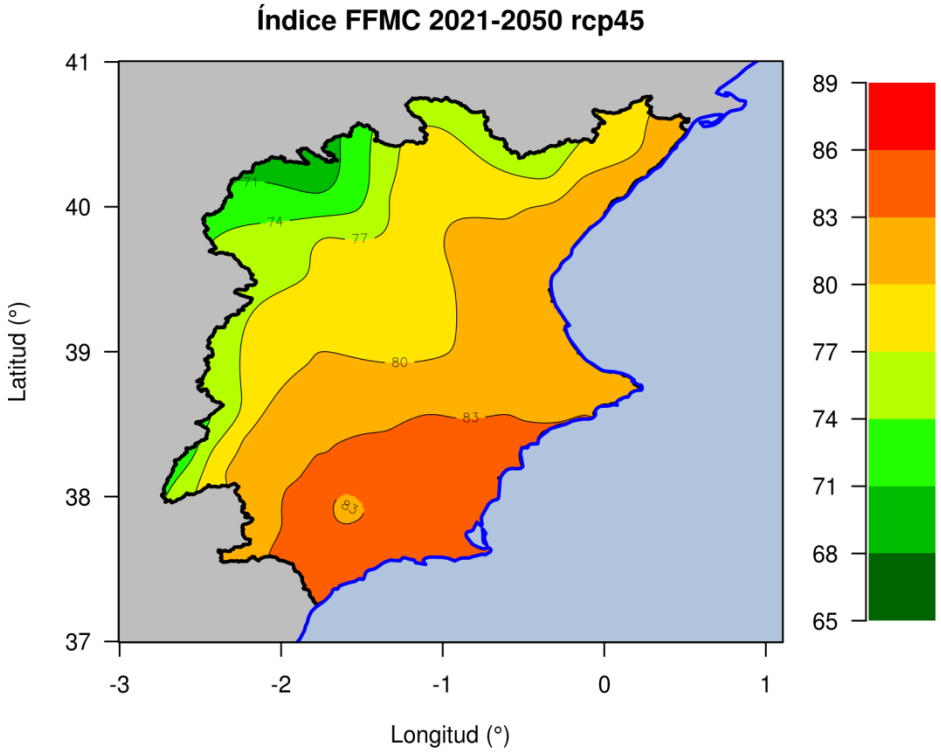

Figura A2. Representación espacial del índice FFMC para el periodo 2012-2050 para el RCP4.5.

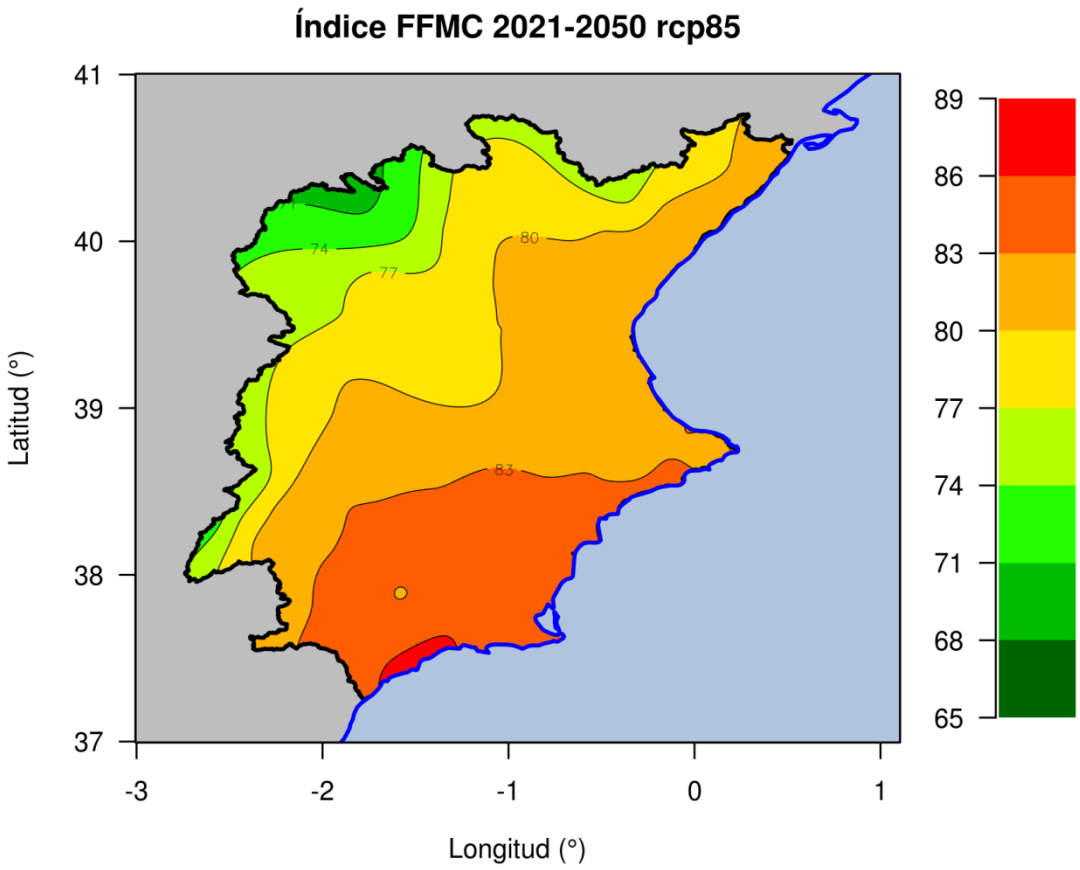

Figura A3. Representación espacial del índice FFMC para el periodo 2012-2050 para el RCP8.5.

