

TESI DE MÀSTER

Màster

Ingeniería Ambiental

Título

**Análisis de los Extremos Climáticos en Europa para el
Periodo 1950-2100
EC-Earth Project: RCP4.5 & RCP8.5**

Autor

Vicente Pastor Poquet

Tutores

**María Gonçalves Ageitos
José M^a Baldasano Recio**

Especialidad

Modelización y Cambio Climático

Data

Febrero 2014

Agradecimientos

Durante el desarrollo de este Trabajo Final de Máster (TFM), el autor se ha sentido arropado por multitud de personas que le han ayudado, le han enseñado y/o le han acompañado en el camino. Todas ellas han contribuido en mayor o menor medida al desarrollo de éste TFM y, por esto mismo, me gustaría agradecerles su apoyo, tiempo y dedicación, entre muchas otras cosas.

En primer lugar me gustaría mencionar a María Gonçalves, tutora de este trabajo, por su incansable dedicación y paciencia, así como sus correcciones y directrices. María no solo ha contribuido a mejorar la calidad de este trabajo, sino también ha sido fuente de inspiración y aprendizaje durante el todo el proceso de investigación. A José M^a Baldasano, tutor también del trabajo y docente del Máster de Ingeniería Ambiental, por darme la oportunidad de realizar una estancia de colaboración en el Departamento de Ciencias de la Tierra del BSC – departamento que él mismo dirige – entre otras muchas razones. A Santiago Gassó, por toda su ayuda durante este tiempo. A mi compañera y amiga Lola Guerreiro, por toda su dedicación también y ayuda en el proceso de investigación. Y, en general, a todos los integrantes del Departamento de Ciencias de la Tierra del BSC. Sin duda sois un equipo inigualable...

Asimismo, me gustaría dedicar este trabajo a todas aquellas personas que han ido dejando su pequeña huella en el mismo, incluso algunas veces sin pretenderlo. Entre todos ellos, en especial a mis padres, Adela y Vicente, por su ayuda y apoyo, tanto moral como económico durante todo este tiempo. Sin ellos, ni tendría sentido, ni podría haberse llevado a cabo un esfuerzo similar. A Rober y a Encarna. Ellos que me han enseñado tanto con tampoco. Fuente de inspiración y fortaleza. Y, por supuesto, a Sofie Berghmans. Por todas las cosas buenas que me ha dado la oportunidad de aprender...

Por último, no quiero olvidar a todas aquellas personas que, en cierto modo, tampoco hace falta que mencione. A todas ellas que han estado en los malos momentos y, sin duda, están siempre en los buenos. No podría mencionar a todos pero estoy seguro de que cada uno de vosotros sabéis a quien me refiero...

A todos vosotros, Muchas Gracias.

Barcelona, Febrero 2014.

Resumen

En la actualidad, el calentamiento del sistema climático global es inequívoco tal y como lo demuestran multitud de evidencias (p.ej. el incremento de temperatura media, el deshielo polar, aumento del nivel del mar, etc.). Asimismo, existen numerosos ejemplos regionales de sistemas naturales y antropogénicos que están siendo afectados por los cambios en los patrones del clima, en particular en cuanto a la frecuencia, intensidad y persistencia de los eventos extremos. Entre estas regiones, Europa se considera especialmente vulnerable a los cambios en los eventos climáticos extremos (p.ej. olas de calor, precipitación intensa, sequías, etc.). En esta línea, el objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar la capacidad del modelo EC-Earth – un “Earth System Model” basado en el concepto de “Seamless Prediction” – para representar los índices climáticos en Europa durante el periodo 1950-2004 y el análisis de las proyecciones futuras durante el periodo 2006-2100. En este trabajo, un conjunto de 9 índices climáticos – 5 índices de temperatura superficial del aire (TR20, ID0, DTR, WSDI y CSDI) y 4 índices de precipitación diaria (R20, SDII, CDD y CWD) [Véase la Tabla 2 para su definición] – evalúan la frecuencia, intensidad y persistencia de los eventos climáticos extremos. En particular, el análisis de las proyecciones futuras de estos índices podría servir como paso preliminar para discernir sobre las consecuencias socioeconómicas que a su vez podrían asociarse al cambio en los patrones actuales de estos eventos extremos en Europa durante el siglo XXI. Para los propósitos de este trabajo, se analizan los escenarios futuros RCP4.5 y RCP8.5 – los cuales corresponden a un escenario “intermedio” y un escenario “intensivo” en emisiones de GHGs, respectivamente. Los resultados del trabajo sugieren que (1) el EC-Earth representa adecuadamente las tendencias de los índices climáticos de la temperatura superficial del aire derivadas de las observaciones durante el periodo histórico pero presenta algunas desviaciones en cuanto a los índices de precipitación y que (2) el modelo predice cambios substanciales de los mismos índices durante el periodo futuro 2006-2100, en especial con el RCP8.5. Las proyecciones del RCP8.5, sin embargo, podrían presentar inconsistencias atribuidas a una posible desestabilización del modelo. En resumen, el análisis de los índices de temperatura superficial del aire revela que el TR20 y el WSDI podrían aumentar en Europa durante el siglo XXI mientras que el ID0, CSDI y DTR podrían reducirse durante el mismo periodo. En cuanto a los índices de precipitación diaria, el R20 y el SDII se incrementarían mientras que el CDD y el CWD se incrementarían y/o reducirían en un escenario “intermedio” e “intensivo” en emisiones de GHGs, respectivamente. Estos resultados dependen, sin embargo, de la región particular en que se analicen. En este sentido, el análisis zonal de los índices sugiere que las variaciones podrían ser distintas en cuanto a la región mediterránea y la mitad norte de Europa pero también más acusados hacia el oeste del territorio. En concreto, en la región mediterránea – y, en particular, en la Península Ibérica – podrían incrementarse la persistencia de olas de calor y un incremento también de la temperatura, junto con una reducción en los eventos de precipitación persistente. Por su parte, en la región norte se reduciría la intensidad y la persistencia de los eventos considerados “fríos”, mientras que la precipitación se incrementaría tanto en intensidad como en persistencia. En Europa estos resultados sugieren un efecto directo tanto en los ecosistemas como en los ambientes humanos durante el siglo XXI.

Índice de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. Cambio Climático.....	16
1.2. Extremos e Índices Climáticos.....	17
1.3. Proyecciones de los Modelos.....	19
1.4. Escenarios Futuros.....	20
2. OBJETIVO.....	24
3. METODOLOGÍA.....	26
3.1. Selección de Variables y Modelos.....	26
3.2. Preparación de los Datos.....	27
3.3. Índices Climáticos.....	28
3.4. EVALUACIÓN DEL MODELO: Periodo Histórico 1950-2004.....	30
3.4.1. Evaluación Inter-anual de las Variables Climáticas: Promedio Anual y Estacional.....	30
3.4.2. Evaluación Zonal de las Variables Climáticas.....	32
3.4.3. Evaluación Inter-anual de los Índices Climáticos: Promedio Anual.....	33
3.5. ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES: Periodo Futuro 2006-2100 - RCP4.5 y RCP8.5.....	34
3.5.1. Análisis Inter-anual de las Variables Climáticas: Promedio Anual.....	34
3.5.2. Análisis Inter-anual de los Índices Climáticos: Promedio Anual.....	34
3.5.3. Análisis Zonal de los Índices Climáticos.....	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1. EVALUACIÓN DEL MODELO: Periodo Histórico 1950-2004.....	36
4.1.1. EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS.....	36
4.1.1.1. HP – Evaluación Inter-anual de las Variables Climáticas: Promedio Anual.....	37
4.1.1.2. HP – Evaluación Inter-Anual de las Variables Climáticas: Promedio Estacional.....	40
4.1.1.3. HP – Evaluación Zonal de las Variables Climáticas.....	41
4.1.2. EVALUACIÓN DE ÍNDICES CLIMÁTICOS.....	46

