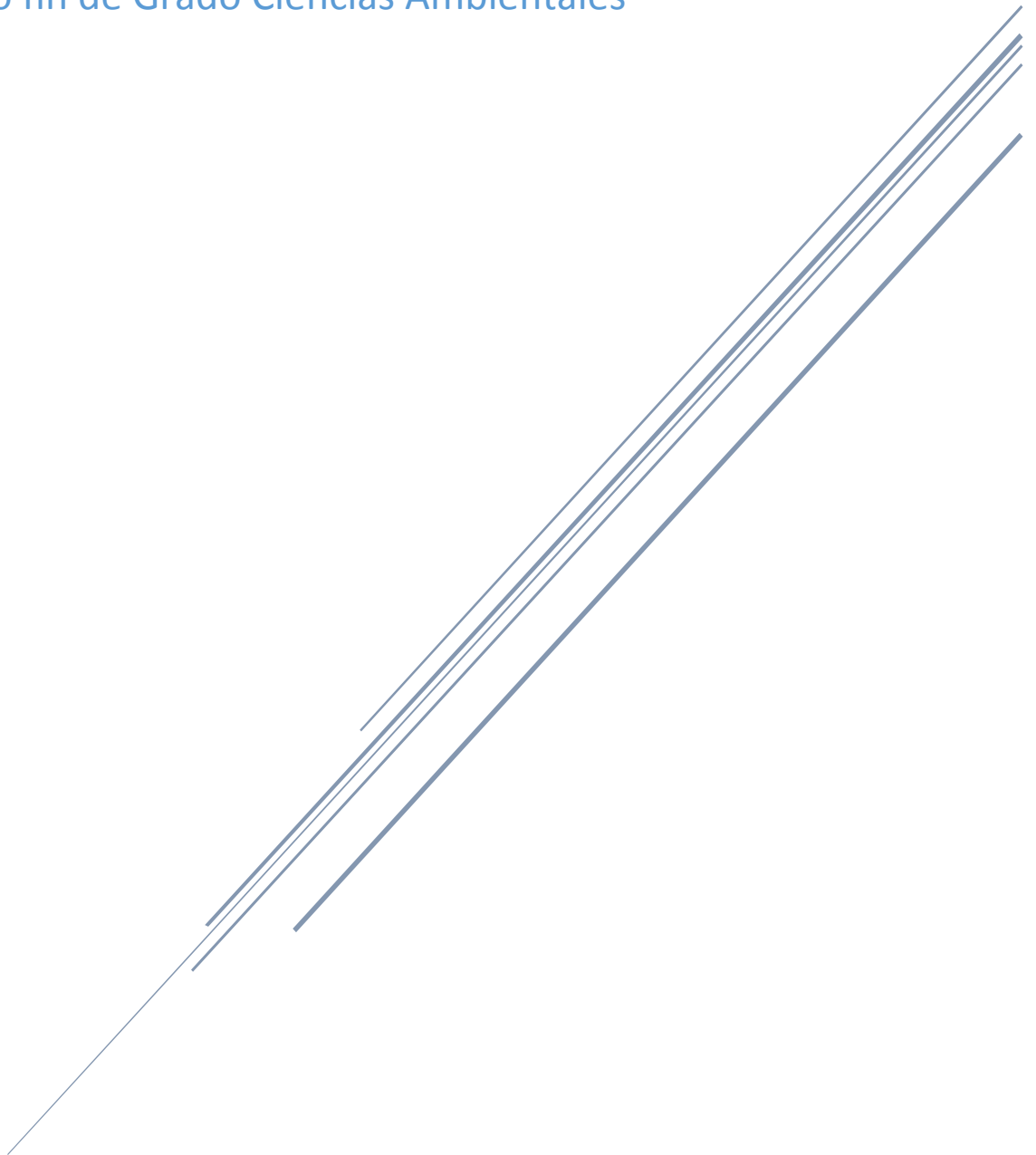


PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE ÍNDICES EXTREMOS PARA EL PERIODO 2021-2050 EN LA ESPAÑA PENINSULAR

Trabajo fin de Grado Ciencias Ambientales



Facultade de Ciencias
Brenda Alexandra de Sa Arnal

Dra. M^a de las Nieves Lorenzo González, profesora titular del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo y **Dra. M^a Inés Álvarez Fernández** investigadora del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo

INFORMAN:

Que el trabajo titulado "**PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE ÍNDICES EXTREMOS PARA EL PERIODO 2021-2050 EN LA ESPAÑA PENINSULAR Y BALEARES**" presentado por **D^a./D. Brenda Alexandra de Sa Arnal**, con **D.N.I.: 44492618S**, ha sido realizado bajo nuestra dirección en el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y autorizamos su presentación como **Trabajo Fin de Grado** del **Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense, 10 de febrero de 2017

D^a. M^a de las Nieves Lorenzo González

D^a. M^a Inés Álvarez Fernández

RESUMEN

Hoy en día existe un gran interés y preocupación por el cambio climático y por su efecto sobre la frecuencia e intensidad de los eventos extremos. Esto es debido al fuerte impacto que estos pueden producir en los ecosistemas y a los graves daños socioeconómicos que suelen conllevar. Por este motivo, en los últimos años los estudios sobre proyecciones climáticas se han centrado en analizar lo que ocurrirá con los eventos considerados extremos. No obstante, muchas proyecciones emplean modelos globales que dan lugar a resultados poco fiables debido a su baja resolución.

En este estudio se analizan las proyecciones futuras para un conjunto de índices de eventos extremos definidos por el grupo el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI). En concreto se han considerado cuatro índices, dos relacionados con la temperatura y dos relacionados con la precipitación (TX90, días con helada, R10mm y Prcptot). En el análisis se han empleado los datos del proyecto CORDEX en el que mediante la técnica de regionalización dinámica, se obtienen datos de temperatura y precipitación con una resolución de 11 Km. Se han considerado las proyecciones sobre la Península Ibérica para el período 2021-2050 en los escenarios RCP4.5 Y RCP8.5 (antiguos escenarios A1B y A2 respectivamente) de 6 ejecuciones diferentes.

Como resultado de este estudio se espera que para el periodo 2021-2050 haya una disminución generalizada en el número de días con helada en ambos escenarios así como un aumento en el porcentaje de días en los cuales la temperatura supere el percentil TX90. En cuanto a los índices relacionados con la precipitación, tanto para el índice R10mm y PRCPTOT los cambios y tendencias observados no son significativos

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 El cambio climático.....	1
1.2 Eventos de extremos climáticos.....	4
1.3 Proyecciones con modelos regionales.....	5
1.4 Objetivos.....	7
2. DATOS Y MÉTODOS.....	9
2.1 Área de estudio.....	9
2.2 Datos.....	11
2.2.1 Datos de la base SPAIN.....	11
2.2.2 Datos del proyecto CORDEX.....	13
2.3 Métodos.....	15
2.3.1 Diagramas de Taylor.....	15
2.3.2 Índices climáticos Extremos.....	17
2.3.3 Test de Wilcoxon Rank Sum.....	18
2.3.4 Tendencias de Mann-Kendall.....	19
3 RESULTADOS.....	21
3.1 Evaluación de los datos para el periodo 1971-2000.....	21
3.1.1 Índice FD.....	21
3.1.2 Índice TX90p.....	23
3.1.3 Índice R10mm.....	25
3.1.4 Índice PRCPTOT.....	27

3.2 Proyecciones climáticas para el periodo 2021-2050 en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.....	29
3.2.1 <i>Proyecciones de extremos climáticos de temperatura</i>	30
3.2.1.1 Índice FD.....	30
3.2.1.2 Índice TX90p.....	33
3.2.2 <i>Proyecciones de extremos climáticos de precipitación</i>	36
3.2.2.1 Índice R10mm.....	36
3.2.2.2 Índice PRCPTOT.....	39
4. CONCLUSIONES.....	45
5. REFERENCIAS.....	49

1 INTRODUCCIÓN

1.1 El cambio climático

El clima es el resultado de la evolución de los sistemas naturales a lo largo de millones de años. Una de sus principales características es su variabilidad natural sobre la que actúa cada vez más el ser humano, modificando la composición de la atmósfera a través de sus actividades que son cada vez más agresivas.

Para interpretar correctamente el cambio climático hay que conocer el desequilibrio existente en el balance energético terrestre como consecuencia de procesos y agentes naturales y antropogénicos. El forzamiento radiativo permite cuantificar los cambios en los flujos de energía. Los valores positivos del forzamiento radiativo indican que en la superficie se produce un calentamiento, mientras que los valores negativos indican enfriamiento (Porrás et al., 2014).

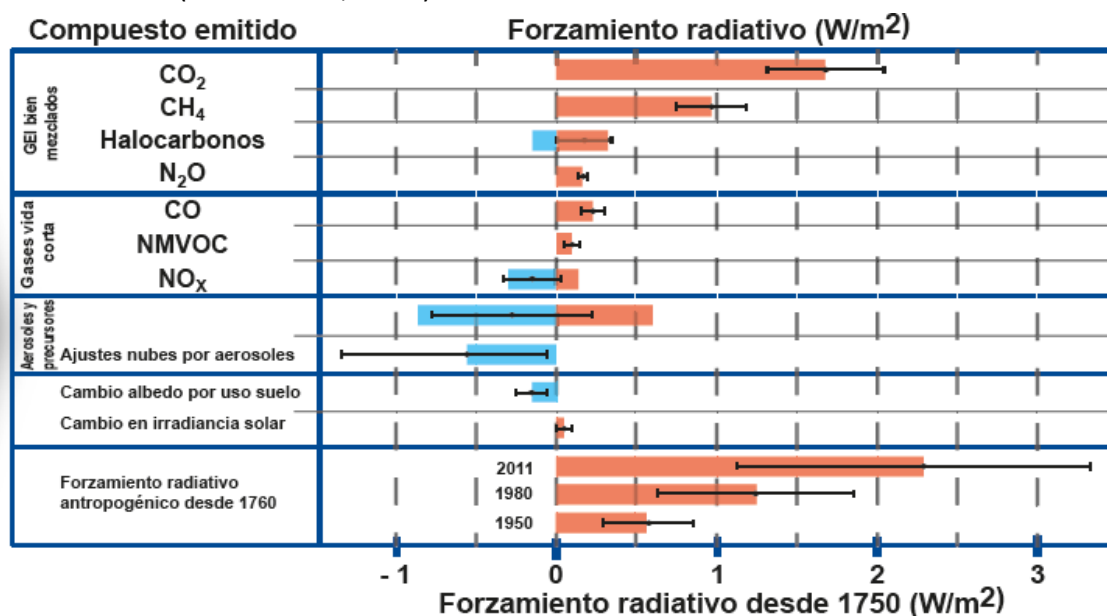


Figura 1.1 Estimaciones de forzamiento radiativo en 2011 e incertidumbres respecto de 1750 (W/m²). Fuente IPCC, Bases Físicas 2013.

En la Figura 1.1 se puede observar la contribución de diferentes factores al forzamiento radiativo terrestre correspondiente a la era industrial (1750-2011). El forzamiento radiativo antropogénico total es positivo (2.29 W/m²) siendo el factor que mayor

contribuye, el aumento en la concentración de CO₂. Los cambios en las concentraciones de los gases de efecto invernadero bien mezclados han provocado un forzamiento radiativo de 3 W/m².

En el Quinto Informe del IPCC (AR5) se definen cuatro nuevos escenarios de emisión basados en las denominadas trayectorias de concentración representativas (RCP). Se caracterizan por su forzamiento radiativo total para el año 2100 comprendido entre 2.6 y 8.5 W/m². En la Tabla 1.1 aparecen reflejados estos escenarios con su forzamiento radiativo correspondiente, su tendencia y la concentración de CO₂ estimada para 2100.

Tabla 1.1 Escenarios de emisión (RCP) considerados en el nuevo informe AR5. Fuente IPCC Bases Físicas 2013.

<i>RCP</i>	<i>FR</i>	<i>Tendencia del FR</i>	<i>[CO₂] en 2100</i>
<i>RCP2.6</i>	2.6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
<i>RCP4.5</i>	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
<i>RCP6.0</i>	6.0 W/m ²	Creciente	670 ppm
<i>RCP8.5</i>	8.5 W/m ²	Creciente	936 ppm

Estos nuevos escenarios consideran los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI frente a los escenarios de emisión utilizados en el AR4 (denominados SRES) los cuales no tienen en cuenta los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales para mitigar las emisiones (IPCC Bases Físicas, 2013). En comparación con sus predecesores, estos nuevos escenarios consideran una mayor cantidad de datos tales como aspectos socioeconómicos, tecnologías emergentes, uso de la tierra y cambios en la cobertura de la tierra (Moss et al., 2010).

A partir de estos escenarios de emisión se pueden obtener las proyecciones futuras de cambio climático global. Algunos de los cambios estimados en la temperatura y la precipitación media que se mencionan en el último informe del IPCC para finales del siglo XXI son:

- Aumento de la temperatura global en la superficie terrestre superior a 1.5°C con respecto al periodo 1850-1900. El cambio no será regionalmente uniforme.

- Las olas de calor se producirán con mayor frecuencia y serán más duraderas. Los fríos invernales extremos seguirán apareciendo de forma ocasional.
- Aumento de la frecuencia e intensidad de precipitaciones fuertes.
- Mayor contraste en la precipitación entre las regiones secas y húmedas y entre las estaciones secas y húmedas.

En la Figura 1.2 se muestra el cambio en la temperatura media en superficie para dos escenarios de emisión entre los períodos de 1986-2005 y 2081-2100. Para las proyecciones correspondientes al escenario RCP2.6 el aumento de la temperatura se sitúa entre 0.3°C-1.7°C, mientras que en el escenario RCP8.5 el rango de variación presenta valores mucho mayores. También se puede observar que el calentamiento no es uniforme entre las regiones. La región del Ártico se calentará más rápidamente y el calentamiento en las zonas continentales será mayor que en el océano.

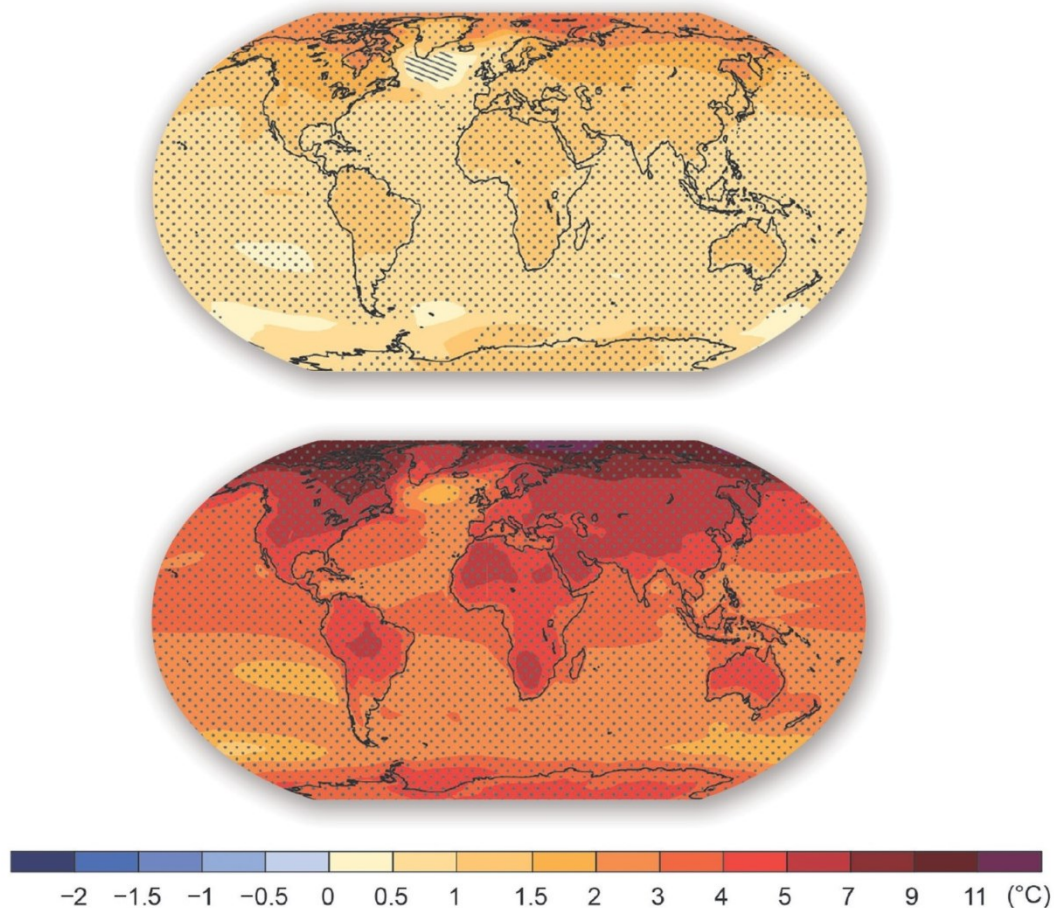


Figura 1.2 Cambio anual de la temperatura media global en superficie para el escenario RCP2.6 (superior) y RCP8.5 (inferior). Diferencia entre los periodos 1986-2005 y 2081-2100. Fuente IPCC Bases Físicas 2013. Las tramas sombreadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es pequeña en comparación con la variabilidad interna natural (esto es, inferior a una desviación típica de la variabilidad interna natural en medias de 20 años). Las tramas punteadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es grande en comparación con la variabilidad interna natural (esto es, superior a dos desviaciones típicas de la variabilidad interna natural en medias de 20 años) y donde, por lo menos, el 90% de los modelos concuerdan con el signo del cambio.

También se muestran los cambios en la precipitación media para los mismos escenarios de emisión entre los períodos de 1986-2005 y 2081-2100 (Figura 1.3). Al igual que en el caso de la temperatura, los cambios que se producirán no serán uniformes. Además, en el marco del escenario RCP8.5, en las regiones situadas en latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial se producirá un aumento en la precipitación media. Para el mismo escenario también se puede observar que la precipitación media disminuirá/aumentará en muchas regiones secas/húmedas de latitud media.