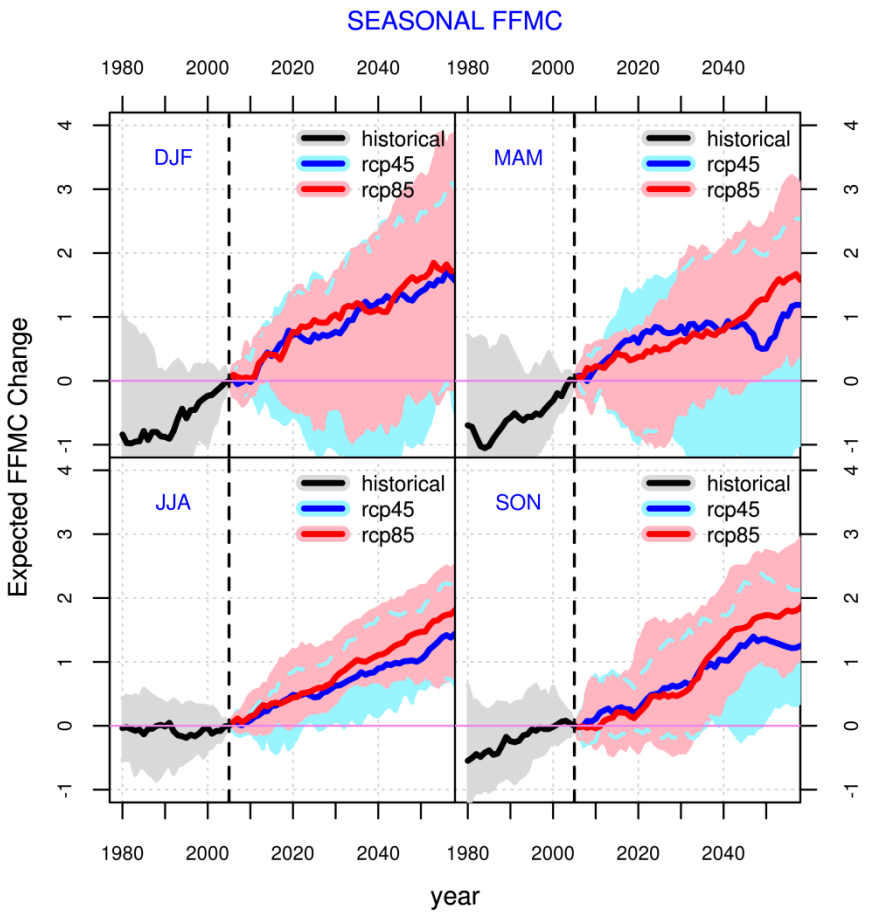

Figura A4. Incrementos estacionales esperados del índice FFMC para el siglo XXI.

Escenarios de clima futuro del índice humedad del humus (DMC)

El código de humedad del humus, cantidad de humedad en hojarasca seca y materia orgánica, se calcula a partir de los datos de precipitación, humedad relativa y temperatura. Valores por encima de 400 indican situaciones extremas, mientras que por debajo de 40 se consideran situaciones con humedades bajas.

Extremo	Muy alto	Alto	Medio Alto	Medio	Moderado	Moderado bajo	Bajo	Muy Bajo
>400	300 a 400	200 a 300	100 a 200	80 a 100	60 a 80	40 a 60	20 a 40	0 a 20

Leyenda 2. Escala de valores del DMC

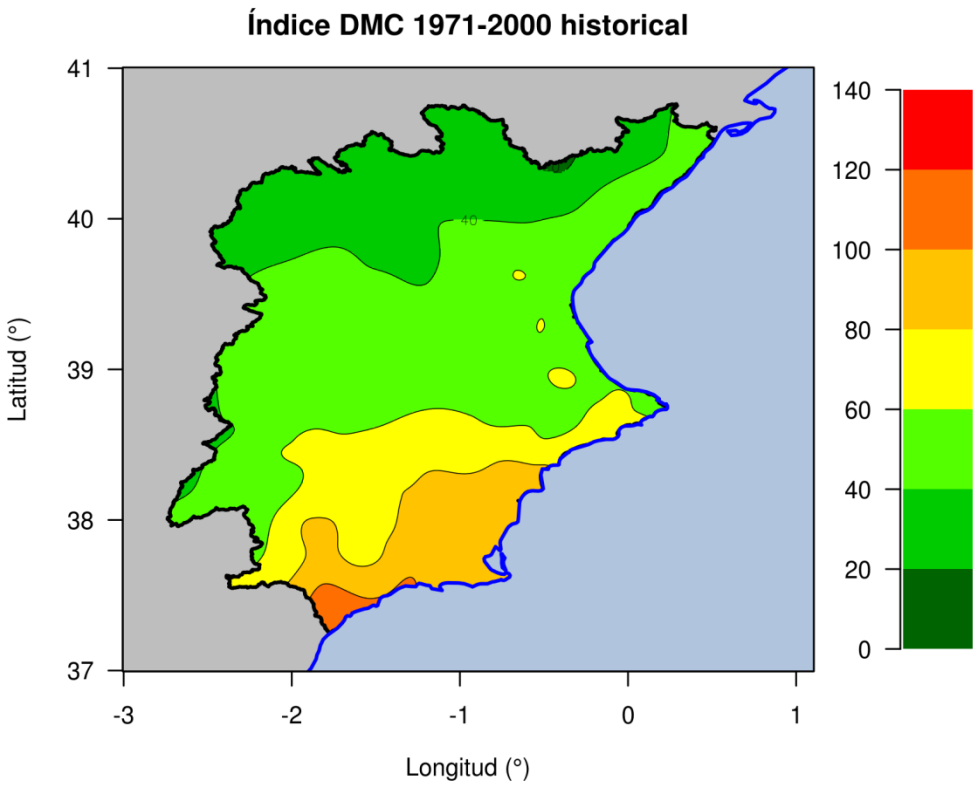

Figura A5.Representación espacial del índice DMC para el periodo histórico 1971-2000.