4.2. ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES: Periodo Futuro 2006-2100 - RCP4.5 y RCP8.5.....	52
4.2.1. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES CLIMATICAS.....	52
4.2.2. ANÁLISIS DE INDICES CLIMATICOS.....	56
4.2.2.1. FP – Análisis Inter-anual de los Índices Climáticos: Promedio Anual.....	56
4.2.2.2. FP – Análisis Zonal de los Índices Climáticos.....	63
5. CONCLUSIONES.....	72
REFERENCIAS.....	78
ANEXO A: Modelo y Recursos Computacionales.....	82
ANEXO B: Observaciones [E-OBS].....	86
ANEXO C: Resultados Cuantitativos.....	88
ANEXO D: Resultados Gráficos.....	94

Lista de Figuras

- Figura 1: Distribuciones de Probabilidad de la Temperatura y Precipitación Diaria. Cuanto mas alta fuese la línea oscura, mayor probabilidad de ocurrencia de que un clima con estas características. Los extremos se denotan en las áreas coloreadas. Fuente: Zhang, 2011. 17
- Figura 2: Ilustración Esquemática de los forzamientos radiactivos de los RCPs en concordancia con las reglas de extensión desarrolladas por van Vuuren et al. (2008). Las líneas discontinuas indican las posibles extensiones adicionales. 22
- Figura 3: Anomalía de la Temperatura Superficial Media del Aire (2m) (**TG**) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución de la temperatura media en Europa promediada anualmente respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales de los datos. 37
- Figura 4: Anomalía de la Precipitación Diaria (**PPT**) en Europa [mm/día]. El grafico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la precipitación diaria respecto al promedio global de la precipitación diaria para el periodo 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales. 39
- Figura 5: Evaluación Zonal de la Temperatura Superficial Media del Aire (2m) (**TG**) en Europa [Kelvin]. Promedio de la temperatura para el Periodo Histórico 1950-2004. Temperatura media observada (arriba) y diferencia entre las proyecciones del EC-Earth y las observaciones (abajo). 42
- Figura 6: Evaluación Zonal de la Precipitación Diaria (PPT) en Europa [mm/día]. Promedio de la Precipitación Diaria para el Periodo Histórico 1950-2004. Precipitación diaria observada (arriba) y error relativo (%) entre las proyecciones del EC-Earth y las observaciones (abajo). 44
- Figura 7: Anomalía del Tropical Nights Index (**TR20**) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de TR20 respecto al promedio global de TR20 para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 46
- Figura 8: Anomalía del Ice Days Index (**IDO**) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de IDO respecto al promedio global de IDO para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 47
- Figura 9: Anomalía del Diurnal Temperature Range Index (**DTR**) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de DTR respecto al promedio global de DTR para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 47
- Figura 10: Anomalía del Warm Spell Duration Index (WSDI) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de WSDI respecto al promedio global de WSDI para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 48
- Figura 11: Anomalía del Cold Spell Duration Index (**CSDI**) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de CSDI respecto al promedio global de CSDI para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 48
- Figura 12: Anomalía del Strong Precipitation Index (**R20**) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de R20 respecto al promedio global de R20 para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 50
- Figura 13: Anomalía del Simple Daily Intensity Index (**SDII**) en Europa [mm/día]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de SDII respecto al promedio global de SDII para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 50
- Figura 14: Anomalía del Maximum Length of Dry Spell Index (**CDD**) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de CDD respecto al promedio global de CDD para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 51
- Figura 15: Anomalía del Maximum Length of Wet Spell Index (**CWD**) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de CWD respecto al promedio global de CWD para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos. 51
- Figura 16: Anomalía de la Temperatura Superficial Media del Aire (2m) (**TG**) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la temperatura media respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras. 53
- Figura 17: Anomalía de la Precipitación Diaria (PPT) en Europa [mm/día]. Los escenarios futuros

	corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la precipitación diaria respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	55
Figura 18:	Anomalía del Tropical Nights Index (TR20) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del TR20 respecto al promedio global para de TR20 el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	57
Figura 19:	Anomalía del Ice Days Index (IDO) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del IDO respecto al promedio global para de IDO el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	57
Figura 20:	Anomalía del Diurnal Temperature Range Index (DTR) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del DTR respecto al promedio global para de DTR el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	58
Figura 21:	Anomalía del Warm Spell Duration Index (WSDI) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del WSDI respecto al promedio global para de WSDI el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	58
Figura 22:	Anomalía del Cold Spell Duration Index (CSDI) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del CSDI respecto al promedio global para de CSDI el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	59
Figura 23:	Anomalía del Strong Precipitation Index (R20) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del R20 respecto al promedio global para de R20 el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	60
Figura 24:	Anomalía del Simple Daily Intensity Index (SDII) en Europa [mm/día]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del SDII respecto al promedio global para de SDII el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	61
Figura 25:	Anomalía del Maximum Length of Dry Spell Index (CDD) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del CDD respecto al promedio global para de CDD el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	61
Figura 26:	Anomalía del Maximum Length of Wet Spell Index (CWD) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del CWD respecto al promedio global para de CWD el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	62
A. Figura 1:	Componentes del EC-Earth. Fuente: Brandt et al. (2010).	82
A. Figura 2:	Detalle del Supercomputador MareNostrum y sus Componentes Principales.	83
D. Figura 1:	Anomalía de la Temperatura Superficial Máxima del Aire (2m) (TX) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución de la temperatura máxima en Europa promediada anualmente respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales de los datos.	94
D. Figura 2:	Anomalía de la Temperatura Superficial Mínima del Aire (2m) (TN) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución de la temperatura mínima en Europa promediada anualmente respecto al	

	promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales de los datos.	94
D. Figura 3:	Anomalía de la Temperatura Superficial Máxima del Aire (2m) (TX) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la temperatura máxima respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	95
D. Figura 4:	Anomalía de la Temperatura Superficial Mínima del Aire (2m) (TN) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la temperatura mínima respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.	95
D. Figura 5:	Evaluación Zonal de la Temperatura Superficial del Aire (2m) Máxima (TX) y Mínima (TN) en Europa [Kelvin]. Promedio de la temperatura para el periodo histórico 1950-2004. Temperatura observada (arriba) y diferencia entre las proyecciones del EC-Earth y las observaciones (abajo).	96
D. Figura 6:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Frecuencia . Evolución del Tropical Nights Index (TR20) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	97
D. Figura 7:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Frecuencia . Evolución del Tropical Nights Index (TR20) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	98
D. Figura 8:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Frecuencia . Evolución del Ice Days Index (IDO) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	99
D. Figura 9:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Frecuencia . Evolución del Ice Days Index (IDO) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	100
D. Figura 10:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Amplitud . Evolución del Diurnal Temperature Range Index (DTR) [Celsius] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	101
D. Figura 11:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Amplitud . Evolución del Diurnal Temperature Range Index (DTR) [Celsius] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	102
D. Figura 12:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Persistencia . Evolución del Warm Spell Duration Index (WSDI) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	103
D. Figura 13:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Persistencia . Evolución del Warm Spell Duration Index (WSDI) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	104
D. Figura 14:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Persistencia . Evolución del Cold Spell Duration Index (CSDI) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	105
D. Figura 15:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): Persistencia . Evolución del Cold Spell Duration Index (CSDI) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.	106
D. Figura 16:	Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Frecuencia .	