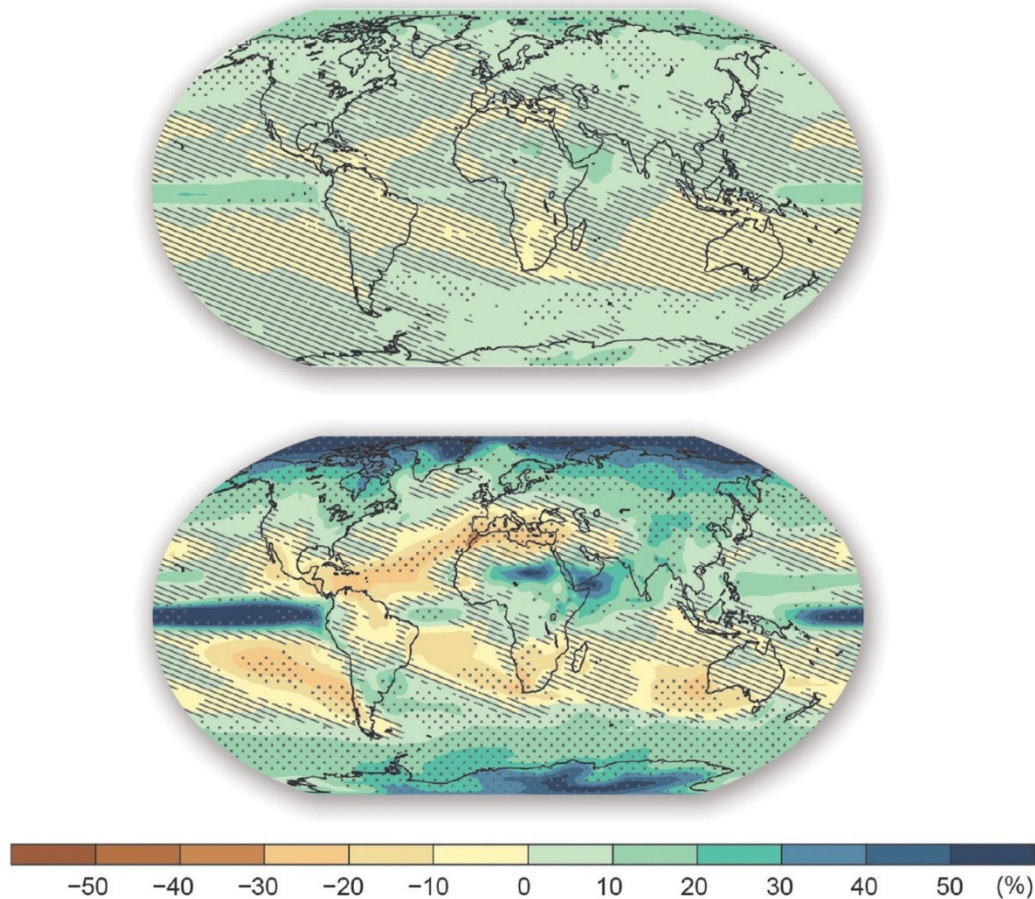


Figura 1.3 Cambio de la media porcentual de la precipitación media anual para el escenario RCP2.6 (superior) y RCP8.5 (inferior). Diferencia entre los periodos 1986-2005 y 2081-2100. Fuente IPCC Bases Físicas 2013. Las tramas sombreadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es pequeña en comparación con la variabilidad interna natural (esto es, inferior a una desviación típica de la variabilidad interna natural en medias de 20 años). Las tramas punteadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es grande en comparación con la variabilidad interna natural (esto es, superior a dos desviaciones típicas de la variabilidad interna natural en medias de 20 años) y donde, por lo menos, el 90% de los modelos concuerdan con el signo del cambio.

1.2 Eventos de extremos climáticos

Se define evento climatológico extremo como aquel episodio, suceso o evento meteorológico anómalo o infrecuente, según su distribución estadística para un lugar determinado. Esto hace referencia a todo suceso que se encuentre por encima del percentil 90 o por debajo del percentil 10 según la probabilidad observada (IPCC, 2013). Estos eventos son fenómenos de gran importancia e interés a nivel científico y social ya que pueden llegar a afectar a diversas zonas del planeta y causar numerosos daños. Ejemplos de eventos extremos son las olas de calor y frío, los episodios de precipitación muy intensa, las sequías, las inundaciones o los huracanes.

Un reciente estudio atribuye al forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero como principal causa de los cambios en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos climáticos (Schoof y Robeson, 2016). Dichos cambios suelen tener un fuerte impacto en la sociedad y el medio ambiente (Karl y Easterling, 1999) y ello ha provocado que en los últimos años exista una gran preocupación por los efectos del cambio climático en dichos eventos, para mitigar los daños y conseguir una mejor adaptación ante las nuevas condiciones climáticas (Karl y Easterling, 1999).

En el último informe del IPCC se afirma con un 95% de fiabilidad que actualmente la principal causa del calentamiento global es la actividad humana en comparación con evaluaciones realizadas anteriormente. En él se señala que es muy probable que se produzca un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, especialmente los eventos de olas de calor y los de precipitaciones intensas (Hay et al., 2016).

Los eventos extremos tienden a ser de mayor relevancia para la sociedad y los sistemas naturales, debido a que cuanto más extremo sea el evento, mayor es la probabilidad de causar daños ambientales y sociales (Zhang et al., 2011; Pérez, 2014). Los costes económicos y sociales de los eventos extremos podrían verse significativamente incrementados ante los cambios que se puedan dar en estos eventos como consecuencia del cambio climático (Hoeppe, 2016).

La anómala aparición de los eventos extremos, hace que se necesite investigar más para poder determinar cambios en su frecuencia e intensidad (Sillmann y Roeckner, 2008; Pérez, 2014). Los eventos extremos se pueden clasificar de muchas maneras diferentes siendo la más común la clasificación en base a umbrales, como por ejemplo el número de días en los que la temperatura mínima está por debajo del grado de congelación. Otro tipo de clasificación es en base a Percentiles, en la que se considera el número de días en los que se alcanzan temperaturas superiores al percentil 90 en un lugar

determinado. Se han desarrollado numerosos índices en base a percentiles auspiciados por la Comisión Climatológica Internacional (CCI), el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), el proyecto CLIVAR y el Equipo de expertos sobre detección del cambio climático (ETCCDI) (Wehner et al., 2013; School et al., 2015).

1.3 Proyecciones con modelos regionales

Para estimar proyecciones climáticas los modelos climáticos son la herramienta básica. Estos representan de forma matemática las ecuaciones de las leyes y principios de la Física que explican las interacciones que tienen lugar en el sistema climático. El sistema climático está formado por la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera siendo cada uno de ellos representado por determinados modelos, de forma que todos trabajan acopladamente entre sí para resolver las interacciones e intercambios de materia y calor que se producen entre ellos. La resolución de estas ecuaciones genera simulaciones del clima, teniendo en cuenta los diferentes horizontes temporales para los que son capaces de elaborar simulaciones realistas (Ulden y Oldenborgh, 2006; IPCC, 2013). En las últimas décadas, el desarrollo computacional ha permitido la generación de escenarios climáticos con modelos globales y modelos regionales.

Los modelos globales se ejecutan sobre todo el planeta y se utilizan para conocer la respuesta del sistema climático ante un forzamiento y a su vez para evaluar el clima futuro en función de dicho forzamiento (Josep Calbó, 2013). La resolución espacio-temporal de los modelos globales es limitada debido a la capacidad computacional, pero con el tiempo se ha visto mejorada en paralelo a los avances computacionales. Dichos modelos de escala global trabajan con mallas que recorren todo el planeta y tienen espaciados sus puntos entre 100 y 300 km. Esta baja resolución impide detectar los cambios que se producen en regiones con orografía accidentada así como caracterizar fenómenos meteorológicos de pequeña escala como nieblas, lluvias convectivas o eventos asociados a la orografía compleja. Por lo tanto para el estudio de cambios climáticos de carácter más local, la resolución de los modelos globales puede no ser suficiente.

Para solventar los problemas de escala de los modelos globales, es necesario utilizar técnicas de regionalización o “downscaling” sobre las proyecciones creadas reduciendo el espaciado de los puntos de malla a unos pocos kilómetros. Estas técnicas se pueden agrupar en dos: estadísticas y dinámicas (o de anidamiento) (Herrera García, 2011).

La técnica de regionalización estadística relaciona la salida obtenida de los modelos de gran escala (variables a escala global) con las observaciones en superficie de estaciones

de medida (variables a escala regional) que reproducen los factores climáticos locales que los modelos globales no pueden resolver.

En la técnica de regionalización dinámica se emplean las condiciones iniciales y las condiciones de contorno de los modelos globales para ejecutar los modelos regionales de alta resolución con escalas menores de 50 km sobre áreas regionales de países y continentes.

Ambas técnicas, constan de diferentes ventajas e inconvenientes. Los modelos generados a partir de la técnica estadística son computacionalmente más baratos y permiten calibrar y proyectar regionalmente las salidas de los modelos globales del clima a partir de observaciones históricas. Por otro lado, los modelos generados a partir de la técnica dinámica son más consistentes físicamente debido a su base en ecuaciones físicas sobre la dinámica (San Martín, 2009; Oviedo Torres y León Aristizábal, 2010)

Los modelos climáticos regionales permiten obtener mejores resultados en aquellas zonas donde existen forzamientos por orografías complejas permitiendo así diferenciar las señales de cambio climático de las de forzamiento orográfico (Wang et al., 2004; Morata Gasca, 2014). Están elaborados para dar resultados con mayor resolución espacio-temporal en comparación con los modelos globales y en un espacio limitado, definido para cada estudio. (Morata Gasca, 2014; IPCC, 2013). Asimismo, permiten mejorar el conocimiento de procesos climáticos tales como el forzamiento radiativo de las nubes, los procesos convectivos y algunos procesos en superficie (Barros y Hwu, 2002; Morata Gasca, 2014).

1.4 Objetivos

El objetivo de este trabajo es utilizar los datos del proyecto CORDEX, en particular EURO-CORDEX, para analizar las proyecciones sobre eventos extremos en la península Ibérica durante el periodo 2021-2050 para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Para ello se utilizarán 6 ejecuciones diferentes resultado de la combinación de 3 modelos globales con 2 modelos regionales y se llevarán a cabo los siguientes pasos:

- Validar los índices de eventos extremos de las simulaciones escogidas con los calculados a partir de los datos observados registrados en *SPAIN02* para el periodo 1971-2000.
- Analizar las proyecciones futuras de los índices de eventos extremos elegidos en los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5 para la península Ibérica y estudiar su significancia.

2 DATOS Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La península Ibérica (Figura 2.1) se encuentra al suroeste de Europa, en una región de orografía compleja influenciada por climas tropicales y templados. Debido a esto y a la influencia del océano presenta una marcada variabilidad climática con un gradiente de precipitación significativa norte-sur (Rodríguez-Puebla et al., 1998,2001; Esteban-Parra et al., 1998; Muñoz-Díaz y Rodrigo, 2004; Aupí, 2005). Al igual que en todo el sector Euro-Atlántico, la variabilidad climática de la Península está modulada principalmente por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO).



Figura 2.1 Mapa de la región de estudio

En términos generales, la península Ibérica consta de cinco regiones homogéneas de precipitación climática (Muñoz-Díaz y Rodrigo, 2004; Aupí, 2005):

- La costa atlántica norte muestra valores anuales elevados de precipitación (de 900 a 2500 mm) con una elevada regularidad climática gracias a la llegada continua de los sistemas frontales del Atlántico.

- La zona central se caracteriza por valores anuales bajos de precipitación (inferiores a 500 mm) con excepción de la cuenca del río Tago (con 900 mm) con entradas de aire húmedo y frío de sistemas frontales del Atlántico.
- La costa oriental presenta una precipitación anual baja (menos de 700 mm), mostrando una gran variabilidad por los eventos fuertes (como precipitaciones diarias mayores de 200 mm). También es el caso de la cuenca del río Ebro situada al noroeste, debido a las entradas de aire húmedo y cálido del mar Mediterráneo (García-Ortega et al., 2007).
- La región sureste presenta un clima desértico con precipitaciones anuales por debajo de los 100 mm, exceptuando a sierra Nevada.
- La región suroeste se encuentra influenciada por los vientos Atlánticos, con precipitaciones por encima de los 900 mm/año.

De acuerdo a la clasificación climática de *Köppen-Geiger* (empleada en numerosos estudios climáticos, Figura 2.2), se distinguen 4 climas principales dentro de la Península en base a valores medios mensuales de precipitación y temperatura (Pozo, 2014):

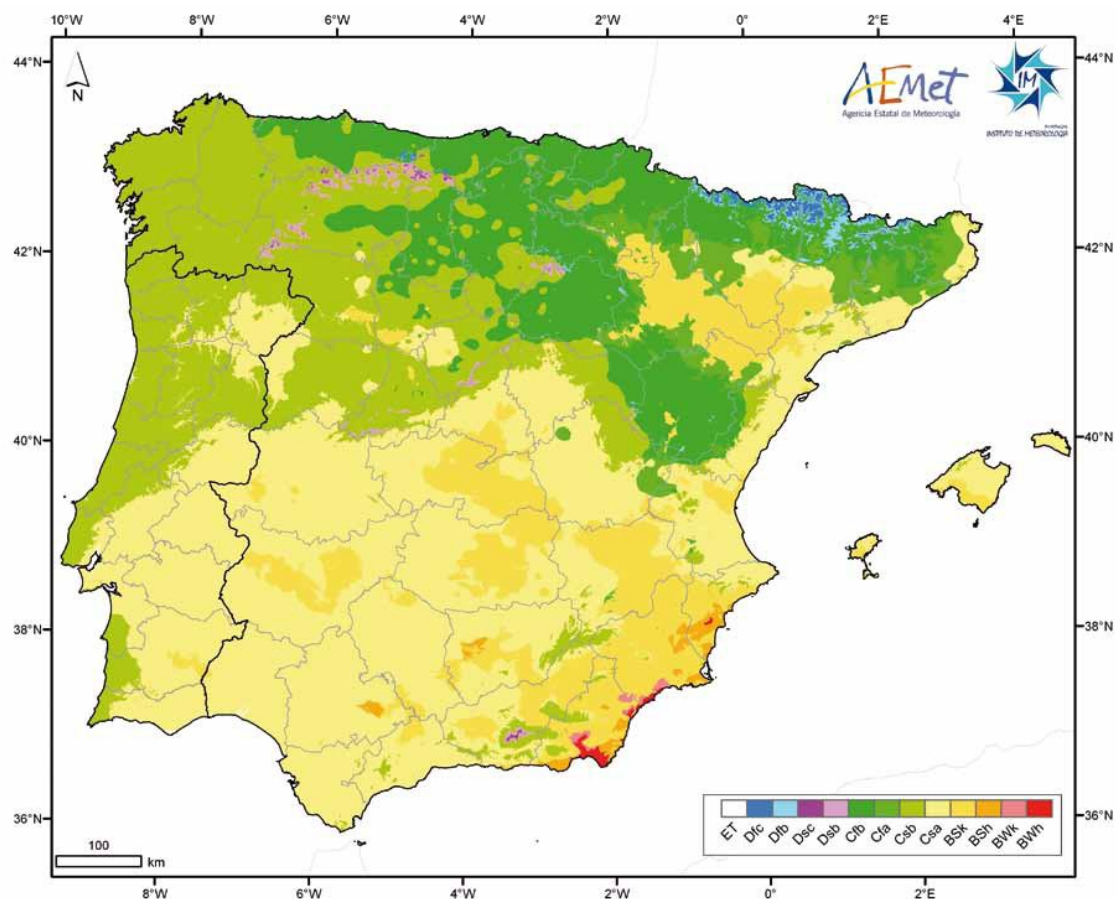


Figura 2.2 Clasificación climática de Köppen-Geiger. Fuente: atlas climático AEMET.

1. Clima Seco:
 - a. Desierto cálido (BWh) y desierto frío (BWk): áreas del sureste de la Península.
 - b. Estepa cálida (Bsh) y estepa fría (BSk): sureste de la Península, valle del Ebro, meseta sur, Extremadura y Baleares.
2. Clima Templado:
 - a. Templado con verano seco y caluroso (Csa)
 - b. Templado con verano seco y templado (Csb)
 - c. Templado sin estación seca con verano caluroso (Cfa)
 - d. Templado sin estación seca con verano templado (Cfb)
3. Clima frío:
 - a. Frío con verano seco y templado (Dsb) y frío con verano seco y fresco (Dsc)
 - b. Frío sin estación seca y verano templado (Dfb) y frío in estación seca y verano fresco (Dfc)
4. Clima Polar:
 - a. Tundra (ET)

Siguiendo la tendencia recogida en el informe CLIVAR- *Clima en España: Pasado, presente y futuro* así como en el último informe del IPCC, se puede afirmar que en el último siglo las temperaturas en la península Ibérica han aumentado. En relación a las precipitaciones no hay un claro acuerdo sobre la tendencia tomada, ya que en muchos casos hay variaciones según el periodo del año o bien la base de datos empleada (Bladé et al., 2010).

El último informe del IPCC señala a la península Ibérica como una región de gran vulnerabilidad ante el cambio climático, ya que predice un incremento en los eventos extremos, un aumento de las temperaturas así como una reducción de las precipitaciones (García, 2011).

2.2 Datos

2.2.1 Datos de la base SPAIN

SPAIN es una base de datos en malla regular desarrollada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el grupo de Meteorología de Santander (Universidad de Cantabria-CSIC: www.meteo.unican.es), sobre datos de precipitaciones y temperatura observadas a escala diaria, desarrollado para España peninsular y las islas Baleares. Proporciona datos de 1950 a 2008 empleando una amplia y densa red de estaciones meteorológicas (2756) incluidas en la red secundaria de la Agencia Estatal de

Meteorología. Desde su creación, la base de datos se ha modificado y actualizado, por ello se pueden distinguir diferentes versiones de SPAIN (Herrera García, 2011):

SPAIN_v1: La base de datos abarca el periodo de 1950 a 2003 y solo dispone de precipitación.