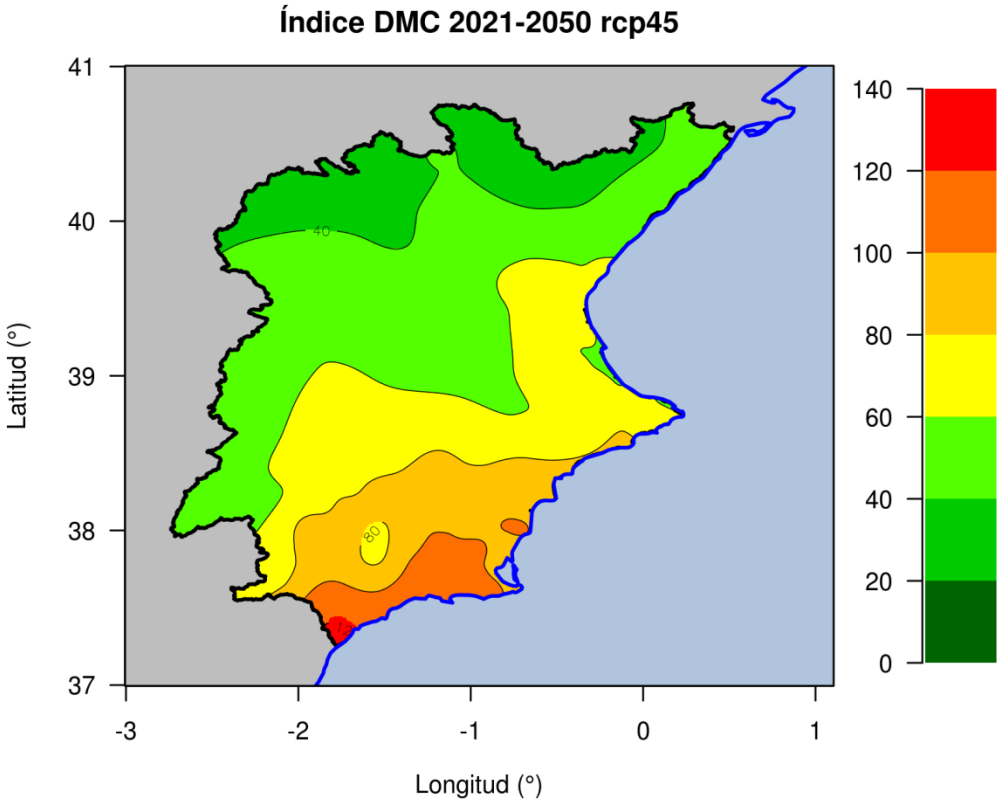

Figura A6. Representación espacial del índice DMC para el periodo 2012-2050 para el RCP4.5.

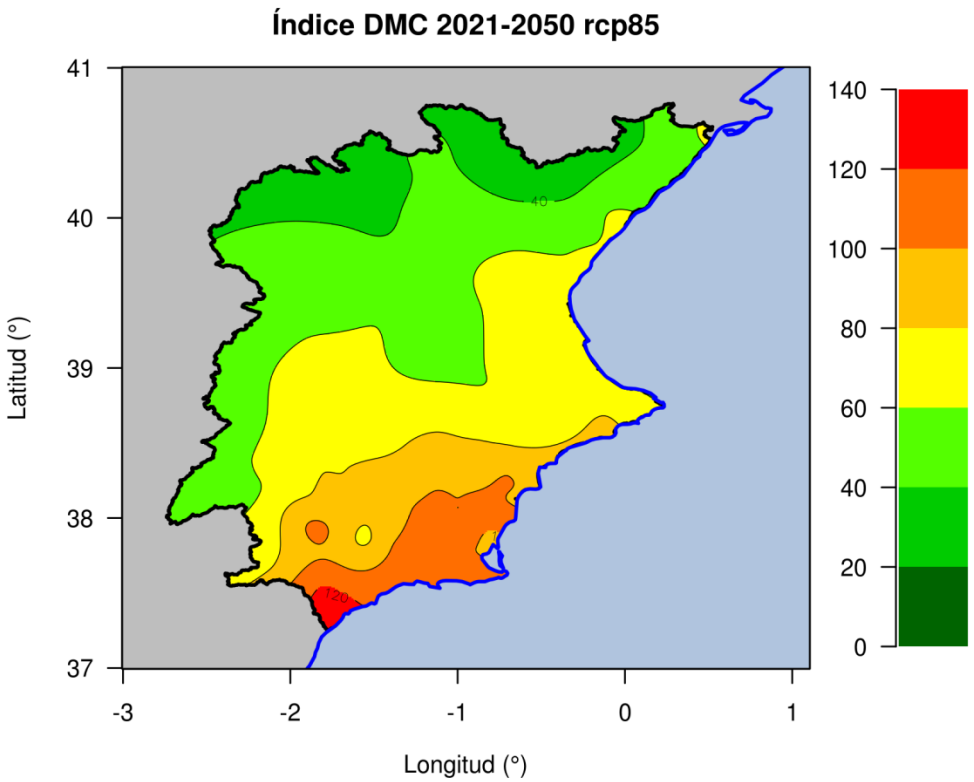

Figura A7. Representación espacial del índice DMC para el periodo 2012-2050 para el RCP8.5.

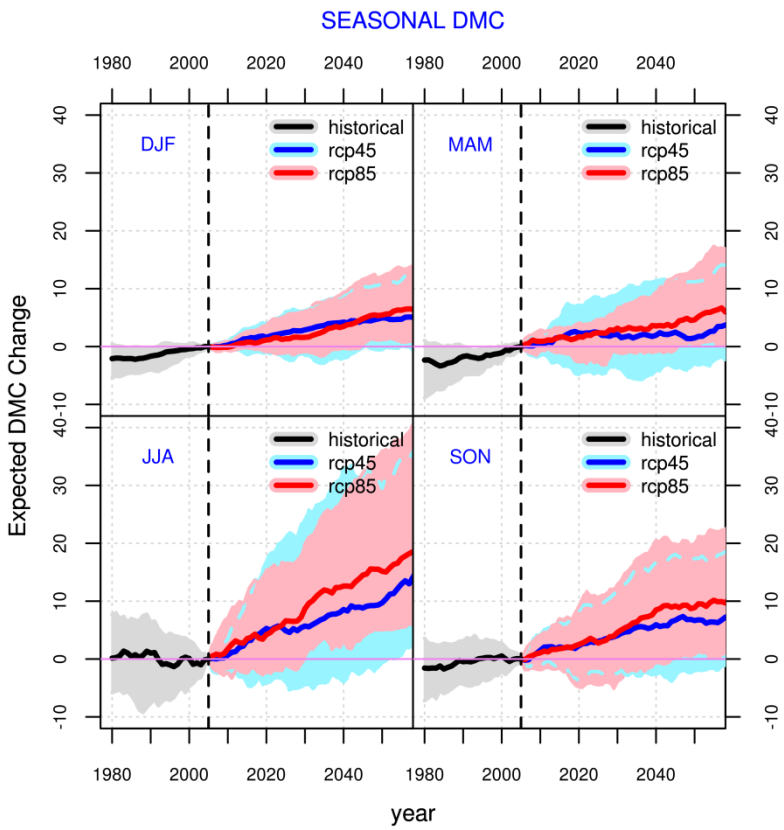

Figura A8. Incrementos estacionales esperados del índice DMC para el siglo XXI.

Escenarios de clima futuro del Código de sequía (DC)

El código de sequía DC informa del contenido de humedad del estrato profundo de material orgánico compactado y se calcula a partir de valores de temperatura y precipitación. Valores del DC superiores a 1000 suponen valores de código muy altos mientras que valores inferiores a 100 se consideran bajos.