	<i>Evolución del Heavy Precipitation Index (R20) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI. ..</i>	107
D. Figura 17:	<i>Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Frecuencia. Evolución del Heavy Precipitation Index (R20) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI. ..</i>	108
D. Figura 18:	<i>Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Intensidad. Evolución del Simple Daily Intensity Index (SDII) [mm/día] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.</i>	109
D. Figura 19:	<i>Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Intensidad. Evolución del Simple Daily Intensity Index (SDII) [mm/día] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.</i>	110
D. Figura 20:	<i>Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Persistencia. Evolución del Consecutive Dry Days Index (CDD) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.</i>	111
D. Figura 21:	<i>Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Persistencia. Evolución del Consecutive Dry Days Index (CDD) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.</i>	112
D. Figura 22:	<i>Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Persistencia. Evolución del Wet Spell Duration Index (CWD) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.</i>	113
D. Figura 23:	<i>Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: Persistencia. Evolución del Wet Spell Duration Index (CWD) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.</i>	114

Lista de Tablas

Tabla 1: Algunos Impactos Socioeconómicos relacionados con los Extremos Climáticos en Europa. Fuente: Beniston (2007).	19
Tabla 2: Set de Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) y Precipitación diaria utilizados en este trabajo.	29
Tabla 3: Cambios Proyectados en los Índices Climáticos de Temperatura Superficial del Aire (2m) con el Análisis Zonal del Periodo Futuro: 2066-2100.	67
Tabla 4: Cambios Proyectados en los Índices Climáticos de Precipitación Diaria con el Análisis Zonal del Periodo Futuro: 2066-2100.	70
Tabla 5: Correlación de Pearson [PC] – entre ESMs y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004.	88
Tabla 6: Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre ESMs y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C/año] y para la Precipitación en [mm/día/año].	88
Tabla 7: Desviación Estándar [SD]* y Error Relativo [ER] (%) – entre ESMs y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C] y para la Precipitación en [mm/día]. **En el caso de la PPT se presenta la Varianza [VR].	88
Tabla 8: Correlación de Pearson [PC] – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Estacional de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004.	89
Tabla 9: Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Estacional de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C/año] y para la Precipitación en [mm/día/año].	89
Tabla 10: Desviación Estándar [SD]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Estacional de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C] y para la Precipitación en [mm/día]. **En el caso de la PPT se presenta la Varianza [VR].	89
Tabla 11: Correlación de Pearson [PC], Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del DTR [Celsius/año].	90
Tabla 12: Bias (%), Desviación Estándar [SD]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del DTR [Celsius].	90
Tabla 13: Correlación de Pearson [PC], Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del SDII [mm/día/año].	90
Tabla 14: Bias (%), Varianza [VR]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del SDII [mm/día].	90
Tabla 15: Pendiente Lineal Promedio [PP]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C/año] y para la Precipitación en [mm/día/año].	91
Tabla 16: Desviación Estándar [SD]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C] y para la Precipitación en [mm/día]. **En el caso de la PPT se presenta la Varianza [VR].	91
Tabla 17: Pendiente Lineal Promedio [PP]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo	

	<i>Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del DTR [Celsius/año].</i>	91
Tabla 18:	<i>Desviación Estándar [SD]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del DTR [Celsius].</i>	91
Tabla 19:	<i>Diferencia Promedio Esperada [DPE]* – entre los últimos 30 años de las Proyecciones del EC-Earth históricas y futuras – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del DTR [Celsius].</i>	92
Tabla 20:	<i>Pendiente Lineal Promedio [PP]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del SDII [mm/día/año].</i>	92
Tabla 21:	<i>Varianza [VR]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del SDII [mm/día].</i>	92
Tabla 22:	<i>Diferencia Promedio Esperada [DPE]* – entre los últimos 30 años de las Proyecciones del EC-Earth históricas y futuras – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del SDII [mm/día].</i>	92

Abreviaciones

AR4 – The 4th Assessment Report [IPCC, 2007]

AR5 – The 5th Assessment Report (of WGI) [IPCC, 2013]

BSC – Barcelona Supercomputing Center

CDD – Maximum Length of Dry Spell Index

CDO – Climate Data Operators

CWD – Maximum Length of Wet Spell Index

CMIP5 – The 5th Phase of the Coupled Model Intercomparison Project

CNS – Centro Nacional de Supercomputación

CSDI – Cold Spell Duration Index

DJF – Invierno

DPE – Diferencia Promedio Esperada

ER – Error Relativo

ESM – Earth System Model

ETCCDI – The Expert Team on Climate Change Detection and Indices

GCM – Global Climate Model

GPFS – General Parallel File System

ICHEC – The Irish Center for High-End Computing

ID0 – Ice Days Index

IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change

JJA – Verano

MAM – Primavera

MN – Supercomputador MareNostrum

NWPM – Numerical Weather Prediction Model

PC – Correlación de Pearson

PPT – Precipitación Diaria

R20 – Strong Precipitation Index

RCM – Regional Climate Models

RCP – Representative Concentration Pathways

SD – Desviación Estándar

SDII – Simple Daily Intensity Index

SON – Otoño

SPN – Summary for Policymakers [IPCC]

SRES – Special Report on Emission Scenarios

TG – Temperatura Superficial Media del Aire

TN – Temperatura Superficial Mínima del Aire

TR20 – Tropical Nights Index

TX – Temperatura Superficial Máxima del Aire

WGCM – Working Group on Coupled Modeling

WGI – Working Group I: The Physical Science Basis [IPCC, AR4 (2007) y AR5 (2013)]

WGII – Working Group II: Impacts, Adaptation & Vulnerability [IPCC, AR4 (2007)]

WSDI – Warm Spell Duration Index

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Cambio Climático

El cambio climático se define por el “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC) como “el cambio en el estado del clima que puede ser identificado (p.ej. utilizando estadísticos) por cambios en el promedio y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste por un periodo de tiempo prolongado, normalmente décadas o más”. Esta definición se refiere a cualquier cambio temporal – ya sea debido a la variabilidad natural o a la actividad humana. En este sentido, tal y como se menciona en los últimos informes de IPCC [AR4-WGI (2007) y AR5-WGI (2013)], “el calentamiento de clima es inequívoco tal y como lo demuestran las observaciones en las temperaturas del aire y el océano, el deshielo de las cubiertas de hielo y nieve y el aumento del nivel del mar a nivel global”.

Hoy en día, es indiscutible que el desarrollo antropogénico es el responsable del cambio climático “actual” [IPCC, AR4-WGII (2007)]. En este sentido, el forzamiento radiativo – entendido como la influencia que un factor tiene en alterar el balance de energía en el sistema Tierra-Atmosfera – está fuertemente influenciado por los denominados Gases de Efecto Invernadero (en inglés, “Green House Gases” o GHGs) – dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e hidrocarburos halogenados (un grupo de gases que contiene flúor, cloro y/o bromo) – que se emiten particularmente por la actividad humana.

Como resultado, el cuarto informe del IPCC concluye que: “existe evidencia de que multitud de sistemas naturales – físicos y biológicos – están siendo afectados por cambios climáticos regionales, particularmente el incremento de temperatura” [IPCC, AR4-WGII (2007)]. Entre estos sistemas, aquellos más vulnerables se consideran los relacionados con la nieve, el hielo y las superficies congeladas (incluido el permafrost) mientras que el calentamiento de lagos y ríos en muchas regiones modifica la estructura termal de las masas de agua e influye en su calidad. Por lo tanto, emergen también numerosos efectos en cuanto los ambientes humanos consecuencia directa del cambio climático como, por ejemplo, los efectos del incremento de temperatura en relación a las fechas más tempranas de cultivo en primavera y las alteraciones de los bosques debidos a incendios y pestes.