SPAIN_v2: Se amplía el periodo de precipitación a 2008 y se incluyen rejillas de temperaturas máximas y mínimas.

SPAIN_v2.1: Se corrigen errores de la versión anterior.

SPAIN_v3: Se incorpora una nueva rejilla de precipitación generada a partir de series largas y considerando la orografía como una variable.

SPAIN_v4: Esta versión se crea para la validación de los modelos regionales del proyecto EURO-CORDEX presentando grandes diferencias con respecto a las versiones anteriores. Consta de diferentes resoluciones (0.11, 0.22, 0.44) y se incluyen valores promediados de los valores obtenidos interpolando una malla auxiliar de 0.01° de resolución (Figura 2.3).

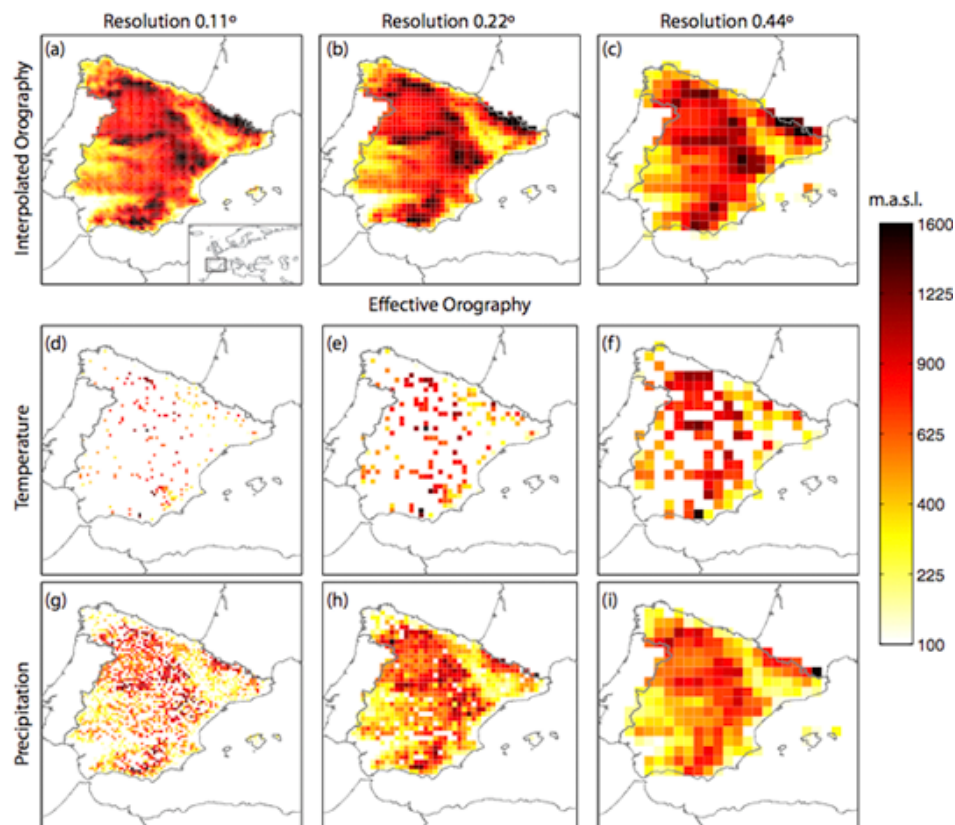


Figura 2.3 Comparativa de las rejillas de la última versión de SPAIN02. Fuente Grupo de Meteorología de Santander.

Dentro de las diferentes resoluciones disponibles para la versión V4, en este trabajo se han utilizado los datos correspondientes a la resolución horizontal de 0.11°. Los datos con esta resolución comienzan en enero de 1971.

2.2.2 Datos del proyecto CORDEX

El proyecto CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) es un proyecto de escala internacional promovido por el WCRP (World Climate Research Programme) que propone un protocolo común a todos los usuarios de los modelos regionales. Los modelos regionales se ejecutan para obtener proyecciones más realistas de los modelos globales (Giorgi et al., 2009; Bazo Zambrano, 2014). En dicho proyecto, se distinguen varios dominios (regiones del planeta en las que se divide el estudio de los modelos climáticos dentro de este proyecto). En la Figura 2.4 se muestran los 14 dominios principales considerados en el proyecto CORDEX (Vargas Zamora, 2015):

- América del Sur
- América central
- América del Norte
- Europa
- África
- Zona Sur de Asia
- Zona Este de Asia
- Asia Central
- Oceanía
- Antártida
- Zona Ártica
- Zona Mediterránea
- Zona de Oriente Medio y Norte de África
- Sur-Este asiático

Para el dominio de Europa (EURO-CORDEX), existen dos resoluciones espaciales diferentes, una de 0.44° (EUR-44, ~ 50 Km) y una más fina de 0.11° (EUR-11, ~ 12.5 Km) (EURO-CORDEX, Data).

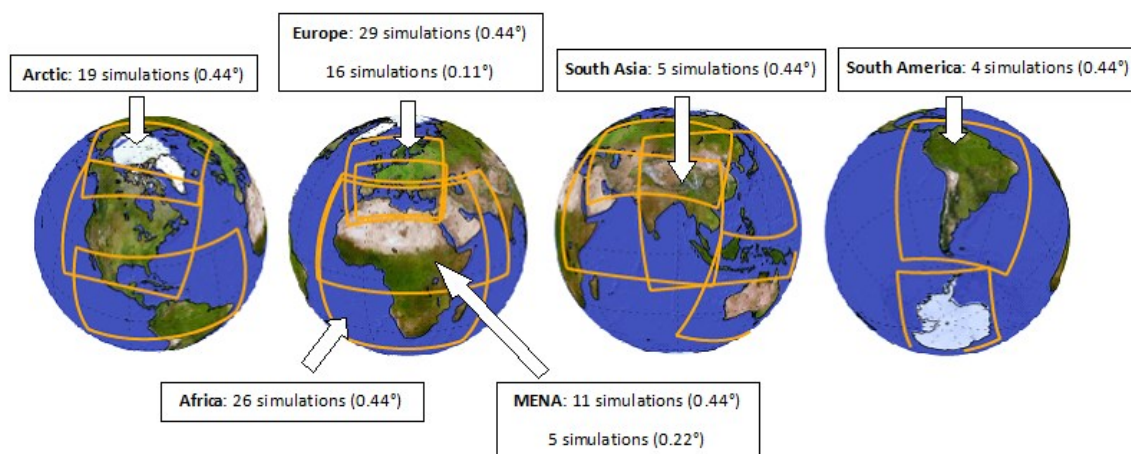


Figura 2.4 Dominios principales CORDEX (<http://www.cordex.org/>).

CORDEX pretende contribuir a los informes del IPCC y a su vez, originar un espacio para la comunidad mundial interesada en la creación de escenarios regionales de cambio climático para que sean capaces de compartir información, resultados, experiencias, tecnología y soporte técnico. Debido a las fuentes de error que puedan originar los modelos regionales, CORDEX tiene como objetivo aportar suficiente información para así dar un valor razonable de incertidumbre empleando varios modelos globales, escenarios de emisiones, modelos regionales, múltiples experimentos, varias regiones y métodos de regionalización (Oviedo Torres y León Aristizábal, 2010). Una de las actividades iniciales de CORDEX es la de simulación de escenarios de emisión basados en las denominadas trayectorias de concentración representativas (RCP).

En el presente trabajo se emplean los escenarios RCP4.5 Y RCP8.5 centrados en el dominio EUR (europeo), concretamente el EUR11 que corresponde a una malla de aproximadamente 11 Km con una resolución de 0.11°.

Tabla 2.1 Modelos globales y regionales considerados.

RMC GMC	CCLM4-8-17 RCA4	
ICHEC-EC-EARTH	X	X
CNRM-CM5	X	X
MPI-ESM-LR	X	X

En la Tabla 2.1 se muestran las seis simulaciones utilizadas en el presente estudio según la combinación de modelos globales (GMC) y regionales (RMC) que se señala.

2.3 Métodos

Para el tratamiento de los datos realizados en este trabajo se ha utilizado el programa MatLab (MATrix LABoratory) que es un software matemático de alto nivel, con lenguaje de programación propio basado en matrices. Es de fácil manejo y permite la realización de diversos procedimientos básicos como son la visualización gráfica de las series temporales, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la integración con otros lenguajes, permitiendo desplegar algoritmos y aplicaciones en sistemas web, empresariales o de producción (<http://www.mathworks.es>).

2.3.1 Diagramas de Taylor

Los diagramas de Taylor son una forma de representar gráficamente la concordancia entre dos o más patrones. La similitud entre patrones se determina en términos de su correlación, su raíz cuadrática media y la amplitud de sus variaciones (representado por sus desviaciones estándar). Estos diagramas son especialmente útiles para evaluar múltiples aspectos de los modelos complejos o para medir la habilidad relativa de muchos modelos diferentes.

La Figura 2.5 es un ejemplo de diagrama de Taylor que refleja la forma en la que se resume la habilidad relativa con la que varios modelos climáticos globales simulan el patrón espacial de la media anual de precipitación. En concreto, se calcularon los valores estadísticos mencionados anteriormente para ocho modelos y se le asignó una letra a cada modelo considerado. Cada letra que se posiciona en el diagrama mide la similitud del patrón de precipitación del modelo con el de las observaciones (punto “observed” en Figura 2.5). La correlación entre el patrón simulado y el patrón de las observaciones se muestra en las líneas azules, la raíz cuadrática media (RMS) sobre las líneas circulares verdes y la desviación estándar del patrón simulado es proporcional a la distancia radial desde el origen, líneas negras.

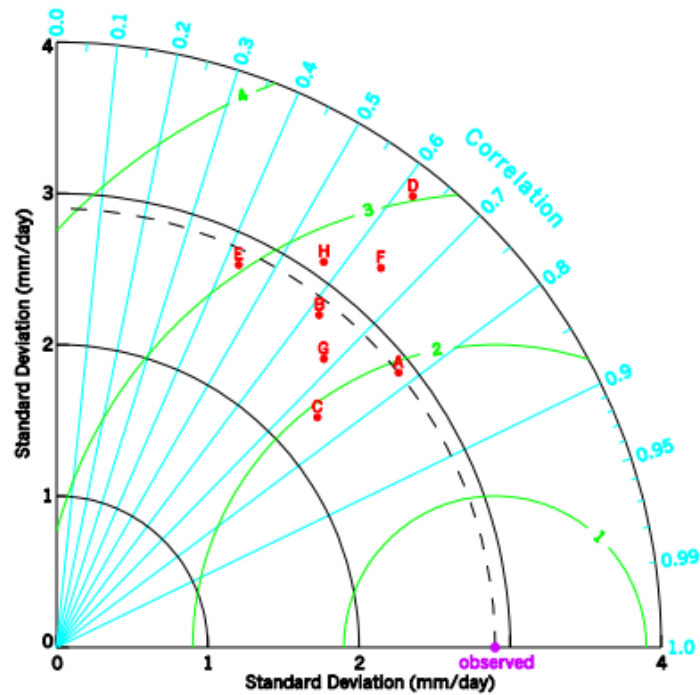


Figura 2.5 Ejemplo de Diagrama de Taylor. Fuente Taylor, 2001.

Los patrones simulados y que más se asemejan a las observaciones se encuentran más cerca del punto “observed” situado en el eje X. Los modelos que estén situados sobre el arco de trazos contarán con una desviación estándar acorde con la de las observaciones indicando que las variaciones de los patrones muestran una amplitud adecuada.

En general, el diagrama de Taylor caracteriza la relación estadística entre dos escenarios, un escenario simulado por un modelo y un escenario de ‘referencia’ basado en las observaciones. (Taylor, 2001).

La razón de que cada punto en el espacio de dos dimensiones pueda representar tres estadísticas diferentes al mismo tiempo (RMS, desviación estándar y la correlación) es debido a que están relacionadas por la siguiente fórmula:

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_rR,$$

Donde R es el coeficiente de correlación entre los escenarios simulados y los de referencia, E' es la diferencia entre los patrones RMS, y σ_f^2 y σ_r^2 son las varianzas de los valores observados y los de referencia, respectivamente (Taylor, 2001).

En el presente trabajo se utilizan los Diagramas de Taylor para analizar la similitud entre los índices calculados para el estudio de eventos extremos a partir de las seis simulaciones consideradas del proyecto EURO-CORDEX y los índices calculados a partir

de la base de SPAIN11Km (considerados como datos de referencia). El periodo común de datos analizado en este estudio de evaluación es 1971-2000.

2.3.2 Índices climáticos Extremos

Desde hace décadas, gran parte de los estudios a largo plazo sobre el cambio climático global, emplean datos observados de precipitación y temperatura. El uso de datos mensuales proporciona una elevada cobertura espacial por todo el mundo pero, en cambio, a la hora de analizar los posibles cambios en los eventos extremos, como cambios en la duración de olas de calor o el número de días durante los cuales la temperatura es superior a su percentil 90 a largo plazo, es necesario emplear datos diarios (Alexander et al., 2006).

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) estos índices son de gran ayuda para caracterizar el clima, determinar los patrones climáticos históricos y mostrar los cambios producidos en el mismo. Para realizar una buena caracterización del clima, se requieren índices en los que figuren la permanencia, amplitud y frecuencia de los extremos climáticos. Así, el último Informe del IPCC señala la alta probabilidad de mayor frecuencia e intensidad de algunos extremos durante el siglo XXI (Klein Tank et al., 2009; Pérez, 2014).

Para tener una visualización uniforme en los cambios observados en la meteorología y los eventos extremos, la OMM, el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), el proyecto CLIVAR y el equipo de expertos sobre detección del cambio climático ETCCDMI coordinaron esfuerzos que permitieron el la creación de una serie de Índices a partir de los datos diarios de temperatura y precipitación. En total se obtuvieron 27 índices en http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

En este trabajo nos centraremos en 4 de ellos: días con heladas, TX90p, R10mm, PRCPTOT, los dos primeros se encuentran relacionados con la temperatura y los otros dos con la precipitación (Alexander et al., 2006). En la Tabla 2.2 se muestra la definición de los cuatro índices elegidos.

Tabla 2.2 Definición de los índices climáticos extremos utilizados en este trabajo.

Indicador	Nombre del Indicador	Definición	Unidades
FD	Días con heladas	Número de días con $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$	Días
TX90p	Días con temperaturas elevadas	Número de días con temperaturas $> 90^{\text{th}}$ percentil	Días
R10mm	Días con precipitaciones fuertes	Número de días con precipitaciones $\geq 10\text{mm}$	Días
PRCPTOT	Precipitación total	Precipitación anual total en días húmedos	mm

2.3.3 Test de Wilcoxon Rank Sum

El Test de Wilcoxon Rank Sum es un test no paramétrico para dos poblaciones cuando las muestras son independientes. Si X e Y son muestras independientes con tamaños muestrales diferentes, el resultado estadístico que se obtiene es la suma de rangos de la primera muestra. Dicho test es equivalente al denominado U de Mann-Whitney, test no paramétrico para la igualdad de medianas poblacionales de dos muestras independientes X e Y.

En el test U de Mann-Whitney, U es el número de veces que Y precede a X en una disposición ordenada de los elementos en las dos muestras independientes X e Y. Se relaciona con la suma estadística de rangos del test de Wilcoxon de la siguiente forma:

Si X es una muestra de tamaño n_x :

$$U = w - \frac{n_x(n_x + 1)}{2}$$

En el caso de muestras grandes, se emplea una z-estadística para así calcular p-valor.

Si X e Y son dos muestras independientes de tamaño n_x y n_y , donde $n_x < n_y$, la z-estadística es:

$$z = \frac{W - E(W)}{\sqrt{V(W)}} = \frac{W - \left[\frac{n_x n_y + n_x(n_x + 1)}{2} \right] - 0.5 \cdot \text{sing}(W - E(W))}{\sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1) - \text{tiescor}}{12}}}$$

Donde tiescor viene dada por:

$$tiescor = \frac{2 \cdot tieadj}{(n_x + n_y)(n_x + n_y - 1)}$$

2.3.4 Tendencias de Mann-Kendall

Se trata de un test no paramétrico recomendado ampliamente y usado por todo el mundo para identificar tendencias en parámetros climáticos ya que presenta un carácter consistente y rígido. Presenta una serie de ventajas ya que permite extraer tendencias de alto grado de confiabilidad sin emplear un gran número de muestras, los datos no necesariamente tienen que ajustarse a una distribución particular y muestra una elevada tolerancia ante perturbaciones en la serie (entre otras). Se lleva a cabo el test Z de significación y el test Q para los datos en el período 2021-2050. Para calcular el test Z tenemos que tener una cantidad de datos superior a 10. Tras calcular este test se puede evaluar la presencia de una tendencia estadísticamente significativa. Para hallar dicha variable se emplea la expresión:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

Calculándose S y VAR(S) de la siguiente forma:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sing}(x_j - x_k)$$

$$\begin{aligned} \text{sing}(x_j - x_k) &= 1 \text{ si } x_j - x_k > 0 \\ &= 0 \text{ si } x_j - x_k = 0 \\ &= -1 \text{ si } x_j - x_k < 0 \end{aligned}$$

Donde x_j y x_k son los valores anuales del año j. K ($j > k$), respectivamente.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

Donde n es el número de datos, g es el número de grupos asociados y t_p es el número de puntos de datos.

Es muy importante la valoración de Z , ya que un valor positivo de este indicaría una tendencia creciente, mientras que, en caso contrario, un valor negativo indicaría una tendencia decreciente. En este sentido y teniendo un número superior a 10 de datos, se puede decir que la significación está basada en la estadística Z :

Si la tendencia es significativa al nivel de $\alpha = 0.001$ o 99.9% la fiabilidad es excelente.