Extremo	Muy alto	Alto	Medio Alto	Medio	Moderado	Moderado bajo	Bajo	Muy Bajo
>1250	1000 a 1250	800 a 1000	600 a 800	400 a 600	200 a 400	100 a 200	50 a 100	0 a 50

Leyenda 3. Escala de valores del DC

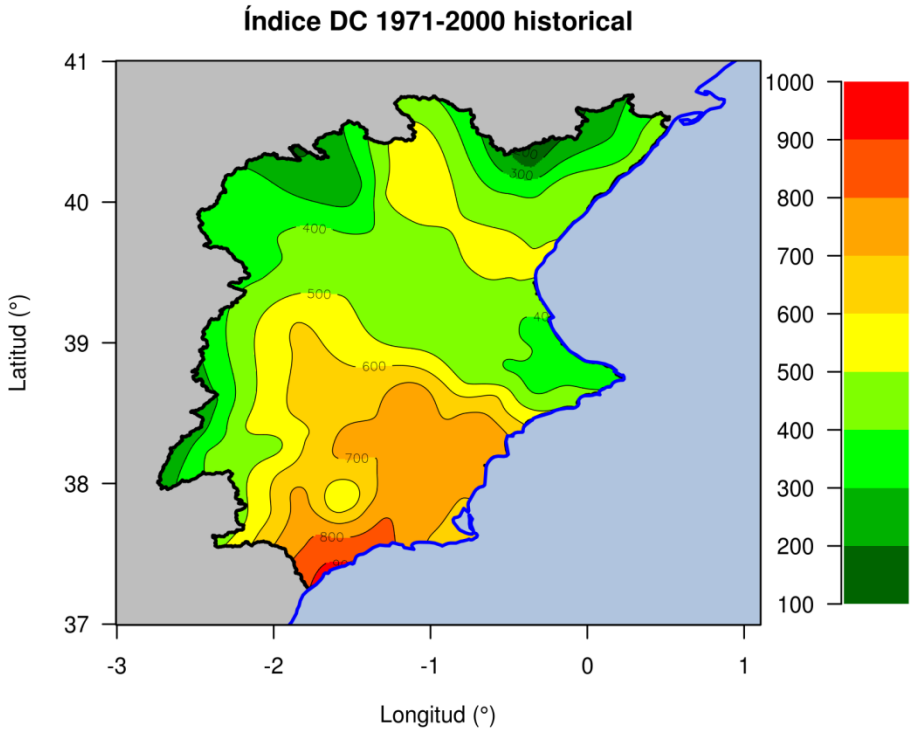

Figura A9. Representación espacial del índice DC para el periodo histórico 1971-2000.

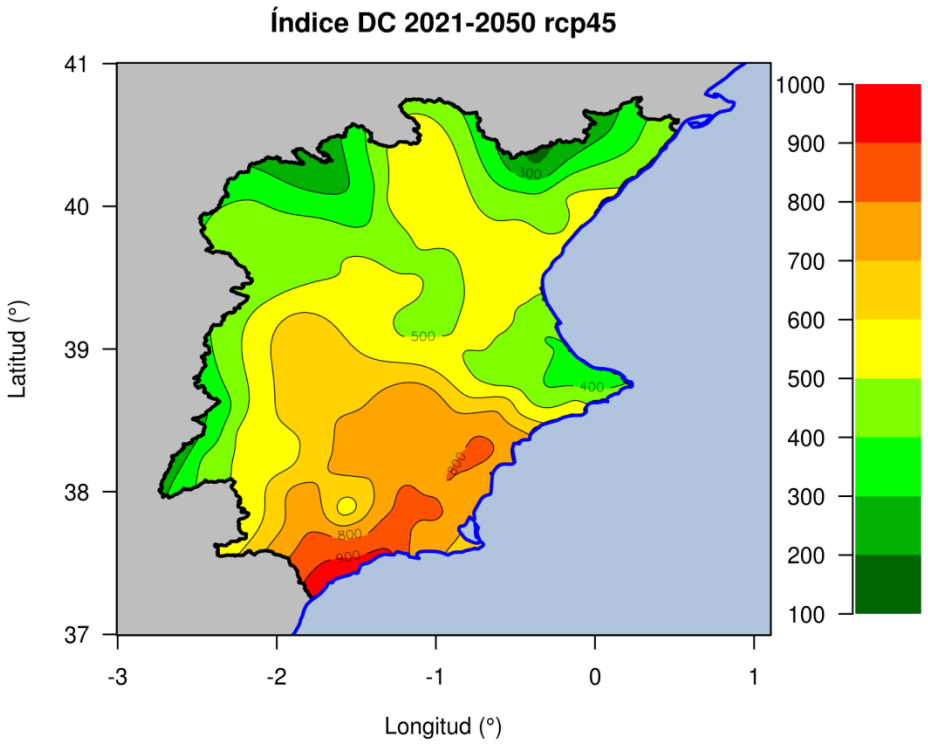

Figura A10. Representación espacial del índice DMC para el periodo 2012-2050 para el RCP4.5