Entre las consecuencias del calentamiento global, el IPCC [AR4-WGI (2007) y AR5-WGI (2013)] corrobora que algunos extremos climáticos se han modificado en frecuencia y/o intensidad durante los últimos 50 años. Y, de acuerdo a las proyecciones de los modelos, los eventos más extremos como las olas de calor y la precipitación “fuerte” o “muy fuerte” podrían llegar a ser más frecuentes en un escenario con cambio climático. Por ejemplo, los ciclones tropicales en el futuro (tifones y huracanes) se intensificarían, con velocidades del viento más elevadas y precipitaciones más intensas derivadas del incremento en la temperatura superficial del mar en los trópicos. Otro ejemplo serían los incrementos proyectados en la cantidad de precipitación en latitudes altas mientras que muchas zonas subtropicales podrían sufrir una reducción en las mismas continuando el patrón observado en las últimas décadas. En esta línea, el objetivo de este trabajo final de máster (TFM) se orienta hacia la evaluación de eventos climáticos en Europa durante la segunda

mitad del siglo XX y el análisis de estos mismos extremos basados en las proyecciones de los modelos climáticos para el siglo XXI.

1.2. Extremos e Índices Climáticos

Siguiendo con la predictibilidad del clima, las variables meteorológicas – como la temperatura y precipitación – son las herramientas indispensables que permiten evaluar la variabilidad climática, entender el sistema a nivel global, así como discernir sobre las posibles consecuencias asociadas al cambio climático – particularmente respecto a los eventos climáticos extremos. En este sentido, de acuerdo al “Intergovernmental Panel on Climate Change” [IPCC, AR4-WGII (2007)], “el incremento observado en la temperatura promedio global desde el siglo XX es altamente probable que afecte a otros aspectos del clima, incluido el calentamiento de los océanos, las temperaturas promedio continentales, los eventos climáticos extremos y los patrones de viento”. Hoy en día, se entiende que estos cambios – sobre todo en cuanto a los eventos climáticos extremos – podrían traducirse en toda una serie de consecuencias socioeconómicas y medioambientales debido al cambio de los patrones de clima actuales. Por lo tanto, es esencial disponer de un conocimiento científico en cuanto a la variabilidad de estos cambios esperados en los eventos extremos con el fin de evaluar el posible riesgo sobre la sociedad, los ecosistemas y las infraestructuras mientras se desarrollan las correspondientes estrategias de adaptación para minimizar los efectos indeseados del cambio climático (Klein et al. 2009).

Dada la distribución de probabilidad de una determinada variable meteorológica (p.ej. temperatura y/o precipitación), un extremo meteorológico – o climático – se entiende como un evento situado en las colas de la distribución. En otras palabras, un evento que podría no ocurrir durante un periodo extenso de tiempo [Figura 1]. En este sentido, muchos índices derivados de los datos diarios de clima se centran en la caracterización de estos extremos en las colas de las distribuciones que podrían ser más relevantes para la sociedad y los sistemas naturales.

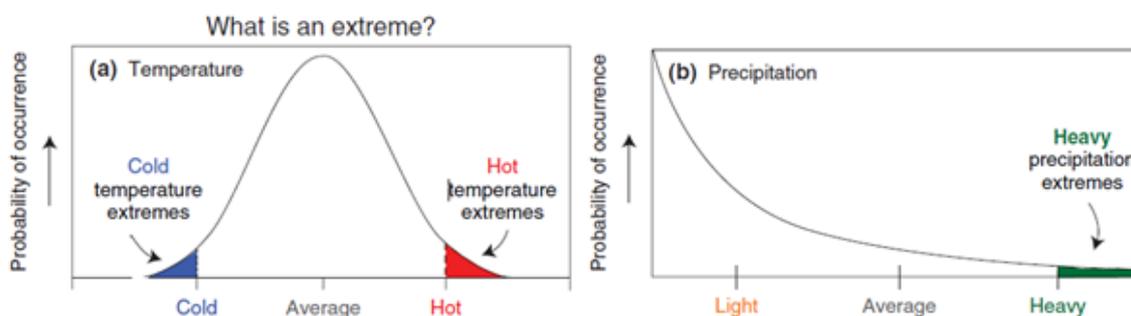


Figura 1: Distribuciones de Probabilidad de la Temperatura y Precipitación Diaria. Cuanto mas alta fuese la línea oscura, mayor probabilidad de ocurrencia de que un clima con estas características. Los extremos se denotan en las áreas coloreadas. Fuente: Zhang, 2011.

Algunos ejemplos de extremos que se caracterizan mediante los índices climáticos serían los cambios en los eventos de precipitación más intensos, el número de días bajo 0°C o la variación en la intensidad de las olas de calor. Con el objetivo de uniformizar el conocimiento en cuanto a los eventos extremos, el “Expert Team on Climate Change Detection and Indices” (ETCCDI) define un

conjunto de 27 índices descriptivos de extremos – internacionalmente aceptados – que incluyen diferentes aspectos de los extremos de temperatura y precipitación que ocurren normalmente varias veces al año. Estos índices incluyen la frecuencia, la intensidad y la persistencia de los extremos climáticos y se utilizan normalmente para monitorizar los cambios en extremos, la evaluación de modelos climáticos y el análisis de las proyecciones futuras. En este sentido, un conjunto de índices se encarga de determinar el promedio – anual o mensual – de la temperatura máxima, mínima o precipitación diaria, otro conjunto calcula el número de días en que se exceden determinados límites y un último conjunto se encargaría de evaluar los periodos de, por ejemplo, sequía, precipitación, altas o bajas temperaturas.

Hoy en día, el IPCC corrobora que “las simulaciones de los modelos climáticos reproducen adecuadamente los patrones observados para los índices de temperatura mientras que las simulaciones para los índices de precipitación son generalmente más limitadas” [IPCC, AR4-WGI (2007) y AR5-WGI (2013)]. Esta afirmación se basa en los estudios disponibles en cuanto a los índices de frecuencia, intensidad y persistencia (p.ej. Zhang et al. 2011). En cuanto a las modificaciones de estos índices, algunos resultados publicados sobre la variabilidad de los extremos durante el periodo histórico mencionan que “se aprecia un claro incremento en el número de días y noches cálidas y una reducciones en el número de días y noches frías lo cual sería consistente con el incremento de la temperatura global media” (Alexander et al. 2006). El IPCC también confirma que “se aprecian incrementos sustanciales en la precipitación intensa en muchas regiones, particularmente en latitudes medias y altas” [IPCC, AR4-WGII (2007)]. Finalmente, el estudio y simulación de los eventos climáticos extremos es de especial importancia en el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación a las posibles consecuencias medioambientales y socioeconómicas asociadas a los mismos.

Europa, por ejemplo, es una región particularmente vulnerable a los cambios en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos como las olas de calor, la precipitación intensa, las sequías y los vendavales [IPCC, AR4-WGII (2007)]. Un ejemplo claro sería la ola de calor que afectó a gran parte de Europa en el verano de 2003 y que fue responsable de miles de muertes en Francia, Italia y España. Además, este evento resaltó la importancia de los problemas que podrían surgir en la hidrología, vegetación, agricultura, así como en el suministro de energía por ejemplo, con la modificación de los eventos climáticos extremos en la región. Por otro lado, algunos estudios publicados sugieren que “existen varios eventos con una alto riesgo de afectar a Europa en las próximas décadas” (Beniston et al. 2007). En particular, el calentamiento de la superficie podría causar el incremento en la frecuencia, intensidad y duración de las olas de calor en esta región mientras que la precipitación podría incrementarse en el norte de Europa mientras que a su vez podría darse una reducción en el sur. La Tabla 1 contiene algunos de los impactos que se relacionarían con los eventos climáticos extremos en Europa.