Si la tendencia es significativa al nivel de $\alpha = 0.01$ o 99% la fiabilidad es muy buena.

Si la tendencia es significativa al nivel de $\alpha = 0.05$ o 95% la fiabilidad es buena.

Si la tendencia es significativa al nivel de $\alpha = 0.1$ o 90% la fiabilidad es aceptable.

3 RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación se dividen en dos partes. Primero se procede a una evaluación de los índices de eventos extremos elegidos (ver sección 2.2.2) calculados con los datos diarios del proyecto EURO-CORDEX para el periodo 1971-2000 comparándolos con los índices calculados con los datos de la base SPAIN considerada como base de referencia. Luego, una vez evaluados los datos se procede al análisis de las proyecciones que las simulaciones dan para el periodo 2021-2050 de dichos índices.

3.1 Evaluación de los datos para el periodo 1971-2000

Antes de trabajar con los datos y asumir los resultados dados por las simulaciones para el futuro es necesario evaluar la validez de las simulaciones con respecto a los datos reales de observaciones. De esta forma se puede ver como las simulaciones se ajustan a la realidad y se puede ver si estas sobrestiman o subestiman la realidad y en qué forma. Para llevar a cabo esta evaluación se comparará cada uno de los cuatro índices escogidos para el estudio con los índices calculados con los datos reales de observación de la base de datos SPAIN para el periodo 1971-2000. Visualizaremos tanto los promedios de cada simulación para el periodo de estudio comparándolo con los promedios obtenidos con la base de referencia como los diagramas de Taylor que de una manera estadística nos muestran el ajuste de las simulaciones a la realidad observada.

3.1.1 *Índice FD*

En la Figura 3.1 se muestran los valores medios de las diferentes simulaciones y SPAIN para el índice FD en el periodo 1971-2000. En primer lugar, se analiza el patrón descrito por SPAIN, en el cual se puede ver como el mayor número de días con heladas se concentra en la zona de los Pirineos, cordillera Cantábrica, montes de León, sistema Central y sistema Ibérico, con un rango de días comprendido entre 90 y 150. En las zonas costeras de la Península así como en las islas Baleares, se observa el menor número de días con heladas (0-50 días). Cualitativamente las diferentes simulaciones, reflejan un patrón espacial similar al de SPAIN con mayor número de días de helada en las zonas montañosas y menor en la costa. Sin embargo, todas ellas muestran un mayor número de días de heladas que los datos de SPAIN tanto en la submeseta Norte como en la submeseta Sur. Esto es más visible en las simulaciones que consideran el modelo

regional RCA4. En cuanto a los modelos globales las simulaciones que utilizan el modelo MPI son menos frías que las que utilizan los forzamientos de los modelos globales ICHEC y CNRM

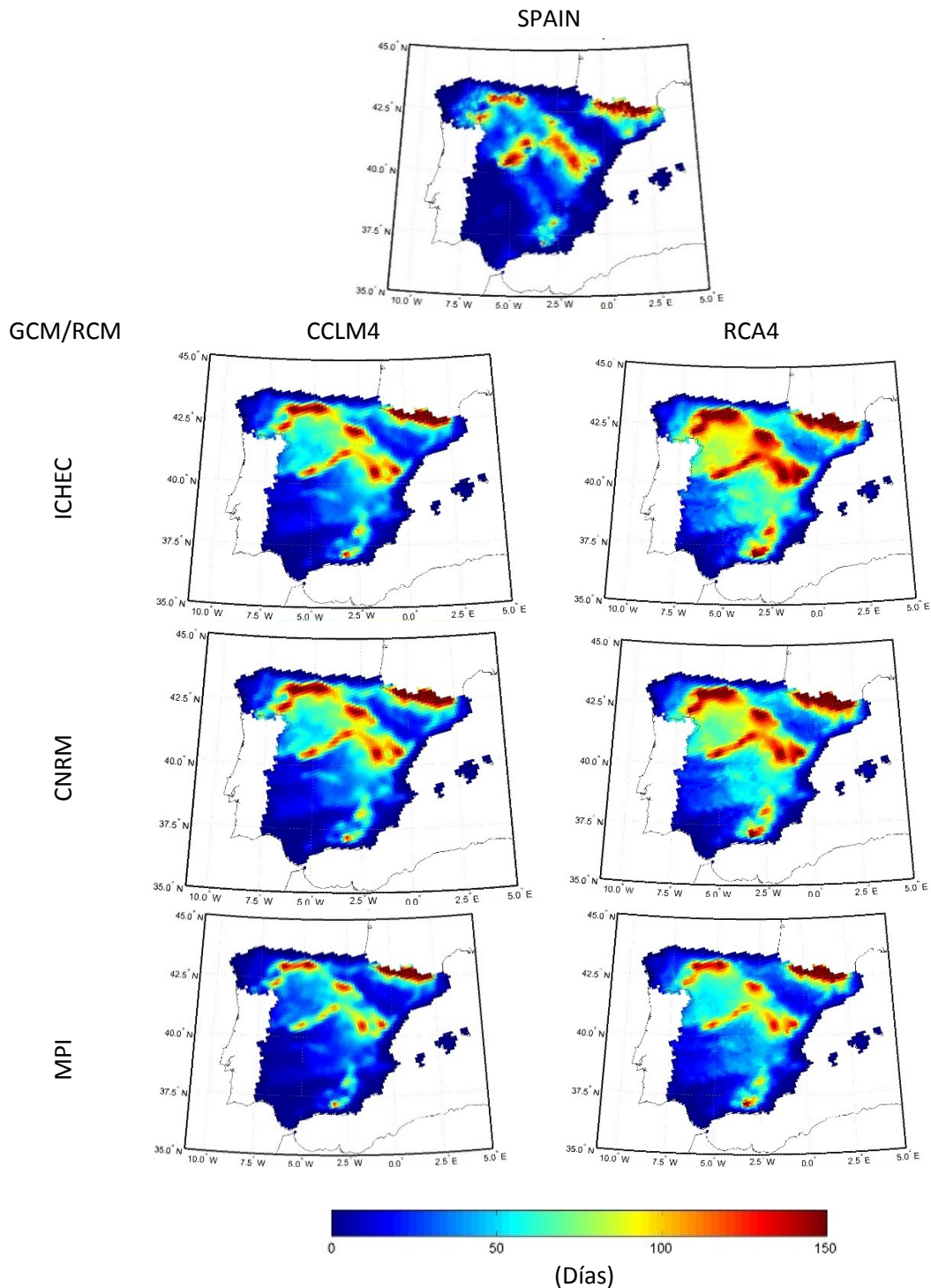


Figura 3.1. Índice FD para el periodo 1971-2000 para SPAIN y las simulaciones consideradas.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de Taylor que permite comprobar de forma objetiva y estadística lo observado en la Figura 3.1. En dicha Figura, se observa que existe una correlación significativa de entre 0.55 y 0.6 entre las simulaciones y las observaciones (SPAIN) lo que nos indica que la variabilidad temporal de las simulaciones

es aceptable. Las simulaciones que se sitúan más próximas a las observaciones (punto gris en el eje X de la Figura 3.2) son aquellas que mejor las reproducen. Se puede observar como hay simulaciones por debajo y por encima de la línea de desviación estándar que marca las observaciones, aunque todas están bastante próximas. Cabe destacar las simulaciones CCLM4-ICHEC (punto azul) y CCLM4-CNRM (punto amarillo) que prácticamente muestran un valor uno. En cuanto al RMS en general, todas las simulaciones presentan errores por debajo de uno.

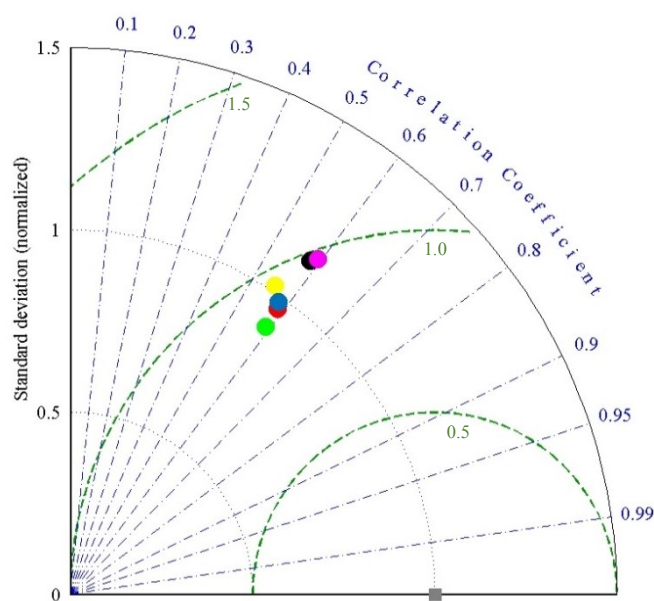


Figura 3.2 Diagrama de Taylor para el índice FD. (RCA4-CNRM negro, RCA4-ICHEC malva, RCA4-MPI rojo, CCLM4-CNRM amarillo, CCLM4-ICHEC azul, CCLM4-MPI verde, SPAIN cuadrado gris).

3.1.2 Índice TX90p

En la Figura 3.3 se muestran los valores medios del percentil 90 de las temperaturas máximas diarias para las seis simulaciones y SPAIN en el periodo 1971-2000. Analizando el patrón descrito por SPAIN, se puede ver como los valores más elevados del percentil 90 se concentran en la zona sur de la Península y a lo largo de la costa mediterránea incluyendo el delta del Ebro y las islas Baleares con un rango comprendido entre 25°C y 30°C. A su vez se observa como dicho percentil va disminuyendo a medida que se asciende hacia la zona norte de la Península, destacando sobretodo puntos de montaña como los montes de León, la cordillera Cantábrica o Pirineos con valores de entre 10°C y 15°C.

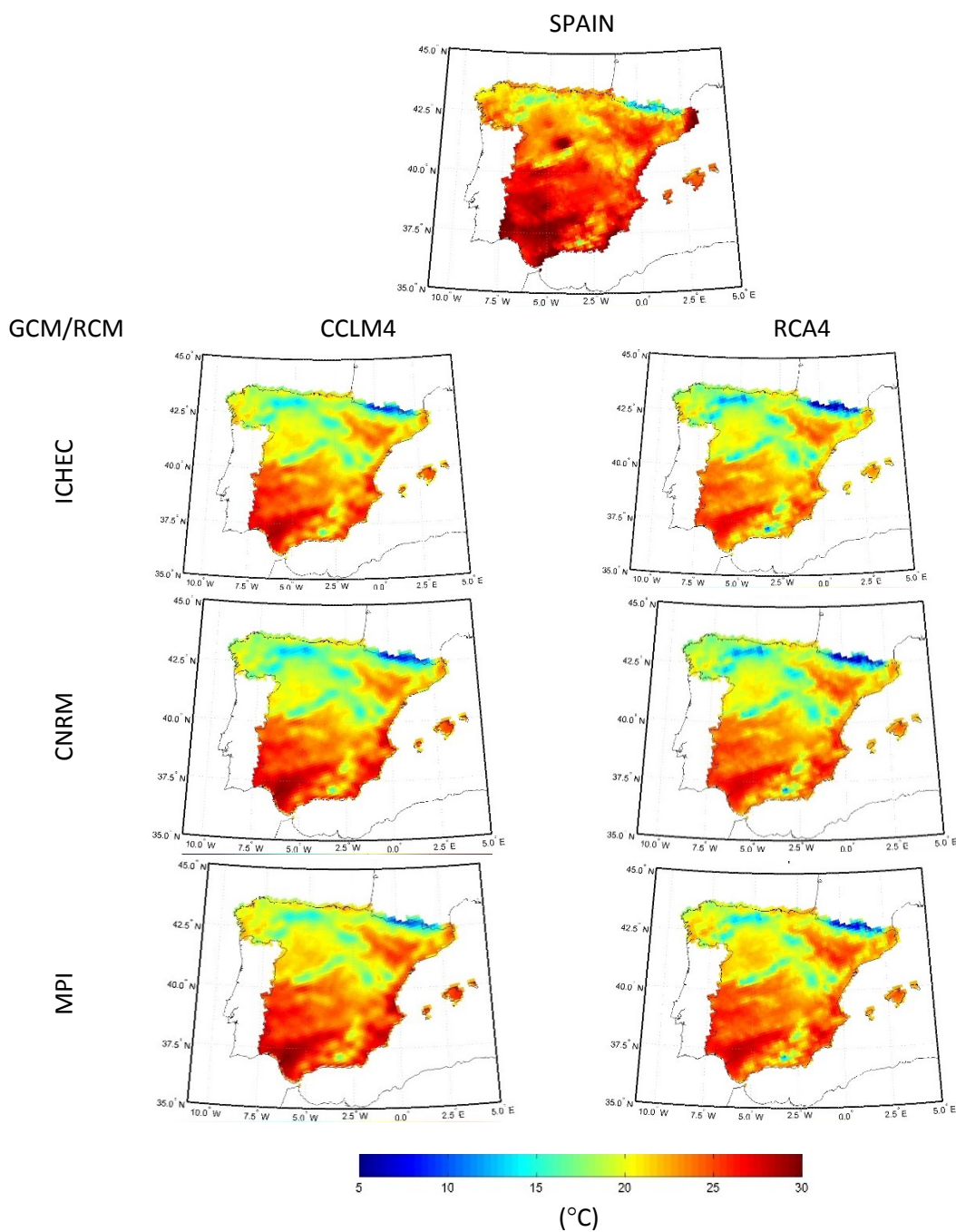


Figura 3.3 Percentil 90 de temperaturas máximas para el periodo 1971-2000 para SPAIN y las simulaciones consideradas.

Al igual que ocurría con el índice de heladas, las simulaciones reflejan cualitativamente el patrón espacial del percentil 90. En las simulaciones se observa que los valores son menores que los obtenidos con la base de datos SPAIN. Para las simulaciones que utilizan el modelo regional CCLM4, no se observan grandes diferencias entre las simulaciones forzadas por los distintos modelos globales. Los días con temperaturas elevadas se concentran al igual que para SPAIN en la zona sur de la Península, puntos de la costa mediterránea y Baleares pero con valores que apenas superan los 25°C. Observando los valores parece que hay alrededor de una subestimación de entrono a

5°C en toda la Península. En el caso de las simulaciones que utilizan el modelo regional RCA4, la subestimación es mayor sobre todo en las zonas montañosas de la mitad norte de la Península.

La Figura 3.4 muestra el diagrama de Taylor correspondiente al percentil 90. La correlación entre las series es muy alta, en torno a 0.95. En general todas las simulaciones representan con bastante exactitud la variabilidad del percentil 90 y presentan un RMS por debajo de 0.5.

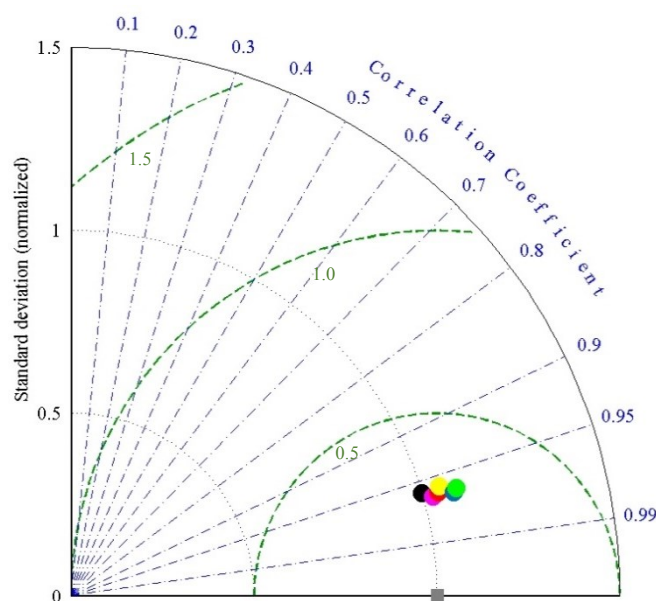


Figura 3.4 Diagrama de Taylor para el índice TX90p (RCA4-CNRM negro, RCA4-ICHEC malva, RCA4-MPI rojo, CCLM4-CNRM amarillo, CCLM4-ICHEC azul, CCLM4-MPI verde, SPAIN cuadrado gris).

3.1.3 Índice R10mm

En la Figura 3.5 se representan los valores medios de SPAIN y las seis simulaciones para el índice R10mm en el periodo 1971-2000. Analizando el patrón descrito por SPAIN, se observa como el mayor número de días donde se producen precipitaciones por encima de 10mm se concentra en la zona noroeste de la Península (costa de Galicia, macizo Galaico, cordillera Cantábrica y Pirineos) con un rango comprendido entre 60 y 80 días. Por lo contrario, el menor número de días con precipitaciones mayores de 10mm se concentra sobre todo en las zonas de la costa mediterránea y Baleares, con valores que apenas superan los 10 días.