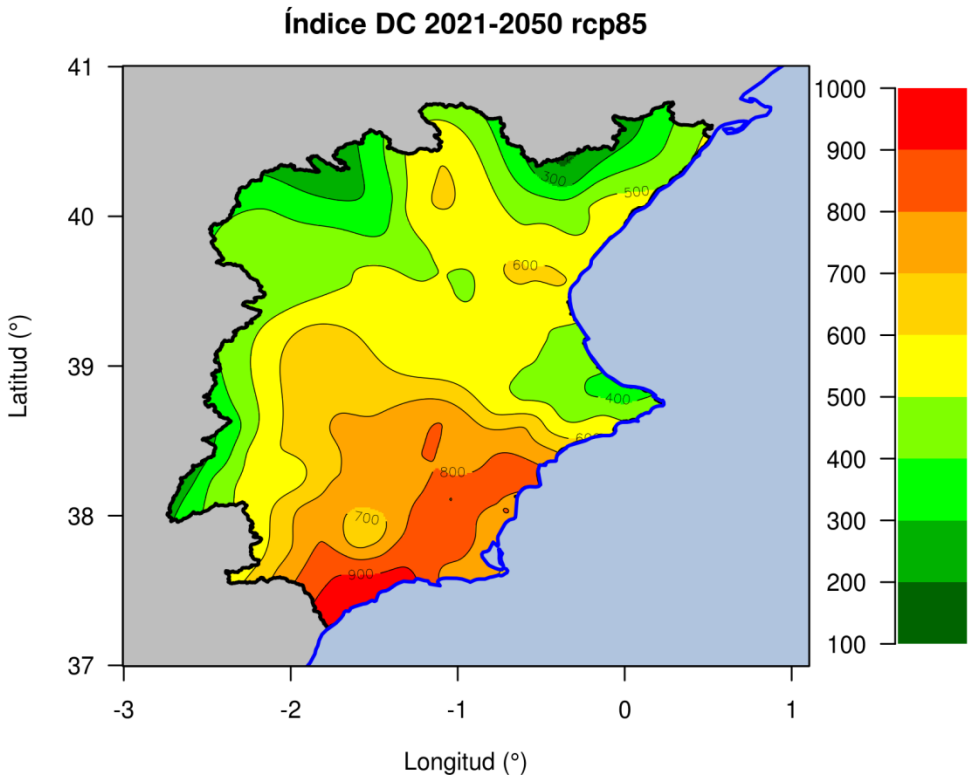

Figura A11. Representación espacial del índice DC para el periodo 2012-2050 para el RCP8.5.

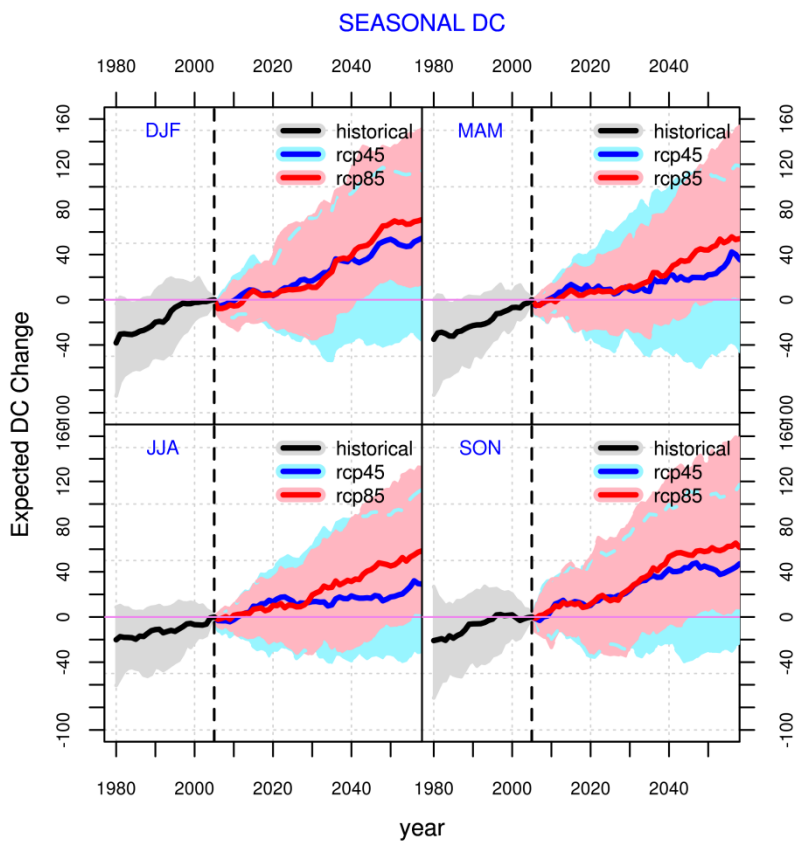

Figura A12.Incrementos estacionales esperados del índice DC para el siglo XXI.

Escenarios de clima futuro del índicepropagación inicial ISI

A través del índice de propagación inicial ISI se evalúa el grado de propagación sin considerar las cantidades de combustibles. Este índice depende de los datos de viento y de los valores del índice FFMC. El ISI varía desde 0 (valores muy bajos, dificultad de propagación inicial) a 70 o más (donde se considera que el valor del ISI es extremo y existe alto riesgo de propagación inicial).

Extremo	Muy alto	Alto	Medio Alto	Medio	Moderado	Moderado bajo	Bajo	Muy Bajo
>70	50 a 70	40 a 50	30 a 40	20 a 30	15 a 20	10 a 15	5 a 10	0 a 5

Leyenda 4. Escala de valores del ISI

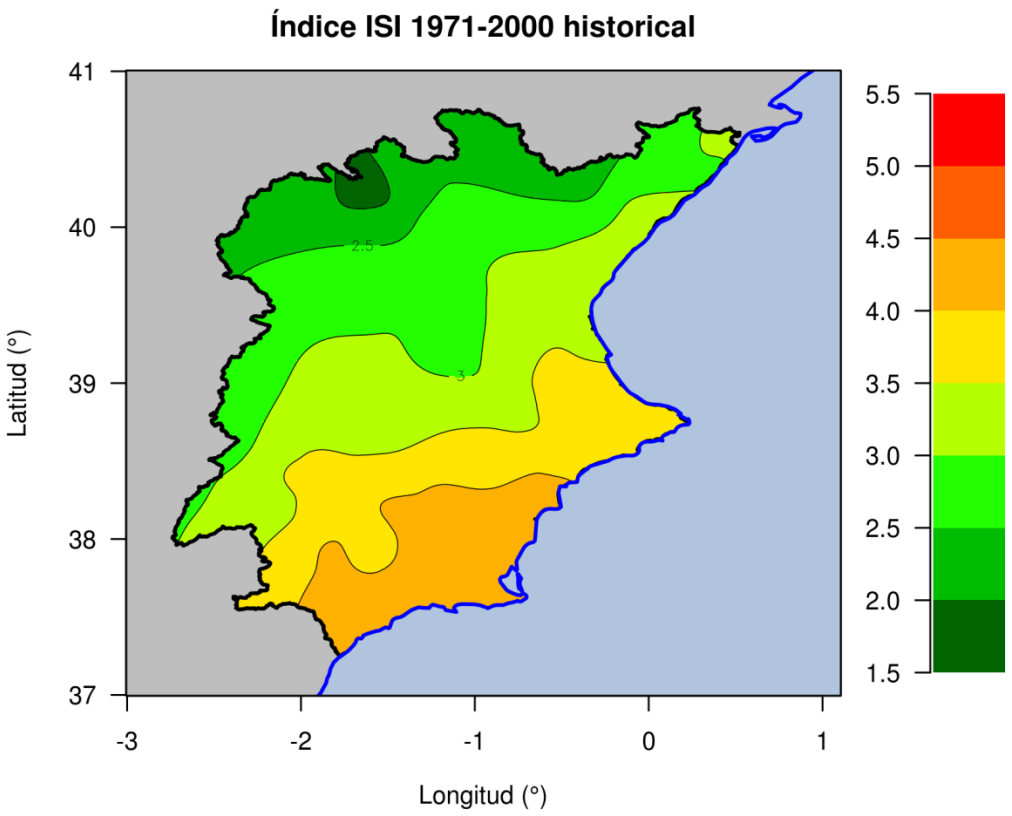

Figura A13. Representación espacial del índice ISI para el periodo histórico 1971-2000.