En resumen, los eventos climáticos extremos podrían afectar a las sociedades alrededor de todo el mundo. Sin embargo, existen numerosas incertidumbres en lo que se refiere a la variabilidad de estos eventos en cuanto a la composición atmosférica y las características regionales particulares. Por lo tanto, a pesar de la creciente evidencia de que el cambio climático podría mostrar consecuencias indeseadas a lo largo y ancho del globo, es necesario proseguir con la investigación

en aras de reducir las incertidumbre que existen todavía hoy en cuanto a las simulaciones de los modelos climáticos y así ayudar a las sociedades en su adaptación en cuando a los cambios medioambientales y sociales esperados en las próximas décadas. En este sentido, este trabajo final de máster (TFM) pretende continuar con el esfuerzo a nivel global para desarrollar las herramientas de modelización con las cuales entender las causas y consecuencias del cambio climático. En este caso concreto, sobre Europa.

Tabla 1: Algunos Impactos Socioeconómicos relacionados con los Eventos Climáticos Extremos en Europa. Fuente: Beniston (2007).

	Health	Agriculture	Forestry	Buildings and infrastructure	Ecosystems
Heat waves	Excess illness and mortality	Animal stress, crop damage	Impaired growth, pests	Increased cooling energy demand	Wildlife stress
Precipitation	Floods, poor water quality and adequacy	Crop failure by drought or excess water	Water stress	Floods, landslides, ground shrinkage, property loss	Soil erosion, water stress
Wind storms	Accidents	Crop damage	Timber loss, insect damage	Building damage	Reduced biodiversity
Wind surges	Floods	Floods and erosion	Floods and erosion	Floods and erosion	Floods and erosion
Adverse combinations	Temperature and moisture	Temperature, precipitation, and wind	Temperature, precipitation, and wind	Wind and floods	Unseasonable temperature, precipitation

1.3. Proyecciones de los Modelos

Los “Global Climate Models” (GCMs) – entendidos como herramientas matemáticas basadas en las leyes físicas (p.ej. conservación de la masa, energía y momento) – son elementos fundamentales para el estudio de la variabilidad del clima. Estos modelos están relacionados con los modelos utilizados normalmente para la predicción meteorológica o “Numerical Weather Prediction Models” (NWP) con los cuales comparten algunas características. Sin embargo, existen también diferencias. Por ejemplo, los NWP se utilizan con una resolución mayor y sus pronósticos pueden ser comprobados diariamente y el modelo actualizado si es necesario. Por su parte, incluso expresados en códigos computacionales precisos e implementados en algunas de las computadoras más potentes del mundo, las restricciones computacionales limitan la resolución que puede obtenerse en las ecuaciones de los GCMs y, por lo tanto, son necesarias algunas aproximaciones – conocidas como la parametrización del modelo. En los GCMs, la parametrización es más importante conforme estos se aproximan a las escalas regionales y/o locales. Finalmente, la única forma de evaluar las proyecciones del modelo es comparando sus proyecciones con las observaciones para el periodo histórico. Sin embargo, la disponibilidad de los datos medidos puntualmente es mucho menor para los GCMs que en el caso de los NWP y con una homogeneidad espacial y temporal también menor. Con todo lo anterior, el concepto de “Seamless Prediction” pretende unir ambas disciplinas en una única estructura con el objetivo de obtener un beneficio adicional en esta sinergia. En concreto, se pretende que los desarrollos en los NWP a escala local y/o regional puedan implementarse en los estudios a nivel global y viceversa (Hazeleger et al., 2010).

Los “Earth System Models” (ESMs) son una versión particular de los GCMs en que se incluyen no solo los componentes atmósfera-océano sino muchos otros como, por ejemplo, la modificación del albedo de la superficie terrestre debido a los cambios en las cubiertas de hielo o vegetación. Por lo tanto, los ESMs son sistemas mucho más complejos – con multitud de componentes ensamblados – con el objetivo de predecir las condiciones climáticas futuras con un alto grado de fidelidad. En la actualidad, los ESMs muestran una creciente capacidad para representar multitud de características climáticas como por ejemplo las distribuciones – a gran escala – de la temperatura atmosférica y oceánica, la precipitación, las corrientes y las cubiertas de hielo [IPCC, AR4-WGI (2007) y AR5-WGI (2013)]. Sin embargo, todavía existen algunas incertidumbres, bias y limitaciones en este tipo de modelos como, por ejemplo, en la representación de las nubes y la precipitación – fenómenos que deben ser consecuentemente parametrizados como se comentaba anteriormente.

La incapacidad de los ESMs para representar los procesos climáticos en áreas específicas o de orografía compleja dio lugar al desarrollo de los “Regional Climate Models” (RCM) – o “downscaling methods” – específicamente diseñados para el estudio a escala regional y/o local del cambio climático. Sin embargo, el desarrollo continuo de los ESMs, mejorando su resolución y representando un mayor número de procesos físicos y biológicos – así como multitud de interacciones consideradas potencialmente importantes en el estudio del clima – favorece su aplicación en escalas espacio-temporales cada vez más pequeñas tal y como requiere el estudio de los eventos climáticos extremos.

Finalmente, las proyecciones históricas de todos estos modelos deben ser validadas para asegurar la representatividad de sus proyecciones futuras. En otras palabras, las proyecciones del modelo para el periodo histórico deben ser exhaustivamente comparadas con las observaciones previamente a discernir entre los posibles cambios que se puedan apreciar en las simulaciones futuras. Este paso es crucial y requiere de un esfuerzo considerable pero, tal y como menciona el IPCC, “cuanto mejor simula un modelo los patrones espaciales y temporales de los ciclos diarios del clima presente, mayor confianza existe de que los procesos importantes que definen el clima se representan adecuadamente” [AR4-WGI (2007) y AR5-WGI (2013)].

1.5. Escenarios Futuros

En contraste con las proyecciones históricas – donde los factores que dominan el clima son relativamente bien conocidos –, las proyecciones futuras del clima requieren de la implementación de forzamientos futuros aproximados que podrían controlar el clima en las próximas décadas o más. En los escenarios presentados en el IPCC “Special Report on Emission Scenarios” (SRES, 2000) [IPCC, AR4-SPN, (2007)], los combustibles fósiles se espera que mantengan su posición dominante en cuanto al mix de suministro energético a nivel global hasta, al menos, el año 2030. Por lo tanto, las emisiones de CO₂ seguirían creciendo en un futuro más o menos cercano. En este sentido, los diferentes escenarios SRES exploran diferentes alternativas de desarrollo – a nivel mundial – teniendo en cuenta un amplio rango de condiciones demográficas, económicas y tecnológicas que se traducirían en última instancia en emisiones de GHGs.

En septiembre de 2008, el “Working Group on Coupled Modeling” (WGCM) acordó un conjunto de experimentos de modelización climática conocidos como “the 5th phase of the Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP5). De estos experimentos deriva el concepto de “Representative Concentration Pathways” (RCPs) que se considera un punto de partida para llevar a cabo el desarrollo de escenarios de cambio climático con los que inicializar las simulaciones de los modelos en toda una gama de investigaciones climáticas. Esencialmente, los RCPs consisten en proyecciones temporales de las concentraciones atmosféricas de GHGs y/o el forzamiento radiativo derivado de las mismas – tanto la trayectoria como el nivel de estabilización. Entre los RCPs se encuentra un escenario “intensivo” en emisiones donde el forzamiento radiativo alcanza aproximadamente 8.5 W/m^2 hacia 2100 y continúa aumentando por algún tiempo (RCP8.5); dos escenarios “intermedios” en que el forzamiento se estabiliza aproximadamente en 6 W/m^2 y 4.5 W/m^2 hacia 2100 (RCP6.0 y RCP4.5, respectivamente); y un escenario donde el forzamiento radiativo describe un pico alrededor de 3 W/m^2 antes de 2100 y, a partir de este punto, decrece (RCP3-PD). Estos escenarios incluyen a su vez la descripción temporal de las concentraciones de GHGs, los aerosoles y los gases químicamente activos, así como el uso aproximado de la superficie cultivable. La Figura 2 representa la evolución de estos escenarios.