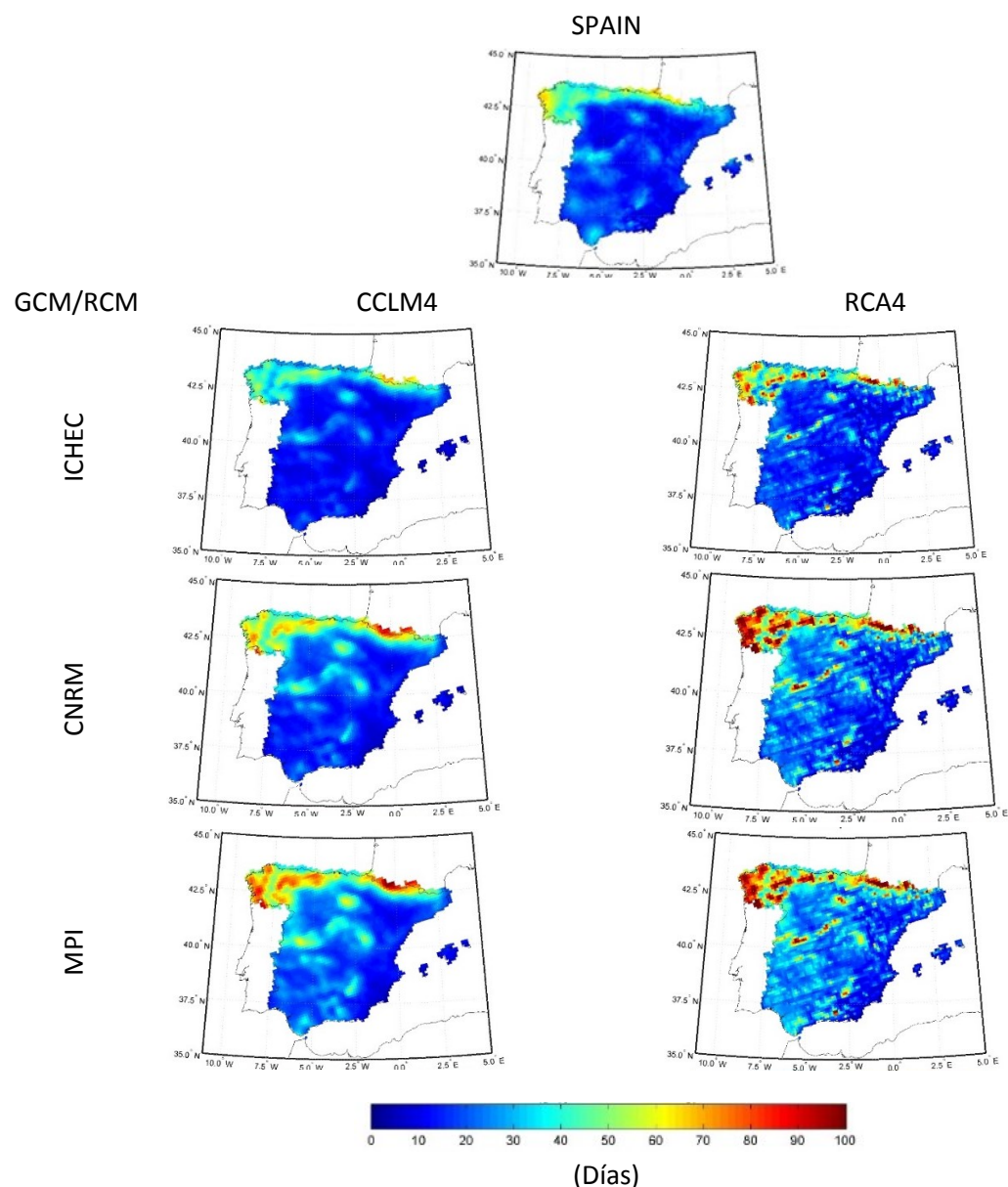


Figura 3.5 Número de días con precipitaciones por encima de 10mm para el periodo 1971-2000 para SPAIN y los modelos empleados.

Las simulaciones en este caso se ven más afectadas que en los índices anteriores por los modelos utilizados. Las simulaciones que utilizan el modelo regional CCLM4, presentan resultados más suavizados y similares, cualitativamente, a los de la base SPAIN. No obstante según el modelo global usado como forzamiento se puede ver que el área sur de la Península se ve caracterizada con un mayor número de días con precipitaciones por encima de 10mm. La simulación con el modelo global ICHEC presenta valores algo más bajos que SPAIN en las zonas más lluviosas pero en el resto de la Península es bastante similar a las observaciones, por el contrario la simulación forzada por el modelo global MPI muestra valores más altos que los dados por SPAIN en prácticamente toda la Península.

En el caso de las simulaciones que utilizan el modelo regional RCA4 los resultados muestran una mayor discrepancia con los datos de SPAIN. Aparecen puntos con valores muy altos sobre todo en las simulaciones que utilizan los forzamientos del modelo CNRM y MPI y se observan inhomogeneidades en el patrón espacial que no son observadas en las representaciones de las otras simulaciones.

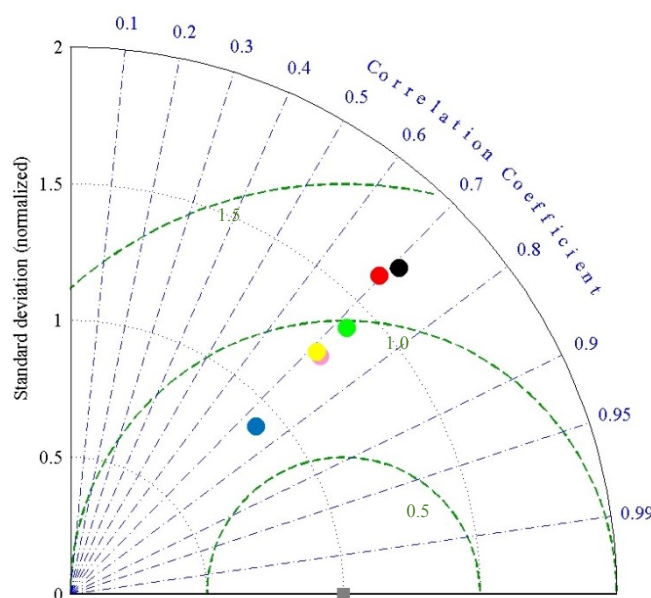


Figura 3.6 Diagrama de Taylor para el índice R10mm. (RCA4-CNRM negro, RCA4-ICHEC malva, RCA4-MPI rojo, CCLM4-CNRM amarillo, CCLM4-ICHEC azul, CCLM4-MPI verde, SPAIN cuadrado gris).

En la Figura 3.6 el diagrama de Taylor correspondiente al índice R10mm corrobora lo observado en la Figura anterior. Entre los modelos y SPAIN la correlación es alrededor de 0.7 por lo que las simulaciones reflejan bastante bien el comportamiento. No obstante, de las seis simulaciones cinco muestran valores de STD por encima de la línea que marca las observaciones. Solo la simulación CCLM4-ICHEC (punto azul) se encuentra próxima a la línea de desviación estándar descrita por el patrón de referencia. En cuanto a los valores de RMS todas las simulaciones superan el valor de 0.5 destacando los modelos RCA4-MPI (punto rojo) y RCA4-CNRM (punto negro) que muestran una RMS superior a 1.

3.1.4 Índice PRCPTOT

En la Figura 3.7 se muestran los valores medios de las diferentes simulaciones y SPAIN para el índice de PRCPTOT en el periodo 1971-2000. Teniendo en cuenta el patrón descrito por SPAIN, se puede situar la mayor precipitación total al noroeste de la Península destacando toda la costa oeste de Galicia, los montes Vascos y los Pirineos con un rango de entre 1400mm a 2000mm y la cordillera Cantábrica y el macizo Galaico con un rango algo inferior de entre 1200mm a 1500mm.

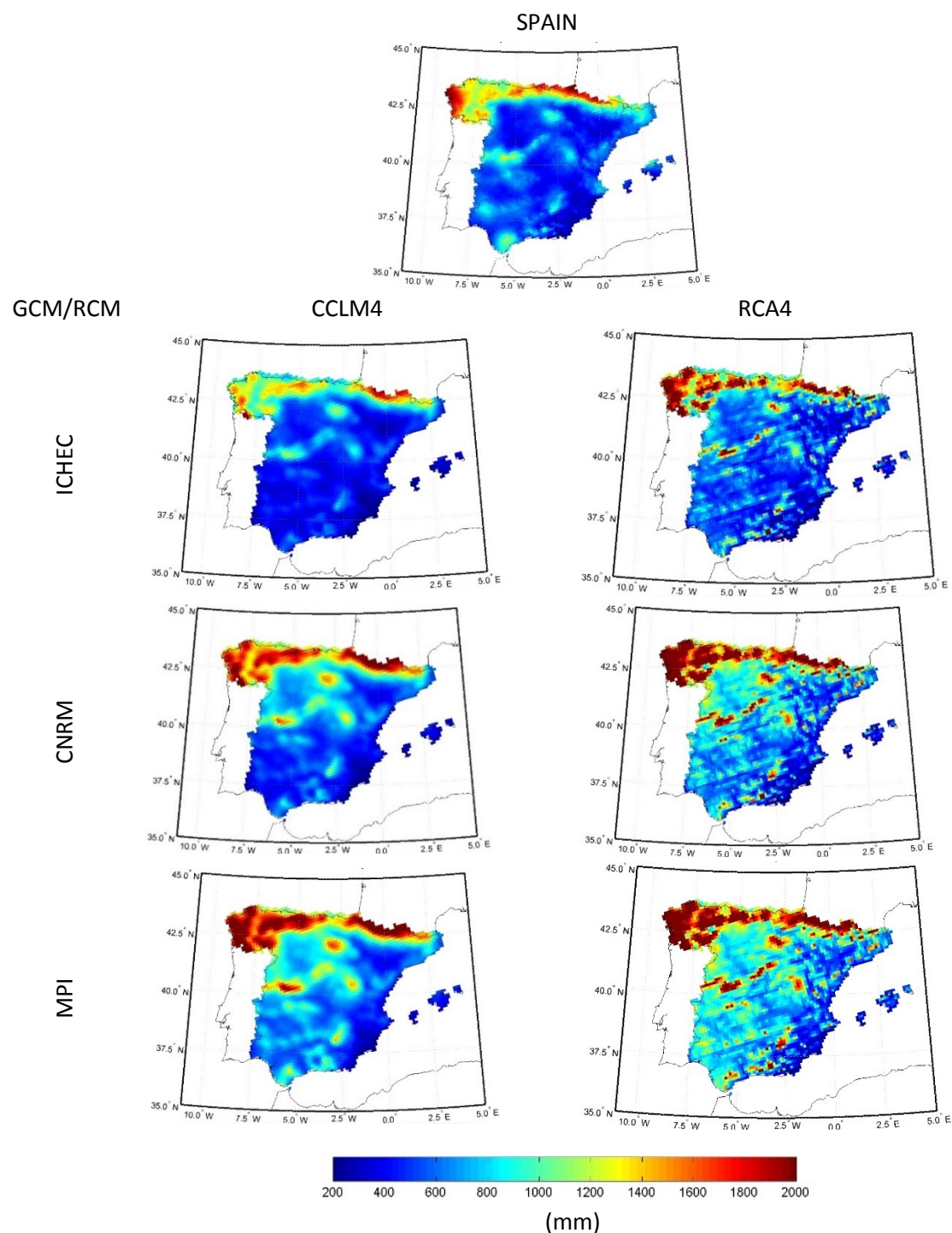


Figura 3.7 Precipitación total en días húmedos para el periodo 1971-2000 para SPAIN y las simulaciones consideradas.

Según lo representado en las Figuras se puede ver como en general las seis simulaciones presentan valores mayores que los datos de SPAIN. De nuevo las simulaciones que consideran el modelo regional CCLM4 muestran valores más homogéneos que las que utilizan el modelo regional RCA4 y también como ocurría en el índice R10mm la simulación que utiliza el modelo global ICHEC se asemeja más a los datos de referencia.

Las simulaciones que utilizan como forzamiento el modelo global MPI son las que mayores valores presentan sobreestimando el índice analizado en toda la Península.

El diagrama de Taylor para dichas simulaciones se muestra en la Figura 3.8. Como ocurría con el índice R10mm la correlación entre las simulaciones y SPAIN se sitúa alrededor de 0.7. Los resultados obtenidos son muy parecidos a los reflejados para el índice R10mm. De nuevo, la simulación que mejor se ajusta a los datos de referencia parece ser la CCLM4-ICHEC (punto azul), ya que es la más próxima al punto de observación con un menor RMS y una STD muy próxima a 1.

Las simulaciones que peor se ajustan a las observaciones son por el contrario la RCA4-CNRM (punto negro) y la RCA4-MPI (punto rojo) con un RMS por encima de 1 y una STD superior a 1.5.

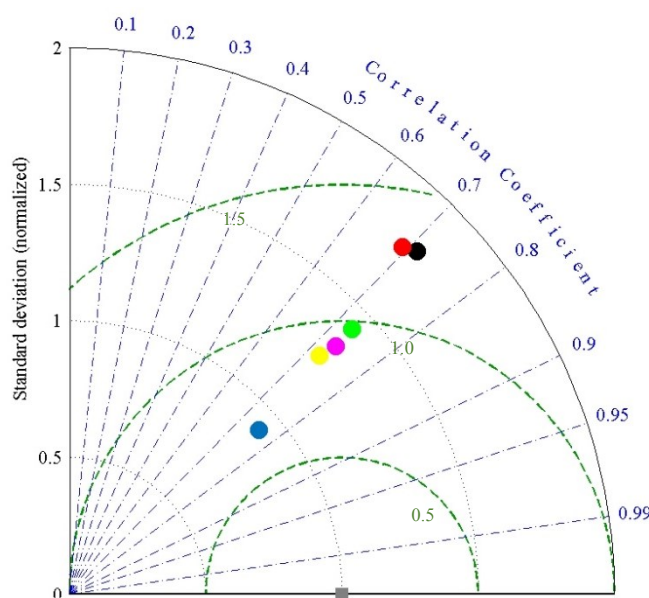


Figura 3.8 Diagrama de Taylor para el índice PRCPTOT. (RCA4-CNRM negro, RCA4-ICHEC malva, RCA4-MPI rojo, CCLM4-CNRM amarillo, CCLM4-ICHEC azul, CCLM4-MPI verde, SPAIN cuadrado gris).

3.2 Proyecciones climáticas para el periodo 2021-2050 en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Una vez evaluadas las simulaciones se ha procedido al análisis de las proyecciones para los cuatro índices considerados en la península Ibérica. El periodo para el que se analizan las proyecciones es 2021-2050 teniendo como referencia el periodo 1971-2000. Las proyecciones se han analizado para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Las Figuras que se muestran en esta sección, son las deltas de cambio que resultan de restar a la media de los datos del periodo 2021-2050, la media del periodo 1971-2000. También se analizará

la tendencia de la evolución temporal del promedio espacial de la España peninsular y Baleares para el periodo 2021-2050 con el test de Mann-Kendall.

Los cuatro índices analizados se dividirán en proyecciones de extremos climáticos de temperatura (FD y TX90p) y precipitación (R10mm y PRCPTOT).

3.2.1 Proyecciones de extremos climáticos de temperatura

3.2.1.1 Índice FD

En la Figura 3.9 se muestran los cambios esperados en el índice de heladas para el escenario RCP4.5 con respecto al periodo 1971-2000. Las simulaciones generadas con el modelo regional RCA4 muestran un mayor descenso en el número de días con temperaturas por debajo de los 0 grados con respecto al presente que las generadas por el modelo regional CCLM4 para el periodo 2021-2050. Estos descensos se concentran en ambos casos en las zonas de montaña y en las dos submesetas. En las zonas costeras, islas Baleares y en las depresiones del Ebro y del Guadalquivir apenas se observan cambios; lo cual es esperable en un contexto de calentamiento global y teniendo en cuenta que en estas regiones para el periodo 1971-2000 apenas se registran días con heladas (Figura 3.1).

En cuanto a los modelos globales las simulaciones con el modelo global ICHEC son las que muestran los mayores descensos. En particular, en la simulación conjunta del modelo ICHEC con el modelo RCA4 los descensos se generalizan a prácticamente toda la Península con valores que superan los quince días salvo en las zonas costeras y depresiones del Ebro y del Guadalquivir que apenas sufren cambios. Por el contrario las simulaciones forzadas con el modelo global CNRM restringen los cambios más importantes (en torno a 10, 15 días) a las zonas montañosas de los Pirineos, cordillera Cantábrica y montes de León así como a puntos localizados de las cordilleras Béticas, sistema Central y sistema Ibérico

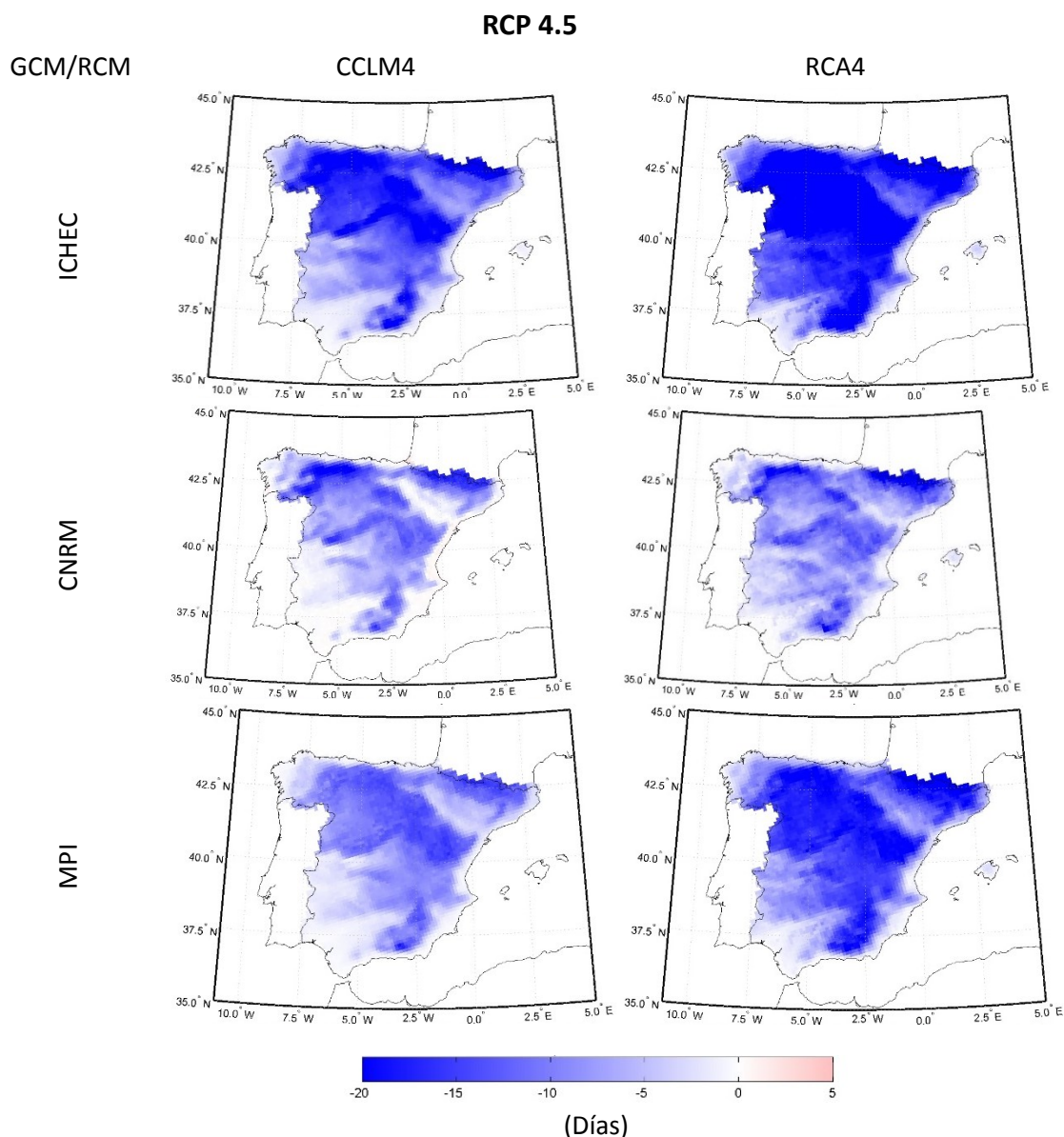


Figura 3.9 Cambios en el número de días con heladas para la Península entre el periodo 2021-2050 y el periodo histórico 1971-2000 de las simulaciones consideradas para el escenario RCP4.5.