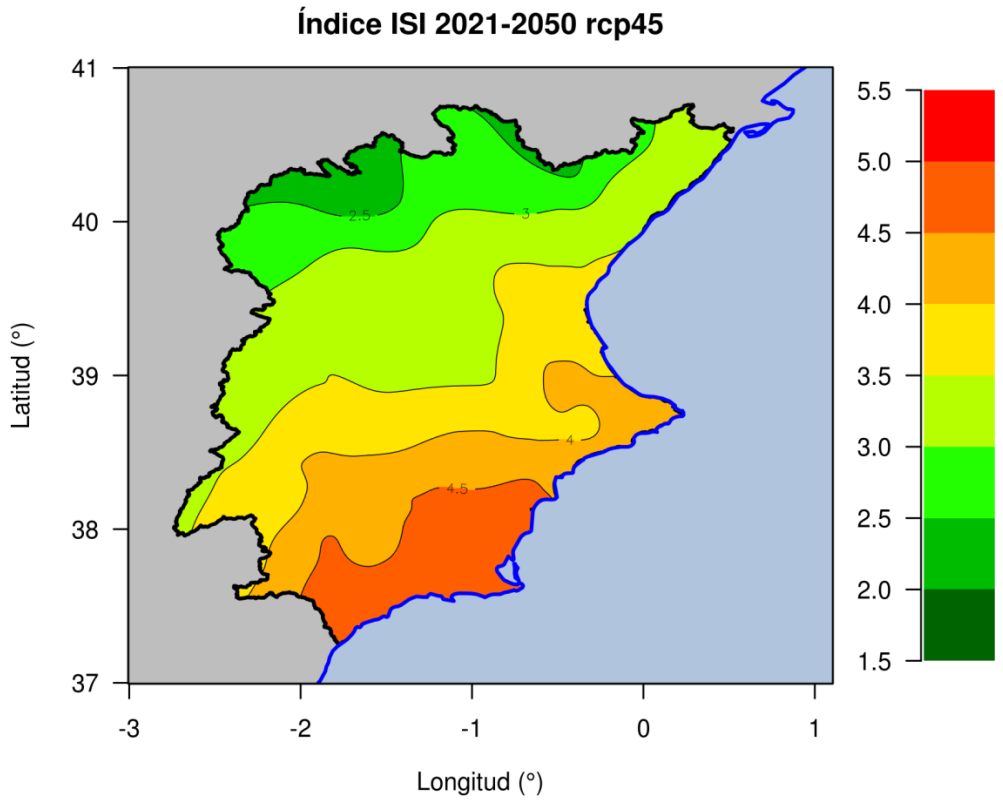

Figura A14. Representación espacial del índice ISI para el periodo 2012-2050 para el RCP4.5

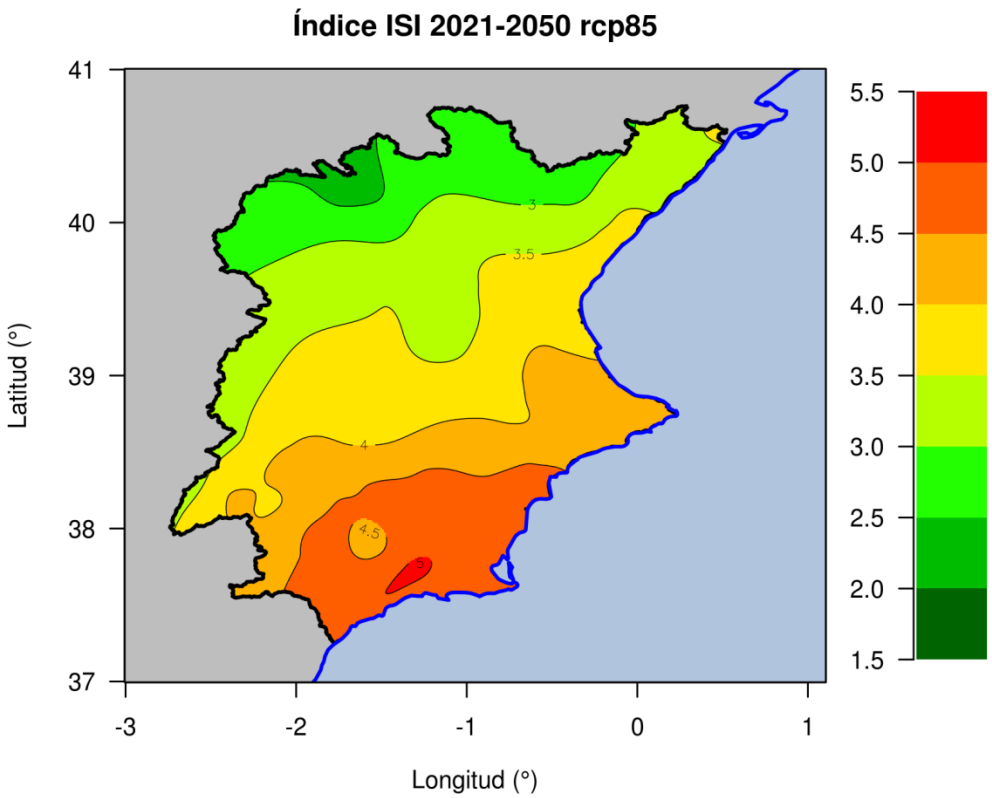

Figura A15. Representación espacial del índice ISI para el periodo 2012-2050 para el RCP8.5.