En resumen, los RCPs se usan normalmente en la evaluación del cambio climático futuro y como input en los análisis de impacto y vulnerabilidad a los efectos indeseados del clima. En la misma línea, este trabajo final de máster (TFM) pretende obtener conclusiones representativas sobre la posible modificación de los eventos climáticos extremos en Europa durante el siglo XXI respecto a un escenario “intermedio” y un escenario “intensivo” en emisiones de GHGs – escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. En particular, este trabajo concluye que podrían darse cambios significativos en los patrones de los eventos climáticos extremos en Europa durante el siglo XXI – concretamente, asociados a la persistencia de los eventos más “cálidos” y persistentes pero, también al incremento en la intensidad de la precipitación. Las proyecciones revelan además que los efectos serían diferentes en cuanto a la mitad norte del territorio y la cuenca mediterránea y se exacerbaría el efecto de los extremos cálidos y de precipitación en un escenario con emisiones de GHGs relativamente más intensas.

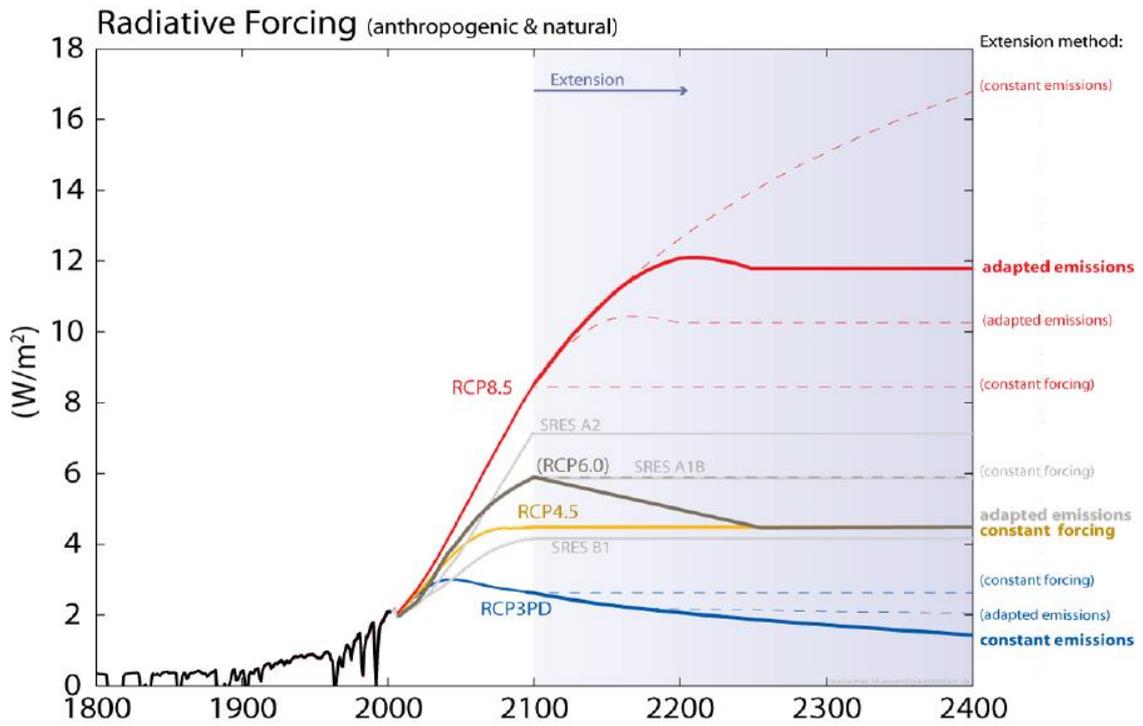


Figura 2: Ilustración Esquemática de los forzamientos radiactivos de los RCPs en concordancia con las reglas de extensión desarrolladas por van Vuuren et al. (2008). Las líneas discontinuas indican las posibles extensiones adicionales.

2. OBJETIVO

En el contexto del cambio climático, el presente Trabajo Final de Máster (TFM) tiene como objetivo principal evaluar la capacidad del modelo EC-Earth – un “Earth System Model” basado en el concepto de “Seamless Prediction” – para representar extremos e índices climáticos. En particular, este trabajo se centra en la evaluación de los índices climáticos en Europa durante el período 1950-2004 y el análisis de las proyecciones de estos índices – basados en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 – durante el período 2006-2100 en la misma región. En conjunto, éste análisis podría servir como punto de partida para el estudio de las consecuencias socioeconómicas que, a su vez, podrían derivarse de la variación en la frecuencia, intensidad y persistencia de los eventos climáticos extremos en Europa durante el siglo XXI.

Con este objetivo, el trabajo aquí presentado continúa con el esfuerzo a nivel global para entender la variabilidad del sistema climático y llevar a cabo el desarrollo de las herramientas de modelización en cuyas proyecciones puedan basarse las estrategias de adaptación y mitigación a las consecuencias indeseadas del cambio climático en el medio ambiente y las comunidades humanas.

Para lograr el objetivo indicado:

- 1) Se presenta una evaluación de la capacidad del modelo EC-Earth para representar las variables climáticas y los índices de temperatura superficial del aire (2m) y de precipitación diaria en Europa durante la segunda mitad del siglo XX – período 1950-2004 – y,
- 2) Se lleva a cabo un análisis de las proyecciones futuras del modelo para las mismas variables e índices climáticos durante el siglo XXI – período 2006-2100 – en relación a los dos escenarios de emisiones futuros, RCP4.5 y RCP8.5, incluidos en el último informe del IPCC [A5R-WGI, (2013)].

3. METODOLOGÍA

A lo largo de esta sección se presenta la metodología empleada para evaluar la descripción de los índices climáticos por parte del modelo EC-Earth. En concreto, se recogen los datos de las variables meteorológicas temperatura superficial (a 2 metros de la superficie) y precipitación diaria – tanto del modelo como de las observaciones –, los datos se adaptan para permitir la comparación directa con las observaciones y se implementan los índices sobre los datos diarios de las variables climáticas. Una vez representados los datos e implementados los estadísticos, se analizan tanto los resultados para los índices como para las variables meteorológicas. Cabe mencionar que, los datos del modelo EC-Earth (BSC) se comparan en algunos casos con los resultados de otros grupos y modelos climáticos similares.

3.1. Selección de Variables y Modelos

Existen diversas variables meteorológicas que podrían estudiarse en cuanto a las proyecciones de los modelos climáticos sin embargo, la temperatura superficial del aire (medida o proyectada normalmente a 2 metros sobre la superficie) – tanto media, como máxima y mínima – y la precipitación diaria son las dos variables que se utilizan para los propósitos de este trabajo. La razón reside principalmente en las ventajas que presentan estas variables en cuanto a la descripción del clima (p.ej. ambas condicionan fuertemente el clima, son las variables que mejor representan los modelos climáticos, se poseen datos medidos durante periodos más extensos, etc.). En concreto, los datos que se utilizan en este análisis se recogieron de dos fuentes principales: el CMIP5 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) para los datos del modelo y el E-OBS (<http://www.ecad.eu>) para los datos de las observaciones en Europa.