Para el escenario RCP8.5 (Figura 3.10) los resultados son similares a los observados en el escenario RCP4.5 con descensos más acusados en las zonas montañosas y submesetas. Es de destacar que en este escenario y en las simulaciones forzadas por los modelos CNRM y MPI, la orografía juega un papel muy importante de forma que los valores más altos de disminución en el número de días con heladas se ven circunscritos a las zonas montañosas. Las simulaciones que utilizan el modelo global ICHEC al igual que ocurría en el escenario RCP4.5 son las que presentan mayores cambios y más generalizados. En la simulación con el modelo regional RCA4, estos cambios, se extienden prácticamente a toda la Península salvo a aquellas regiones en las que ya de por sí la presencia de días con heladas no es común (ver Figura 3.1).

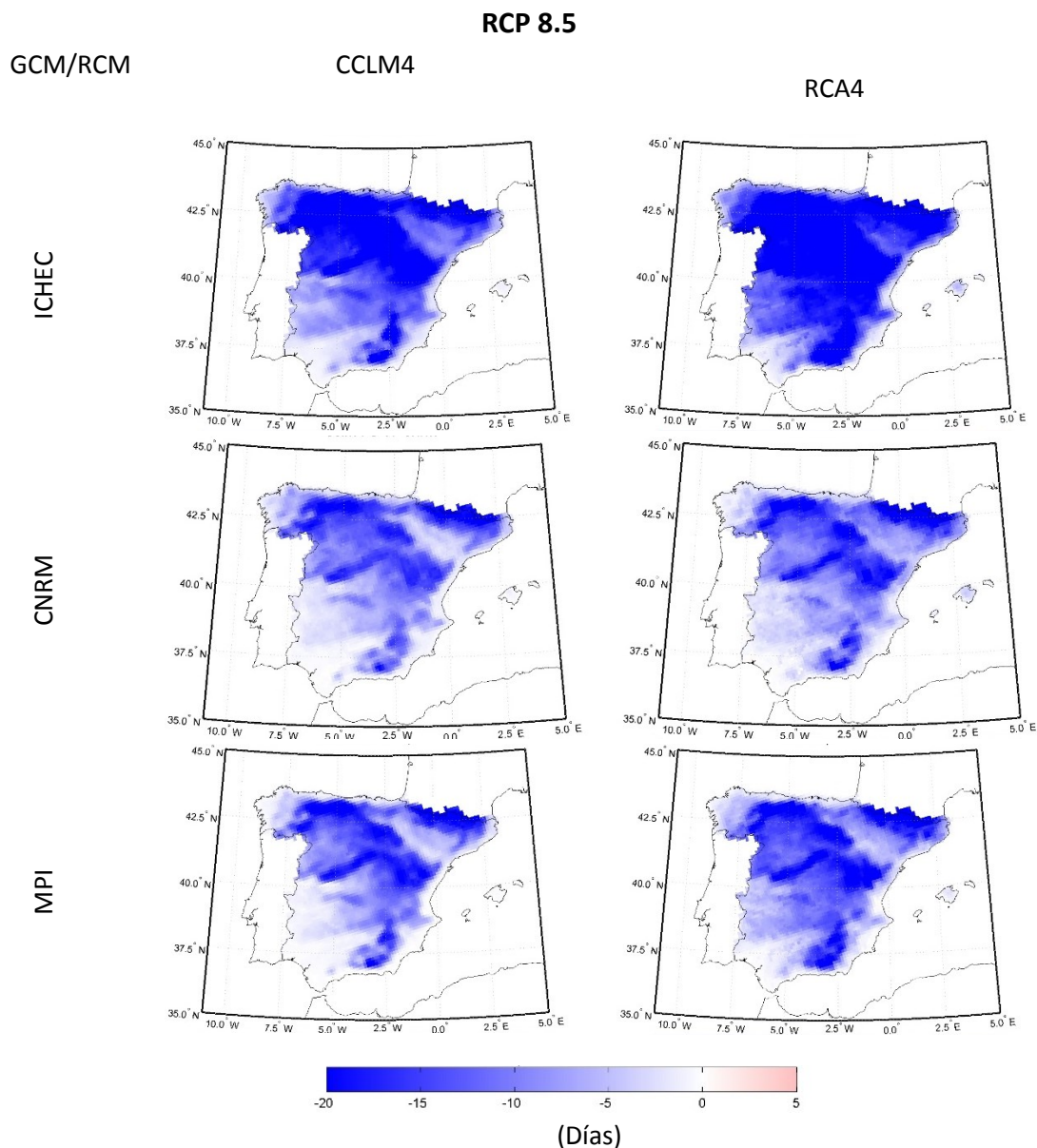


Figura 3.10 Cambios en el número de días con heladas para la Península entre el periodo 2021-2050 y el periodo histórico 1971-2000 de las simulaciones consideradas para el escenario RCP8.5.

Si calculamos la significancia de estos cambios (Figuras 3.9 y 3.10) con el test de Wilcoxon Rank Sum se obtiene que, en todas las simulaciones y en ambos escenarios, los cambios observados para la España peninsular y Baleares en el número de días con heladas es significativo.

Por otro lado, si representamos la evolución del índice FD en el periodo 2021-2050 (Figura 3.11) y calculamos con el test de Mann-Kendall la tendencia esperada en dicho periodo, se ve que existe una disminución promediada para la España peninsular y Baleares de 1.4 días por década para el escenario RCP4.5 y 3.4 días por década para el escenario RCP8.5.

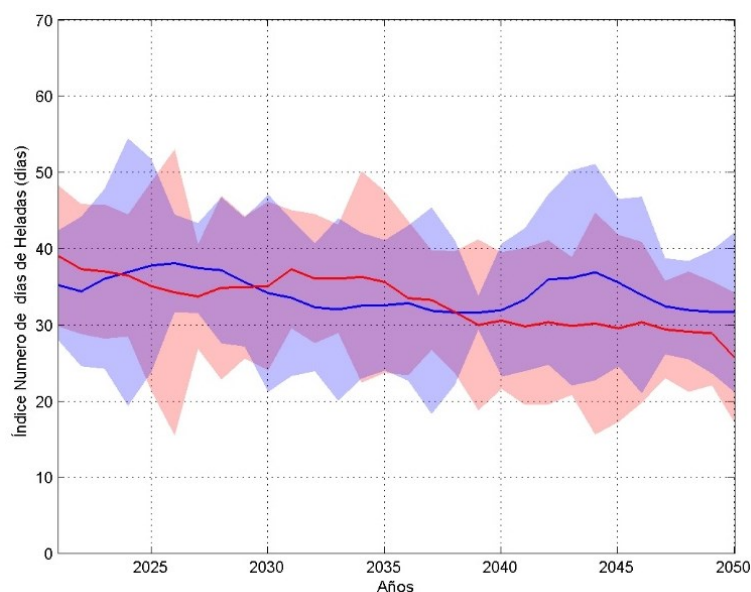
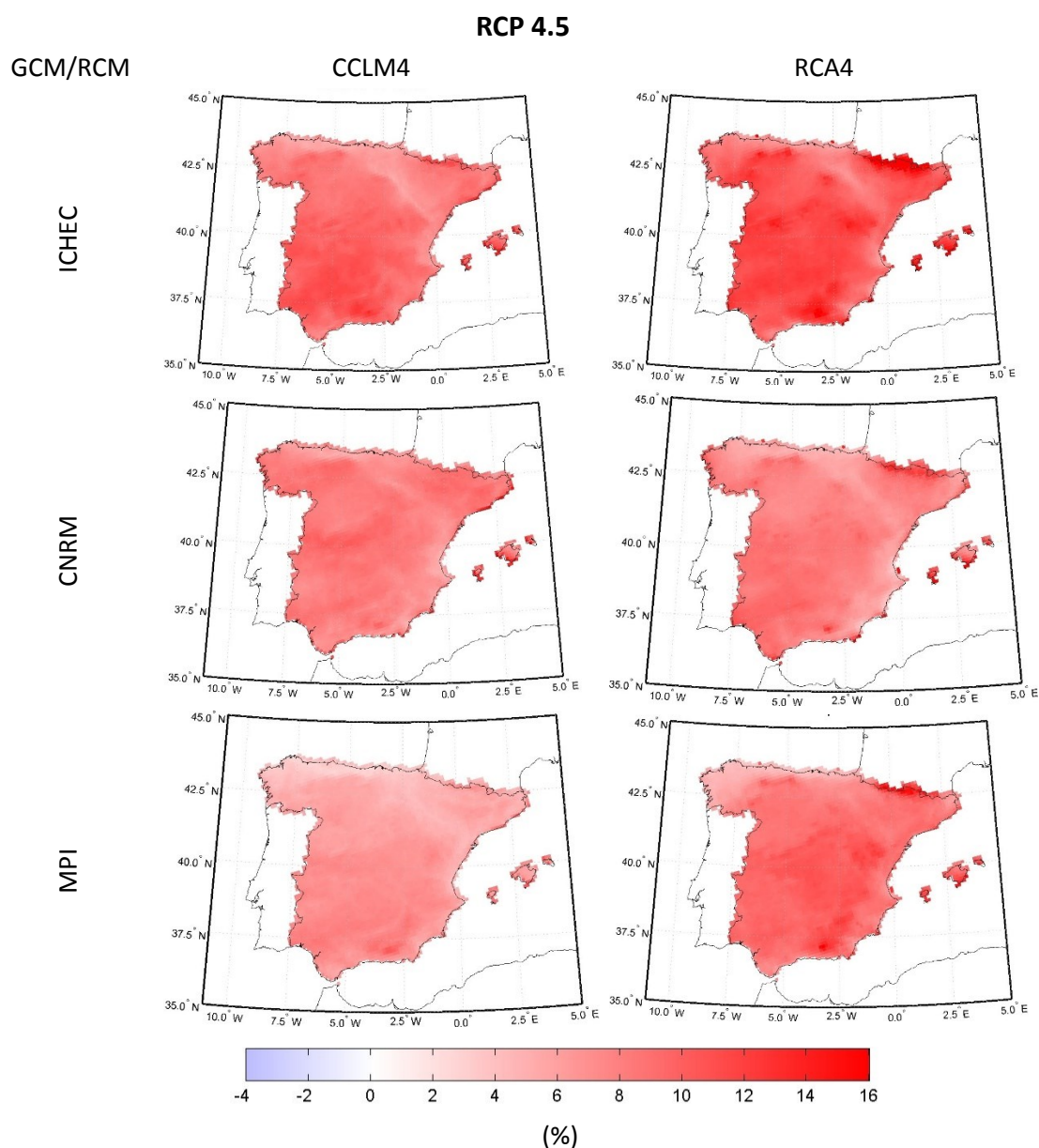


Figura 3.11 Evolución media e incertidumbre del número anual de días de heladas (índice FD) en la España peninsular y Baleares para el periodo 2021-2050. Las zonas sombreadas expresan los márgenes de incertidumbre y corresponden a $\pm$ una desviación típica en torno al valor medio y las líneas continuas a la media de las seis simulaciones. En azul se muestran los resultados para el escenario RCP4.5 y en rojo para el escenario RCP8.5.

3.2.1.2 Índice TX90p

En el análisis del porcentaje de días en los que la temperatura máxima supera el percentil 90 ($TX > 90^{\text{th}}$ percentil) para el periodo 2021-2050 podemos ver que en el escenario RCP4.5 (Figura 3.12) las seis simulaciones predicen un aumento de dicho porcentaje más intenso en las simulaciones que consideran el modelo regional RCA4 que en las simulaciones que consideran el modelo regional CCLM4. En ambos casos ese aumento es generalizado a todo el territorio con valores que rondan un incremento de un 6% y que pueden llegar a un aumento del 14% en las zonas montañosas en las simulaciones más extremas en las que el modelo RCA4 es forzado por los modelos globales ICHEC y MPI. La simulación CCLM4-MPI es la que presenta los menores incrementos que apenas superan un incremento del 2% en el noroeste peninsular y en la submeseta norte.

Como se mencionó anteriormente, las simulaciones con el modelo RCA4 reflejan mayores incrementos. Comparando las tres simulaciones de RCA4, destaca RCA4-ICHEC como la simulación que predice los aumentos más elevados y en la que estos aumentos dibujan con mayor claridad la orografía peninsular con mayores porcentajes en las zonas de montaña, cordillera Cantábrica, montes de León, Pirineos, sistema Central, sierra Morena y cordilleras Béticas. Si se observa la Figura 3.3 se puede ver que en estas zonas se obtenían los menores eran los valores del percentil 90 de temperatura.



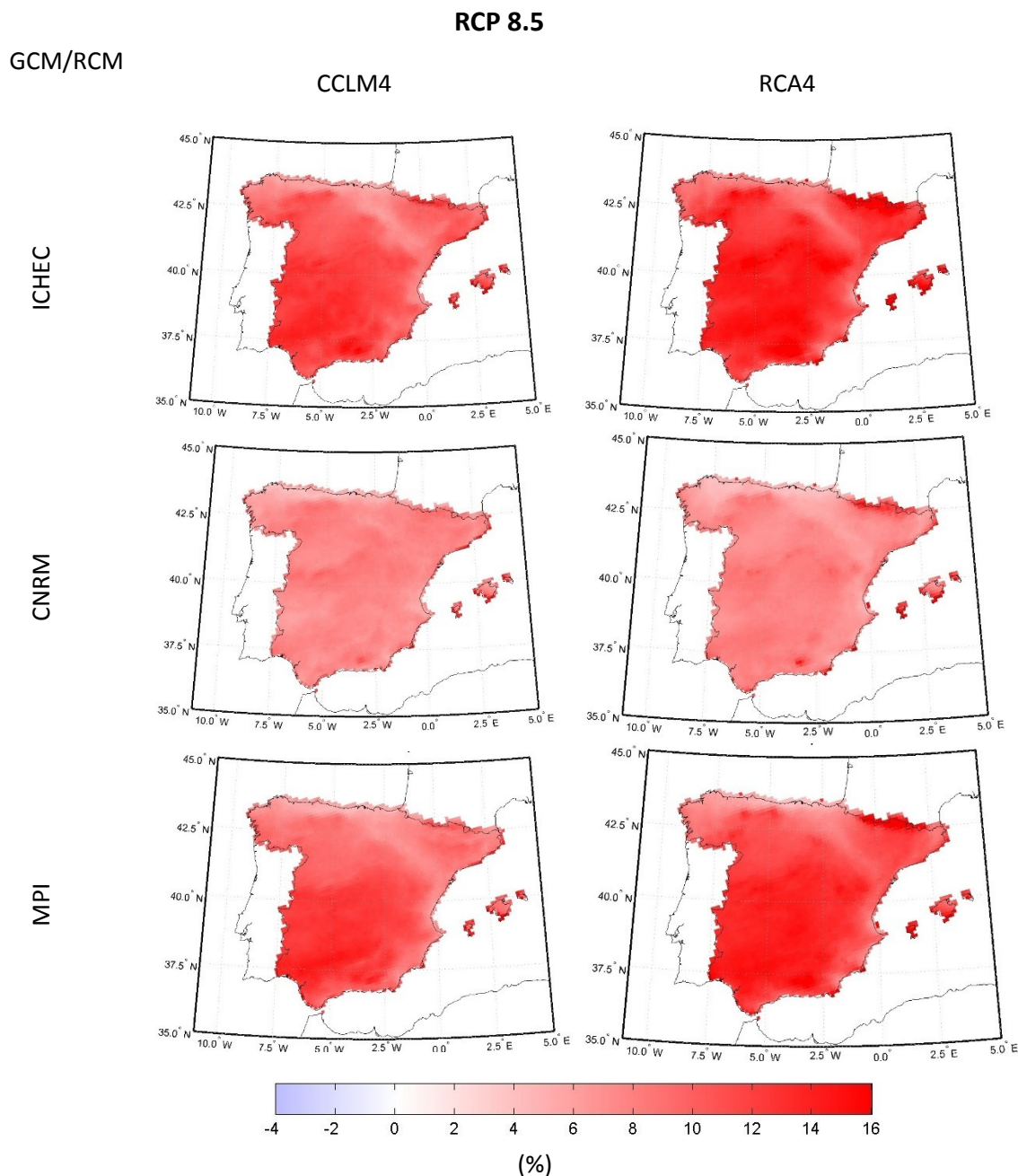


Figura 3.13 Cambios en el porcentaje del número de días con $TX > 90^{th}$ percentil para la Península entre el periodo 2021-2050 y el periodo histórico 1971-2000 de las simulaciones consideradas para el escenario RCP8.5.