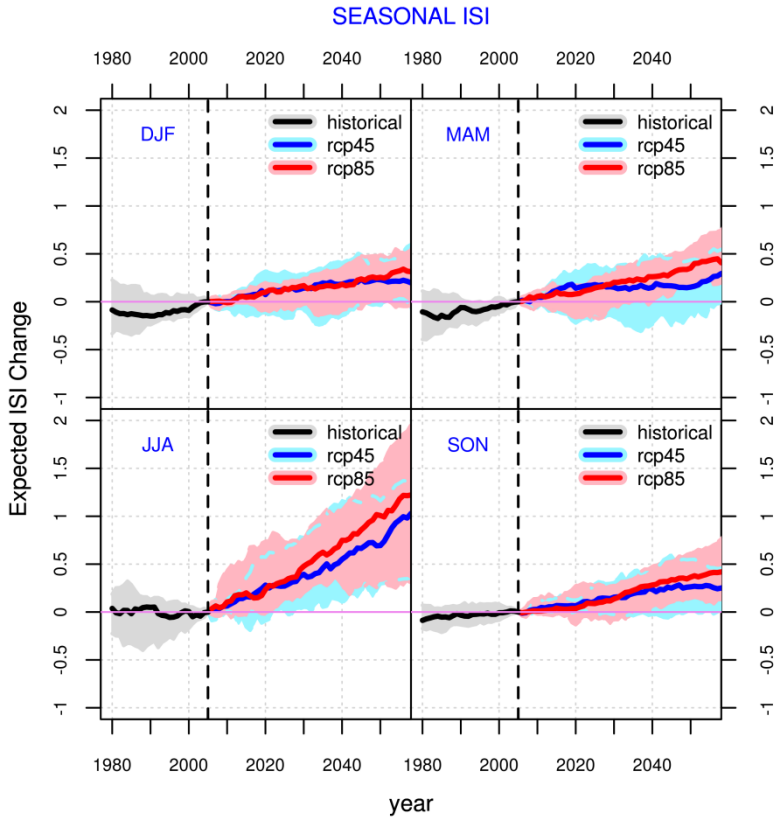

Figura A16. Incrementos estacionales esperados del índice ISI para el siglo XXI.

Escenarios de clima futuro del índicecombustión (BUI)

Mediante el índice de combustión BUI es posible estimar el total de combustible disponible para la propagación del fuego. Este índice se calcula a partir de los valores de los índices DMC y DC. Para valores inferiores a 100, la cantidad de combustible disponible es bajo, mientras que si se alcanzan valores superiores a 400, la cantidad de combustible disponible para que se propague el fuego es alta y si se sobrepasan los 700 ya se habla de riesgos extremos.

Extremo	Muy alto	Alto	Medio Alto	Medio	Moderado	Moderado bajo	Bajo	Muy Bajo
>700	500 a 700	400 a 500	300 a 400	200 a 300	150 a 200	100 a 150	50 a 100	0 a 50

Leyenda 5. Escala de valores del BUI

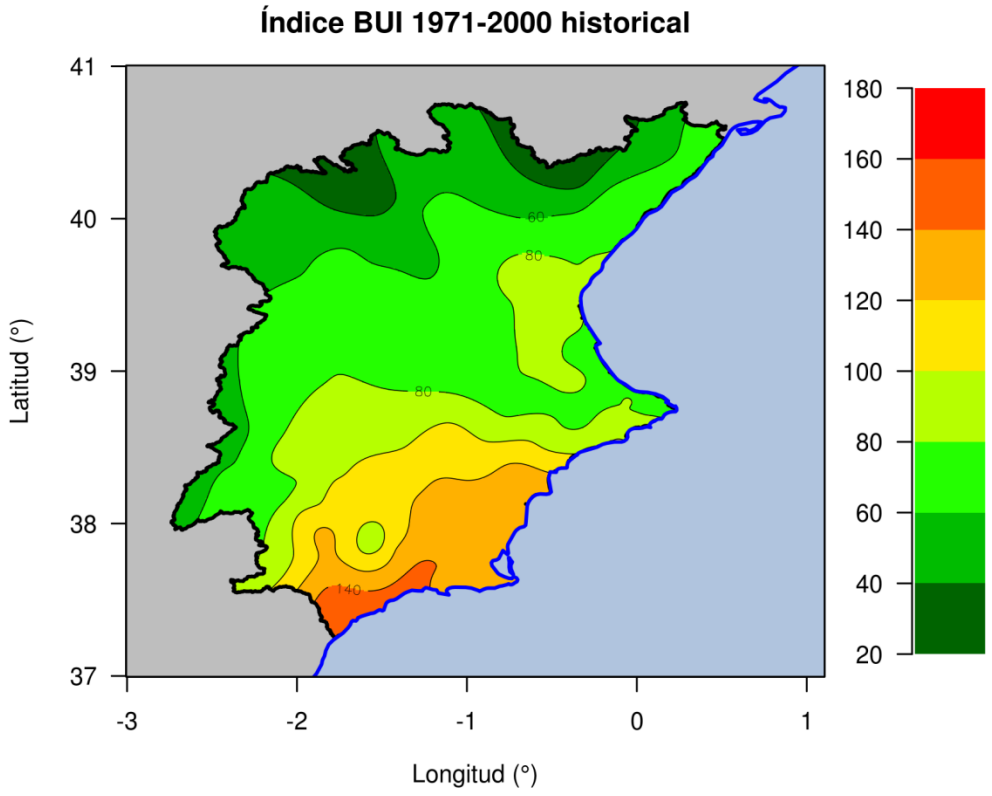

Figura A17. Representación espacial del índice BUI para el periodo histórico 1971-2000.