Por otro lado, con el fin analizar las proyecciones del modelo EC-Earth – obtenidas por el grupo BSC [Véase Anexo A, para la Descripción del Modelo y los Recursos Computacionales empleados] – se recogieron los resultados de otros modelos que permitiesen la comparación con proyecciones similares. En particular, se eligieron los datos del EC-Earth del grupo ICHEC y los datos del modelo CanESM-2 entre muchos otros conjuntos de datos similares. La razón requiere de una breve explicación. Entre el conjunto de experimentos derivados de “the 5th phase of the Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP5), un ensemble – o conjunto de experimentos – se define por tres factores principales ($r<N> I<M> p<L>$); donde N se corresponde a las condiciones iniciales implementadas, M representa el método de inicialización y L la parametrización del modelo. Por lo tanto, un ensemble diferente permitiría la evaluación de estos factores. Este trabajo, sin embargo, se centra en el ensemble utilizado por el EC-Earth del grupo BSC (r5i1p1) con el fin de simplificar el análisis global. En esta línea, los resultados del EC-Earth del “Irish Center for High-End Computing” (ICHEC) se eligieron con el fin de evaluar las diferencias en las condiciones iniciales introducidas en el modelo (ensemble r5i1p1 vs. r14i1p1) y el “Canadian Earth System Model” (CanESM-2), del “Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis” (CCCMA), para evaluar las diferencias en las proyecciones del EC-Earth con modelos de una complejidad similar – ya que ambos comparten el mismo ensemble (r5i1p1). Finalmente, el EC-Earth (ICHEC) y el CanESM-2 simulan el RCP4.5 y el RCP8.5 al igual que el EC-Earth del BSC.

3.2. Preparación de los Datos

Una vez recogidos los ficheros con los datos “en bruto” de temperatura y precipitación, se adaptaron los mismos para los propósitos de este trabajo. Esta adaptación se lleva a cabo mediante códigos computacionales en “Shell Scripting Language de Linux” que se modifican dependiendo del propósito del análisis en cada caso. En estos scripts se incluyen los comandos CDO – disponibles para utilizarse en ciencias atmosféricas – y se implementaban en computadoras Linux. En concreto, los principales pasos consisten en: Primero, seleccionar una zona que coincida con aquella definida por las observaciones [E-OBS] (en este caso, el territorio comprendido en 25N-75Nx40W-75E) [Véase Anexo B, para la descripción del E-OBS]. Seguidamente la malla del modelo – más gruesa – se adapta a la malla de las observaciones – más fina. Posteriormente, se eliminan las superficies correspondientes a los cuerpos de agua que se encuentran en esta región con el fin de obtener dos conjuntos de datos directamente comparables (ya que las observaciones no contemplan las masas de agua). Finalmente, los datos se adaptan en función del análisis temporal o zonal, y se preparan para su implementación en hojas de cálculo Excel y/o en el programa de visualización de datos NCL – basado en un lenguaje computacional específicamente diseñado para llevar a cabo análisis de datos. Los análisis se llevaron a cabo tanto para las variables meteorológicas como para los índices derivados de las mismas. Por lo tanto, en el caso de los índices climáticos sería necesario incluir otro paso intermedio de adaptación de los datos originales de las variables meteorológicas.

Entre los distintos pasos de preparación de los datos, la adaptación progresiva de los resultados de los ESMs a la malla del E-OBS es crucial. En este paso, las mallas de los ESMs se someten a un “remapeo” mediante una interpolación bilineal (para una descripción detallada consúltese Jones et al. 1997). En particular, los resultados del EC-Earth originales, que se obtienen en una malla Gaussiana de 1.125°, se adaptan a una malla Lat-Lon de 0.5° (una reducción aproximada del 60%).

Los datos de precipitación, por su parte, se adaptan también para ser representados en milímetros y permitir una comparación directa con las observaciones. La razón es que la precipitación se mide normalmente mediante medidas discretas, mientras que los modelos obtienen la precipitación como un flujo ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) a través de la ley de conservación de la masa. Sin embargo, ambas variables tienen las mismas dimensiones y, por lo tanto, multiplicando los resultados del modelo por un factor de 86.400, los datos serían directamente comparables.

Finalmente, tanto las variables meteorológicas como los índices se presentan en términos de anomalía lo que permite resaltar la diferencia entre un año particular y un periodo de referencia. En este sentido, los análisis temporales definen la anomalía como la diferencia entre el promedio de una variable – o índice – para un año determinado y el promedio global para el periodo control (normalmente el periodo histórico o de referencia). Para los análisis zonales se aplicaría un procedimiento similar como se comenta posteriormente.

3.3. Índices Climáticos

Los eventos climáticos extremos se caracterizan normalmente por un conjunto de 27 índices climáticos recogidos en el ETCCDI (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml) incluyendo la frecuencia, intensidad y duración de estos eventos extremos. Por su parte, el CDO contiene los códigos específicamente diseñados para calcular estos índices a partir de los datos de temperatura y precipitación diarios. En este trabajo, la metodología para implementar los índices consiste en adaptar las variables climáticas a la malla de las observaciones en primer lugar para, posteriormente, calcular los índices a partir de estos valores.

Para los objetivos de este trabajo, se seleccionó un determinado conjunto de índices de temperatura superficial del aire (2m) y precipitación diaria con el fin de describir aproximadamente las principales características de los eventos climáticos en Europa. Sin embargo, es necesario resaltar que, a pesar de que los índices climáticos basados en los percentiles relativos de las variables podrían considerarse más adecuados para un análisis en Europa – ya que está en una región considerablemente extensa (Zhang et al. 2011) – los índices se seleccionaron, en este caso, tanto relativos a los percentiles como a límites fijos de las mismas variables, con el fin de analizar las principales ventajas y desventajas de definir los índices climáticos con el EC-Earth en esta región.

Entre los índices de temperatura superficial del aire (2m), el *Tropical Nights Index (TR20)* y el *Ice Days Index (IDO)* son los índices que evalúan la frecuencia en la variación de la temperatura superficial del aire mínima y máxima, respectivamente. En concreto, el *Tropical Nights Index (TR20)* evalúa el número de días al año en que la temperatura mínima es superior a 20°C. Nótese que la temperatura a lo largo del día es mínima durante la noche – cuando la radiación solar es nula y juega un papel importante el enfriamiento de la atmosfera – y T=20°C es un límite para caracterizar una noche con temperaturas similares a las esperados en zonas tropicales. En cuanto al *Ice Days Index (IDO)*, éste índice evalúa el número de días al año en que la temperatura máxima no supera los 0°C. El *Diurnal Temperature Range (DTR)* sería el índice que evaluaría la variación absoluta en la temperatura diaria (diferencia entre las temperaturas máxima y mínima) en Europa (en Celsius). Finalmente, dos índices climáticos se destinarían a evaluar la persistencia de los eventos climáticos de temperatura. Estos índices se relacionan con el número de días consecutivos en que se da un determinado evento climático en una región particular. En concreto, el *Warm Spell Duration Index (WSDI)* tiene en cuenta el número de días en que la temperatura máxima es superior al percentil 90 durante, al menos, 6 días consecutivos, mientras que el *Cold Spell Duration Index (CSDI)* se refiere al número de días en que la temperatura mínima es inferior al percentil 10 de la temperatura también durante, al menos, 6 días consecutivos.