Calculando la significancia de los cambios mostrados en las Figuras 3.12 y 3.13 a través del test de Wilcoxon Rank Sum se obtiene, que para todas las simulaciones y en ambos escenarios RCP4.5 y RCP8.5 los cambios observados para la España peninsular y Baleares en el porcentaje de días con $TX > 90^{th}$ percentil, son significativos, tal y como ocurría con el índice FD.

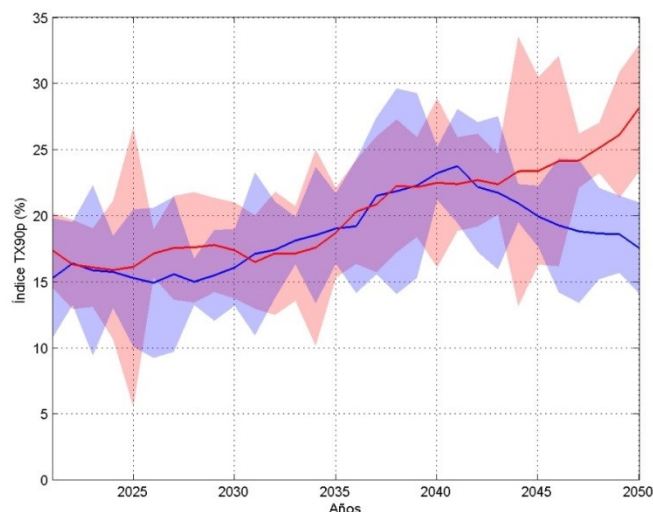


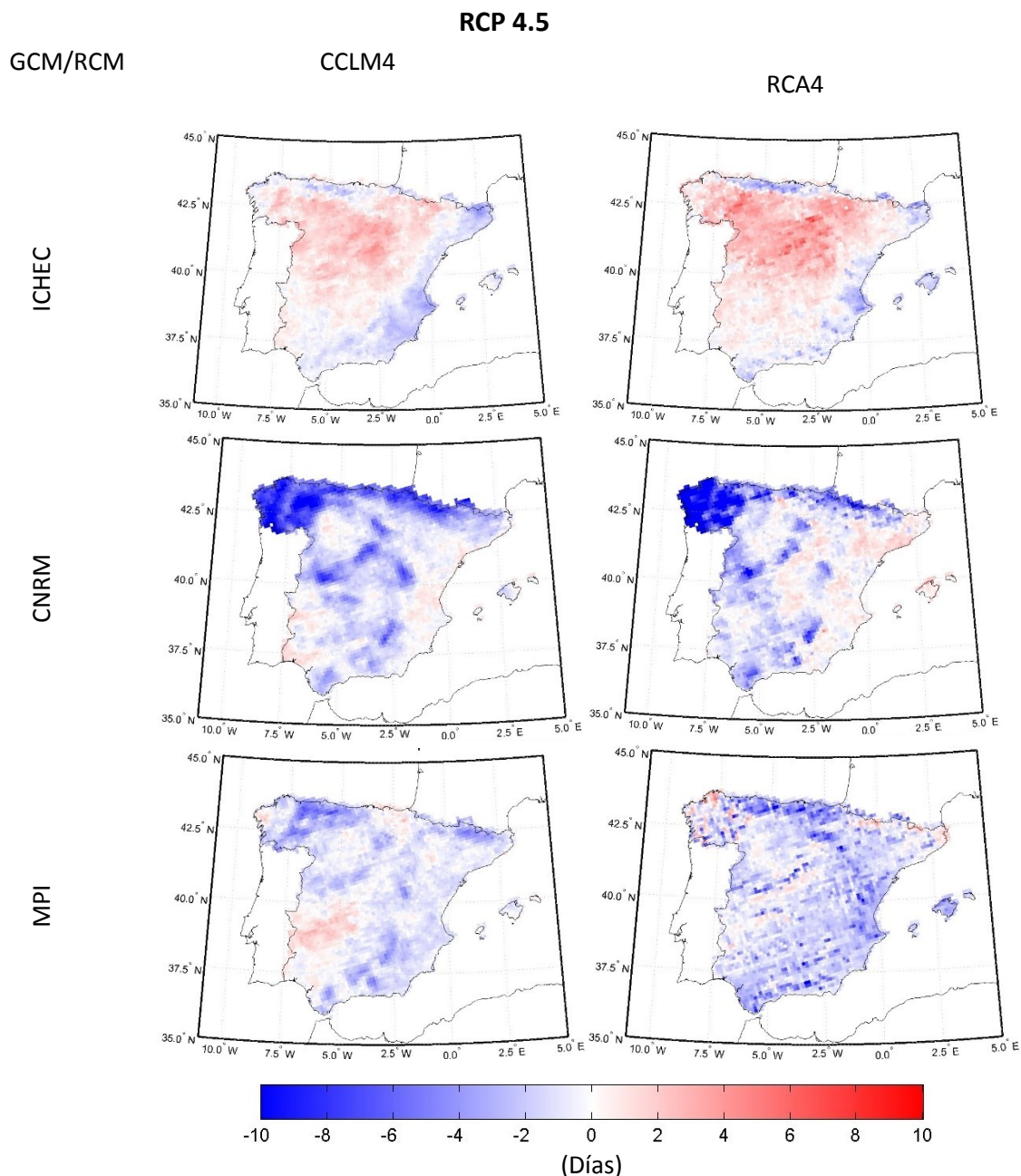
Figura 3.14 Evolución media e incertidumbre del porcentaje de días con TX > 90th percentil en la España peninsular y Baleares para el periodo 2021-2050. Las zonas sombreadas expresan los márgenes de incertidumbre y corresponden a +/- una desviación típica en torno al valor medio y las líneas continuas a la media de las seis simulaciones. En azul se muestran los resultados para el escenario RCP4.5 y en rojo para el escenario RCP8.5.

En la Figura 3.14 se representa la evolución del porcentaje de días con TX > 90th percentil para el periodo 2021-2050. Calculando la tendencia esperada para dicho periodo a través del test de Mann-Kendall, se obtiene un aumento promediado del porcentaje en el número de días que la temperatura máxima supera el percentil 90 del 2.11% por década en el escenario RCP4.5 y del 3.5% por década para el escenario RCP8.5.

3.2.2 Proyecciones de extremos climáticos de precipitación

3.2.2.1 Índice R10mm

La Figura 3.15 muestra los cambios que se esperan en la península Ibérica, para el índice R10mm en el escenario RCP4.5. Las simulaciones generadas con el modelo CCLM4 muestran resultados muy diferentes entre sí según el modelo global que se considere. Así, la simulación CCLM4-CNRM pronostica descensos generalizados en toda la Península, principalmente en la zona norte y noroeste de la Península y en las zonas montañosas con descensos que oscilan entre 8 y 10 días. La simulación CCLM4-ICHEC, predice aumentos en gran parte de la zona central y norte de la Península que oscilan entre los 2 y los 5 días y disminuciones en la costa mediterránea. Por último, la simulación CCLM4-MPI refleja un aumento del número de días con precipitaciones fuertes en áreas de Extremadura, País Vasco y Galicia y disminuciones generalizadas en el resto, pero tanto los aumentos como los descensos son menores que en las otras simulaciones y apenas superan los 3 días de cambio.



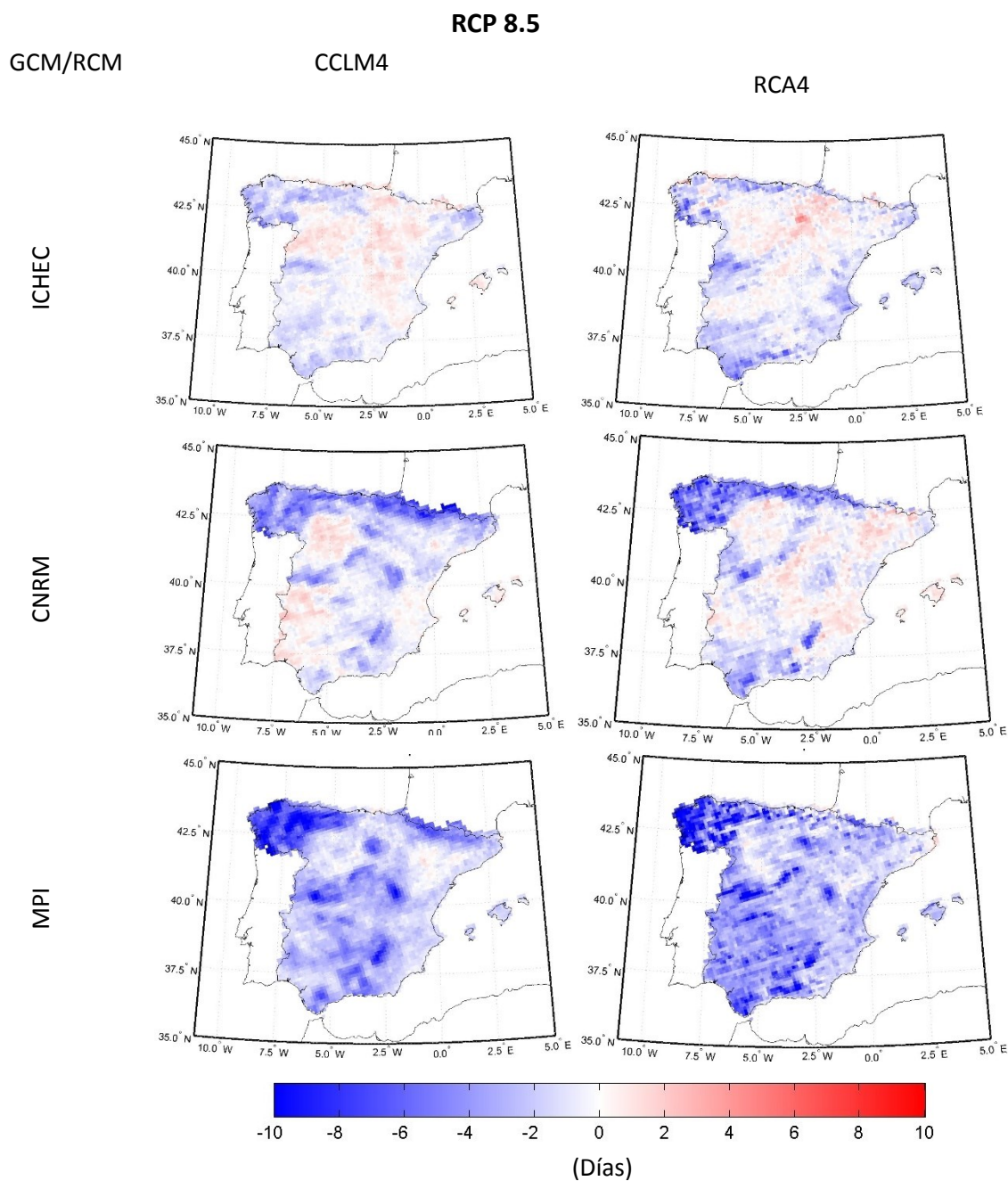


Figura 3.16 Cambios en el número de días con precipitaciones mayores a 10mm para la Península entre el periodo 2021-2050 y el periodo histórico 1971-2000 de las simulaciones consideradas para el escenario RCP8.5.

En la Figura 3.16 se muestran los cambios esperados para el escenario RCP8.5. En este escenario, aunque con ciertos matices, las simulaciones parecen estar de acuerdo en pronosticar un descenso en el número de días con precipitaciones por encima de los 10mm para el área norte y noroeste de la Península así como para las regiones montañosas más importantes de la orografía peninsular. Los aumentos observados con las simulaciones forzadas con los modelos ICHEC y CNRM apenas son superiores a 2 días. Al contrario de lo que ocurría en el escenario RCP4.5, las simulaciones con el modelo MPI muestran en este escenario una fuerte disminución en el número de días con

precipitaciones por encima de los 10mm, que superan los 10 días en Galicia. Las simulaciones que menos cambios predicen son las forzadas con el modelo ICHEC. En este escenario de nuevo las simulaciones que usan el modelo regional RCA4 muestran cambios más intensos, pero similares en su distribución espacial a los del CCLM4.

Si calculamos la significancia de los cambios en el número de días con precipitaciones por encima de 10mm (Figuras 3.15 y 3.16) con El test de Wilcoxon Rank Sum se obtiene que en todas las simulaciones y en ambos escenarios los cambios observados no son significativos.

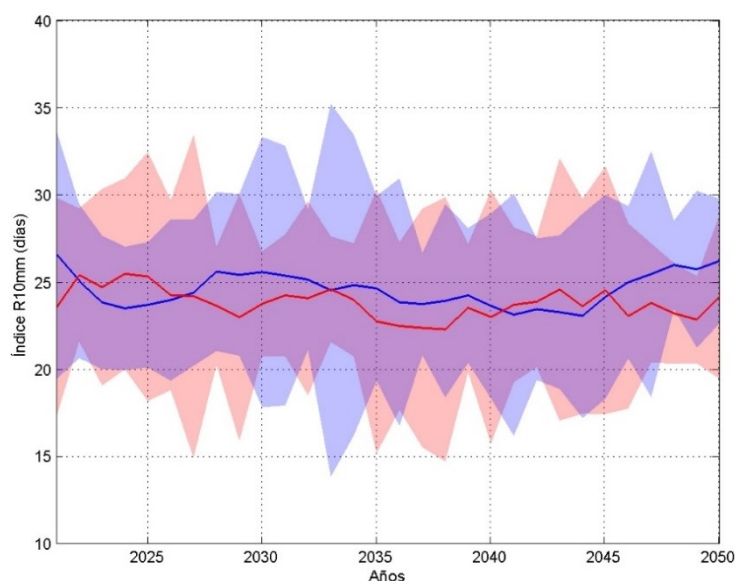
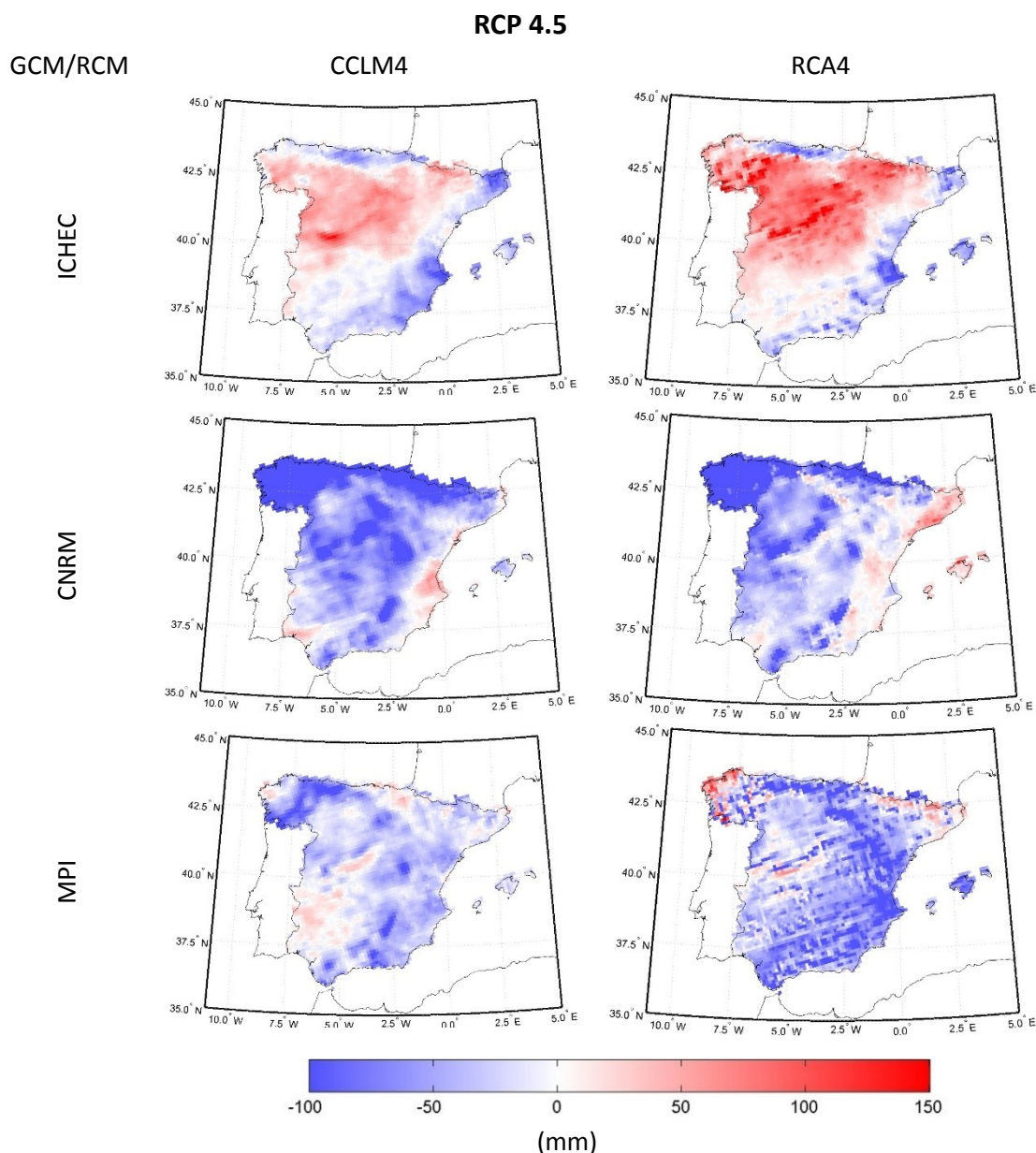


Figura 3.17 Evolución media e incertidumbre del número de días con precipitaciones por encima de 10mm en la España peninsular y Baleares para el periodo 2021-2050. Las zonas sombreadas expresan los márgenes de incertidumbre y corresponden a +/- una desviación típica en torno al valor medio y las líneas continuas a la media de las seis simulaciones. En azul se muestran los resultados para el escenario RCP4.5 y en rojo para el escenario RCP8.5.