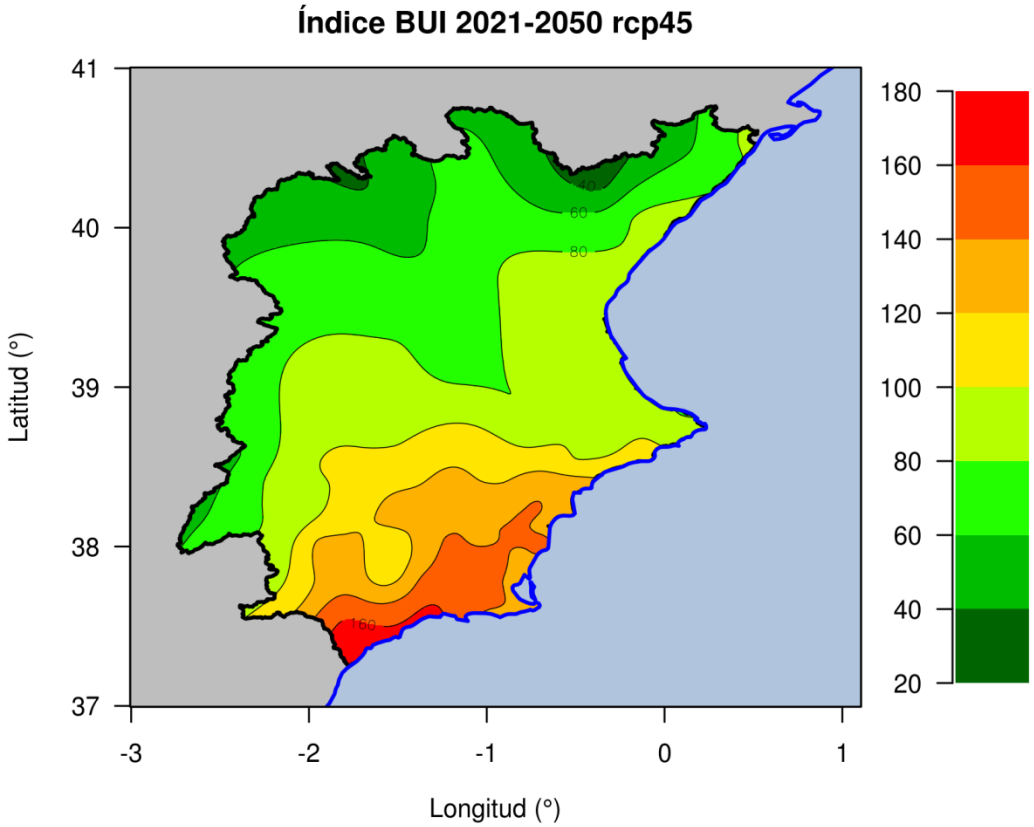

Figura A18. Representación espacial del índice BUI para el periodo 2012-2050 para el RCP4.5

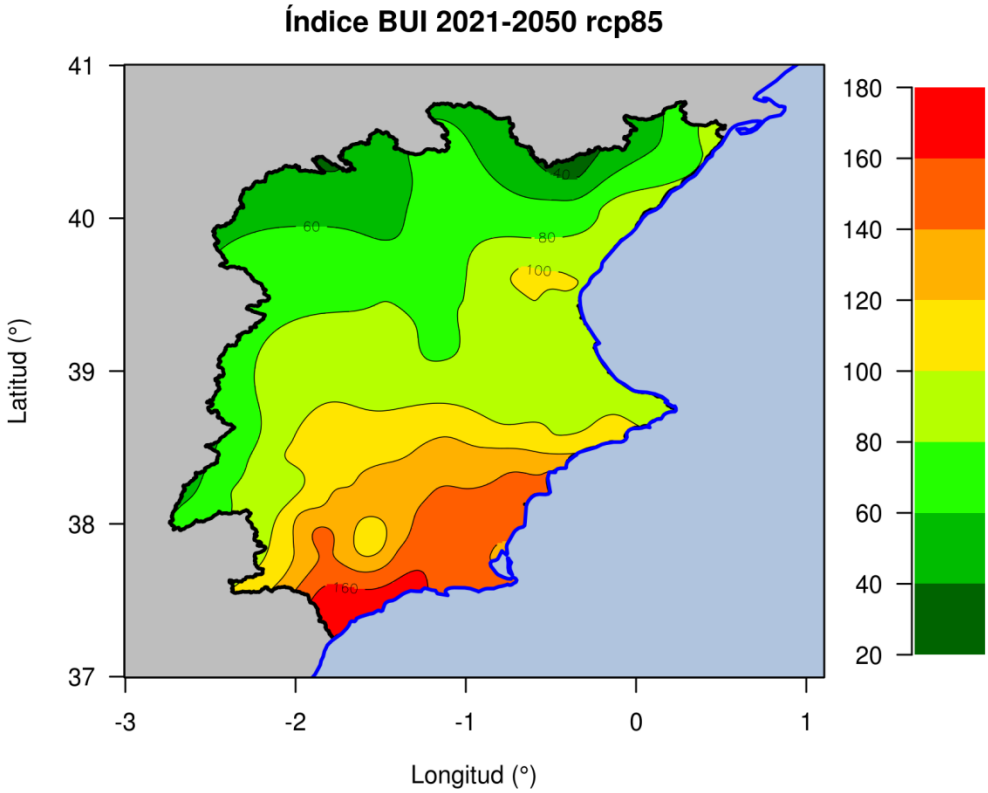

Figura A19. Representación espacial del índice BUI para el periodo 2012-2050 para el RCP8.5.

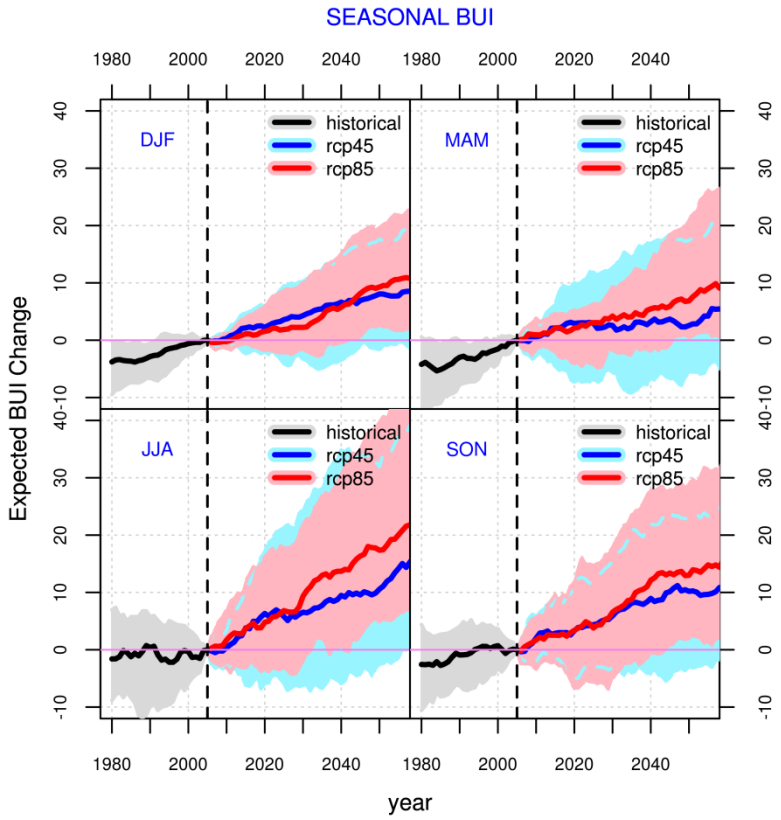

Figura A20. Incrementos estacionales esperados del índice BUI para el siglo XXI.