Calculando la tendencia para el periodo de 2021-2050 (Figura 3.17) se puede comprobar que no existe una tendencia significativa de aumento o disminución en dicho periodo.

3.2.2.2 Índice PRCPTOT

En la Figura 3.18 se muestran los cambios predichos por las simulaciones para el índice de PRCPTOT en el escenario RCP4.5. Al igual que ocurría con el índice R10mm las predicciones se ven muy influenciadas por el forzamiento de los modelos globales lo que hace que para un mismo modelo regional tengamos diferentes predicciones. Los resultados son muy parecidos para los dos modelos regionales, con patrones espaciales y diferencias en la intensidad de los cambios similares. En general las simulaciones con RCA4 producen mayores cambios.



modelo MPI son disminuciones de entre 50mm y 100mm según el modelo regional (CCLM4 y RCA4, respectivamente) para la costa mediterránea y Baleares.

Las predicciones para el escenario RCP8.5 que se muestran en la Figura 3.19 son más homogéneas que las del escenario RCP4.5 ya que en todas las simulaciones predominan las predicciones de disminuciones de precipitación en prácticamente toda la Península, salvo en pequeñas áreas de alguna simulación donde se muestran aumentos que apenas superarían el 8% de la precipitación total de referencia (periodo 1971-2000).

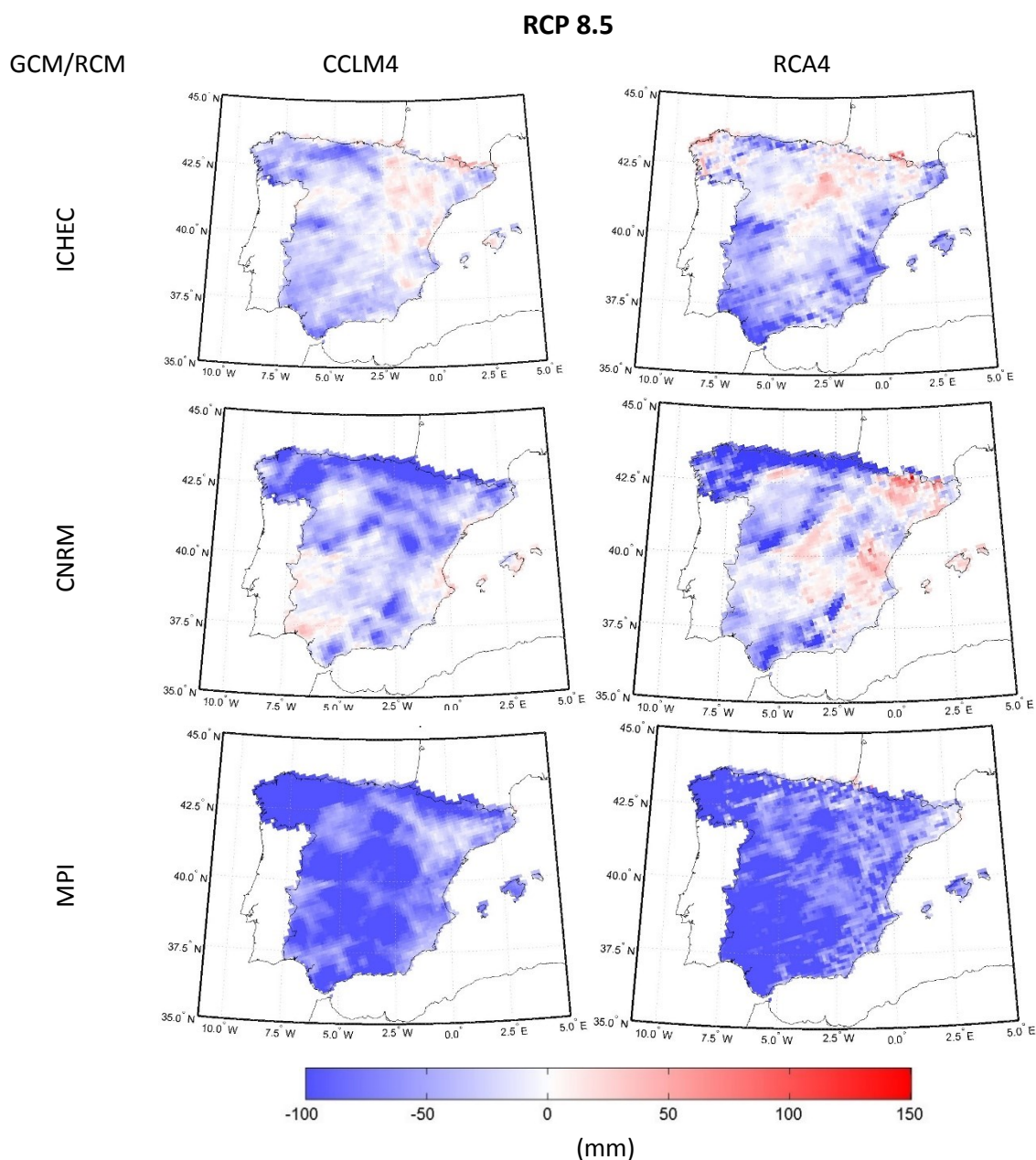


Figura 3.19 Cambios en la precipitación total para la Península entre el periodo 2021-2050 y el periodo histórico 1971-2000 de las simulaciones consideradas para el escenario RCP8.5.

Las simulaciones forzadas con el modelo MPI, tanto en el caso RCA4 como CCLM4, son las que pronostican mayores disminuciones que pueden superar una disminución de entre 80mm y 100mm de precipitación con respecto al periodo de referencia para la mitad sur de la Península y Baleares. Las simulaciones con ICHEC, salvo en la mitad sur de la Península donde se observan disminuciones en torno a 75mm, muestran cambios de ambos signos, esto es positivos o negativos, menores de 50mm. Por último, el modelo CNRM muestra disminuciones de entre 50mm y 100mm para gran parte de la Península salvo en la depresión del Guadalquivir y puntos aislados de la costa valenciana cuando se anida al modelo CCLM4. Estos resultados se ven modificados en su anidamiento con el modelo RCA4. En este caso, las disminuciones son de menor intensidad y los aumentos de precipitación se extienden a gran parte de la costa mediterránea y Baleares alcanzando aumentos cercanos a 100mm.

A la vista de la heterogeneidad de estos resultados es de esperar que al calcular la significancia de los cambios predichos por las diferentes simulaciones (Figuras 3.18 y 3.19) con el test de Wilcoxon Rank Sum se obtenga que en ambos escenarios RCP4.5 y RCP8.5 los cambios observados para la España peninsular y Baleares en precipitación total no son significativos para el periodo 2021-2050. Esto es debido principalmente a que en general estos cambios apenas superan el 20% de cambio en la cantidad de precipitación anual recogida (ver Figura 3.7).

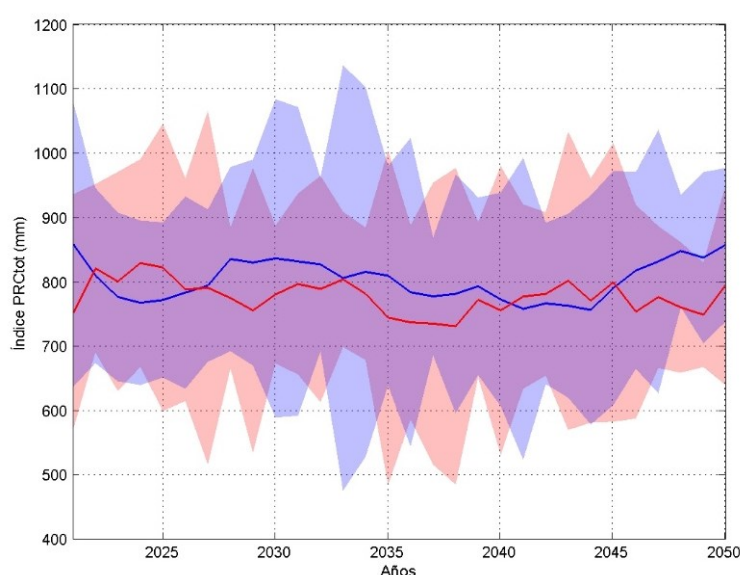


Figura 3.20 Evolución media e incertidumbre de la precipitación total en días húmedos en la España peninsular y Baleares para el periodo 2021-2050. Las zonas sombreadas expresan los márgenes de incertidumbre y corresponden a $\pm$ una desviación típica en torno al valor medio y las líneas continuas a la media de las seis simulaciones. En azul se muestran los resultados para el escenario RCP4.5 y en rojo para el escenario RCP8.5.

Si representamos la evolución del promedio espacial para el área de estudio de la precipitación total anual en el periodo 2021-2050 (Figura 3.20) y calculamos con el test de Mann-Kendall la tendencia esperada para este índice en dicho periodo, se ve que hay

una gran dispersión en los resultados de ambos escenarios (zonas sombreadas) y que las tendencias no son significativas.

4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han evaluado seis simulaciones del proyecto EURO-CORDEX sobre 4 índices de eventos extremos, dos relacionados con la temperatura (FD y TX90p) y dos relacionados con la precipitación (R10mm y PRCPTOT).

En un primer estudio se validaron dichos índices para el periodo 1971-2000, frente a los índices calculados con la base de datos de observación SPAIN. Los resultados obtenidos dan una buena reproducción espacial de los índices de temperatura aunque cuantitativamente las simulaciones parecen dar temperaturas más bajas de las observadas. Esto puede ser debido a los efectos de la orografía en la malla de 11 km.

En cuanto a los índices de precipitación la validación da unos resultados estadísticos más pobres y aunque estas son capaces de mostrar los cambios espaciales de precipitación existentes en el área de estudio, sobreestiman los valores en casi todas las simulaciones salvo en la simulación CCLM4-ICHEC que la subestima.

Después de la evaluación de las bases de datos se procedió a analizar la evolución de los diferentes índices en las seis simulaciones para el periodo 2021-2050, en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Los resultados fueron:

Para los extremos de temperatura:

-FD:

Dentro del escenario RCP4.5, las simulaciones originadas por el modelo regional RCA4 muestran un mayor descenso en el número de días con temperaturas por debajo de los 0°C con respecto al periodo de referencia 1971-2000 que las generadas por el modelo regional CCLM4. El descenso es más acusado en las zonas de montaña aunque el porcentaje de cambio es similar si tenemos en cuenta la disminución con respecto al valor del índice en el periodo de referencia. Los cambios en el escenario RCP8.5 tienen un patrón espacial similar pero de mayor intensidad. Todos los cambios entre el periodo 2021-2050 y el periodo de referencia son significativos y la tendencia del índice FD para el periodo 2021-2050 es significativa y negativa en ambos escenarios.

-TX90p:

En ambos escenarios se observa un incremento de este índice. Dentro del escenario RCP4.5, son las simulaciones generadas por RCA4 y en particular la de RCA4-ICHEC, las que reflejan un mayor aumento de este índice con respecto al periodo de referencia. Dentro del escenario RCP8.5 destacan las simulaciones forzadas por los modelos globales ICHEC y MPI en las que los aumentos llegan a ser del 100% o incluso mayores con respecto al porcentaje del periodo 1971-2000. En el periodo 2021-2050 continua la tendencia positiva de este índice con un aumento que oscila entre el 2.1% por década y el 3.5% por década según el escenario.

Para los extremos de precipitación:

-R10mm:

Con respecto al número de días con precipitaciones superiores a 10mm las simulaciones muestran predicciones muy diferentes. En el escenario RCP4.5, algunas simulaciones muestran aumentos (simulaciones con ICHEC), otras descensos (simulaciones con CNRM) y otras apenas reflejan cambios. En todos los casos los cambios apenas suponen un cambio del 20% con respecto al periodo de referencia. En el escenario RCP8.5 parece haber un mayor acuerdo en la predicción de disminuciones en el número de días con lluvias por encima de los 10mm. En este caso son las simulaciones forzadas con el modelo global MPI las que pronostica mayores cambios aunque tampoco superan el 20% de cambio con respecto al periodo 1971-2000 lo que hace que estos cambios no sean considerados significativos. La evolución de dicho índice tampoco muestra tendencias significativas en el periodo 2021-2050 para ninguno de los escenarios.

-PRCPTOT:

Para el índice PRCPTOT los resultados son similares a los obtenidos en el R10mm. Para el escenario RCP4.5 no hay un acuerdo entre las predicciones de las diferentes simulaciones, de forma que mientras las de ICHEC pronostican aumentos en la zona centro y noroeste de la Península las simuladas con el modelo global CNRM predicen bajadas en toda la zona norte y noroeste. El escenario RCP8.5 presenta predicciones más homogéneas con tendencias negativas pero que apenas representan un cambio del 20% lo que deja estos cambios sin significancia estadística. Lo mismo ocurre para la evolución de este índice en el periodo 2021-2050 en ambos escenarios.

Existen pocos estudios que analicen los índices empleados en este trabajo así como que hagan referencia a los nuevos escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5. En el estudio

Petisco de Lara et al., (2012) se tratan diversos índices como TX90p, duración de las olas de calor (WSD), noches cálidas (TN90p), días de helada (FD), días de lluvia (R1), duración del periodo seco (CDD) y precipitaciones intensas (R95T) para el siglo XXI en la Península. Los resultados coinciden para TX90p y FD con los resultados obtenidos en este trabajo.

Otro ejemplo sería el estudio realizado por Fonseca et al., 2016. Dicho trabajo se centra en los índices de temperatura extrema como por ejemplo TX Max (TXx), TX Min (TXn), TX90p, días con helada (FD), TN Max (TNx), TN Min (TNn) entre otros, para el periodo comprendido entre 1986 y 2005. Los índices TX90p y días de Helada, refleja un aumento para Tx90p y una disminución. Estos resultados también muestran tendencias en la misma línea de las que se obtuvieron en este trabajo.

5 REFERENCIAS

- Alexander, L. V. , Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J. , Gleason, B., Tank, A.M.G.K., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Kumar, K.R., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., Vázquez-Aguirre, J.L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical research, Vol III, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Aupí, V. (2005). Guía del Clima de España. Editorial Omega.
- Bazo Zambrano, J.C. (2014). Tesis Doctoral: Proyecciones Climáticas sobre Perú y su relación con el fenómeno ENSO. Universidad de Vigo.
- Bladé, I., Cacho, I., Díez, Y.C., Gomis, D., Sampériz, P.G., Macho, G.M., Pérez, F.F., Fonseca, B.R., Puebla, C.R, Sánchez, E., Sotillo, G.M., Garcés, B.V., Yáñez, M.V. (2010). Clima en España: Pasado, presente y futuro. Informe de Evaluación del Cambio Climático Regional. Red Temática Clivar-España.
- Fonseca, D., Carvalho, M.J., Marta-Almeida, M., Melo-Gonçalves, Rocha, A. (2016). Recent trends of extreme temperature indices for the Iberian Peninsula. CESAM y departamento de Física de la Universidad de Aveiro, Portugal. Physics and Chemistry of the Earth 94, 66-76.
- Hay, J.E., Easterling, D., Ebi, K.L., Kitoh, A., Parry, M. (2016). Introduction to the special issue: Observed and projected changes in weather and climate extremes. Weather and Climate Extremes 11, 1-3.
- Herrera García, S. (2011). Tesis Doctoral: Desarrollo, validación y aplicaciones de SPAIN02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España. Universidad de Cantabria.
- Hoeppe, P. (2016). Trends in weather related disasters - Consequences for insurers and society. Weather and Climate Extremes 11, 70-79.
- IPCC, (2013). Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. TF Stocker, D. Qin, G-K. Plattner, MMB.

Tignor, SK. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, PM. Midgley, (eds.), Cambridge University Press.

- Karl, T.R., Easterling, D.R. (1999). Climate Extremes: Selected review and future research directions. *Climate Change* 42:309. doi:10.1023/A:1005436904097.
- Morata Gasca, A. (2014). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4.
- Oviedo Torres, B., León Aristizábal, G. (2010). Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de modelos globales. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM. Bogotá.
- Petisco de Lara, S.E., Ramos-Calzado, P., Martín-Herreros, J.M. (2012). Extremos de temperaturas y precipitación para el siglo XXI en España. Cambio climático. Extremos e impactos. Rodríguez Puebla, C., Ceballos Barbancho, A., González Reviriego, Enrique Morán Tejeda y Ascensión Fernández Encinas (Eds.). Publicaciones AEC. Serie A, nº 8. Salamanca, 998 pp. ISBN: 978-84-695-4331-3.
- Porras, G.E.A., Delgado, J.D., Roa, A.O.R., Murcia, J.F.R. (2014). Informe de Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.
- Schoof, J.T., Robeson, S.M. (2016). Projecting changes in regional temperature and precipitation extremes in the United States. *Weather and Climate Extremes* 11, 28-40.
- Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal Geophysical Research* 106, 7183-7192.
- Vargas Zamora, F. (2015). Trabajo final de grado: Análisis de impactos y adaptación al cambio climático en el sistema del río Júcar: Impacto del cambio climático en las sequías meteorológicas, edáficas e hidrológicas en la cuenca del Júcar. Universidad Politécnica de Valencia.

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- CORDEX: www.cordex.org
- MATLAB: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- Grupo de Meteorología de Santander: <http://www.meteo.unican.es/es/datasets/spain02>

- Índices de cambio climático:
http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- Informe del IPCC : https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Test de Wilcoxon Rank Sum:
https://es.mathworks.com/help/stats/ranksum.html?searchHighlight=ranksum&s_tid=doc_srchtile