Los índices de precipitación diaria se eligieron también con el objetivo de evaluar la frecuencia, intensidad y persistencia de los eventos extremos de precipitación. En este caso, sin embargo, únicamente se emplea un índice de frecuencia debido a que la precipitación en una medida absoluta con un mínimo hacia 0mm/día. Para los índices de precipitación, el *Strong Precipitation Index (R20)* evalúa el número de días al año en que la precipitación es igual o superior a 20mm. La elección de este índice fue arbitraria, ya que en Europa existen multitud de regiones en que este

nivel de precipitación no se recoge prácticamente nunca (p.ej. zonas desérticas), mientras que en otros puntos, el límite de los 20mm podría superarse fácilmente. Sin embargo, era necesario en un primer momento definir un límite aproximado para evaluar la frecuencia de los eventos extremos de precipitación y, el límite de 20mm podría mostrar efectos importantes en Europa si se modificase durante el siglo XXI el patrón observado para el mismo durante el periodo histórico. El índice de intensidad sería el *Simple Daily Intensity Index (SDII)*, el cual representa el cociente de la precipitación anual total entre el número de días en que la precipitación es igual o superior a 10 mm para una región determinada. Este índice representa pues un promedio de la precipitación recogida durante el número de días con precipitación fuerte a lo largo del año. La elección de uno u otro límite para este índice podría presentar problemas al igual que en el caso anterior, pero era necesario establecer un límite orientativo con el que realizar el estudio de los índices climáticos. Finalmente, se eligieron dos índices de persistencia en este caso también. Uno de ellos relacionados con los periodos secos y otro con los periodos lluviosos a lo largo del año. El primer índice, el *Maximum Length of Dry Spell Index (CDD)* evalúa el número máximo de días consecutivos en que la precipitación es inferior a 1 mm por día, mientras que el segundo índice, el *Maximum Length of Wet Spell Index (CWD)* representa el número consecutivo de días en que la precipitación es igual o superior a 1mm.

Finalmente, es necesario recordar que los índices climáticos mencionados se estiman a partir de los datos “brutos” de temperatura y precipitación, tanto del modelo como de las observaciones. Por lo tanto, estos índices contendrían la misma incertidumbre que los datos originales de los que se obtienen. Por otro lado, los índices también se expresan como anomalía en relación al periodo histórico de referencia. El conjunto de 9 índices utilizados en este trabajo se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2: Set de Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) y Precipitación diaria utilizados en este trabajo.

	No.	Code	Index	Definition	Units	Scope*
Air Surface Temperature Indices	3	ID0	Ice days	Number of days with TX<0°C	Days	F
	4	TR20	Tropical Nights	Number of days with TN>20°C	Days	F
	16	DTR	Diurnal T Range	Annual Average Difference TX-TN	°C	A
	14	WSDI	Warm Spell Duration	6 consecutive days with TX>90th percentile	Days	P
	15	CSDI	Cold Spell Duration	6 consecutive days with TN<10th percentile	Days	P
Precipitation Indices	21	R20	Heavy Rain Index	Annual No. Days when PPT >20mm	Days	F
	19	SDII	Simple Daily Intensity Index	Annual PPT divided by No. Days with PPT>10mm	Mm/day	A
	23	CDD	Maximum Length of Dry Spell	Maximum Number of Consecutive Days with PPT<1mm	Days	P
	24	CWD	Maximum Length of Wet Spell	Maximum Number of Consecutive Days with PPT>1mm	Days	P

*F = Frequency Index; A= Amplitude Index; P = Persistence Index

3.4. EVALUACIÓN DEL MODELO: Periodo Histórico 1950-2004

En esta sección, se presenta la metodología empleada para llevar a cabo la evaluación sobre la representatividad de las proyecciones de los índices climáticos por parte del EC-Earth – en particular durante el periodo histórico 1950-2004. En este sentido, los resultados del modelo – tanto de variables meteorológicas como de índices – se comparan cualitativa y cuantitativamente con los resultados derivados de las observaciones durante el periodo histórico.

Los análisis temporales para las variables meteorológicas promediadas anualmente se complementan además con los resultados del EC-Earth (ICHEC) y del modelo CanESM-2 con el objetivo de evaluar las proyecciones del EC-Earth (BSC) en cuanto a las condiciones iniciales implementadas y las proyecciones de un ESM similar, respectivamente.

3.4.1. Evaluación Inter-anual de las Variables Climáticas: Promedio Anual y Estacional

Los análisis temporales de temperatura superficial del aire (2m) y precipitación diaria evalúan la capacidad del modelo para representar las principales variables climáticas en Europa. Con este objetivo, las distintas variables se promedian en todo el territorio – anual o estacionalmente – con lo que los resultados describen una tendencia continua que fluctúa debido a la existencia de años relativamente cálidos/fríos o lluviosos/secos. Una vez obtenidas las tendencias para modelos y observaciones, es posible evaluar sus similitudes y/o diferencias (p.ej. en cuanto al rango de variación, tendencia, amplitud, etc.).

La evaluación temporal se lleva a cabo tanto para el promedio anual como para el promedio estacional. El procedimiento es el mismo, pero seleccionando en el caso del análisis estacional los periodos de tres meses que se pretenden evaluar: Invierno (DJF), Primavera (MAM), Verano (JJA), y Otoño (SON). Asimismo, las cuatro estaciones describirían aproximadamente la tendencia promedio descrita. Sin embargo, la tendencia promedio anual podría enmascarar, en algunos casos, desviaciones que pasarían inadvertidas en cuanto a la tendencia promediada estacionalmente. Por lo tanto, éste segundo análisis permitiría discernir entre las estaciones en las cuales las proyecciones de las variables meteorológicas se aproximan mejor – o, por el contrario, se desvían – de las tendencias descritas por las observaciones. Así, los posibles errores entre las distintas estaciones podrían afectar la representación de los índices climáticos evaluados posteriormente (p.ej. una representación “pobre” de la temperatura mínima en verano podría afectar considerablemente a la descripción del TR20, etc.).

Para el análisis cuantitativo, la correlación de Pearson entre los modelos y las observaciones, la regresión lineal de las tendencias y la desviación estándar (o varianza) serían los estadísticos que permitirían evaluar la representatividad de las proyecciones respecto a la tendencia global descrita por las observaciones y la variabilidad inter-anual de la misma para la segunda mitad del siglo XX. En resumen, la correlación de Pearson evalúa la correlación (valga la redundancia) entre las fluctuaciones de dos series temporales de datos, la regresión lineal representa de forma simplificada la tendencia global que describen las proyecciones y, por lo tanto, un cambio anual

aproximado de la variable estudiada, la desviación estándar (o varianza) permitiría evaluar la amplitud de las tendencias y el error relativo (%) se utiliza en este trabajo con diversos propósitos pero con el fin de comparar entre distintos estadísticos.

Correlación de Pearson

La correlación es un claro ejemplo de un estadístico simple que permite medir la asociación entre dos conjuntos cuantitativos de datos, en este caso, temporalmente. En este trabajo se eligió la correlación de Pearson (PC) – entendida como la relación lineal o covarianza entre los ratios simple de dos variables – debido a las ventajas de este estadístico en el análisis de datos.

En la bibliografía, éste estadístico se considera que no es ni robusto ni resistente (Wilks et al. 2006). No es robusto porque podría no reconocer las relaciones no-lineales entre dos variables x e y , y no es resistente porque puede ser extremadamente sensible a conjuntos de datos que se desmarquen de las tendencias. Sin embargo, este estadístico se utiliza normalmente en estudios climáticos porque tiene una propiedad importante: se encuadra en el intervalo $[-1,1]$ (PC=-1 significa una correlación lineal negativa perfecta entre x e y mientras que PC=1 significa una correlación lineal positiva perfecta).

Regresión Lineal Simple

La regresión lineal simple describe la relación lineal entre dos variables, x e y , con el mínimo error cuadrático r^2 (interpretado como la proporción de la variable y que se describe por la regresión). En esta sección, las variables climáticas (y) se ajustan linealmente en cuanto al tiempo (x).

Este análisis no puede considerarse como un análisis estadístico rigurosamente hablando debido tanto a la corta longitud de los conjuntos de datos, como a su alta variabilidad inter-anual. Sin embargo, es un análisis que permite visualizar rápidamente si los resultados del EC-Earth representan adecuadamente la tendencia global de las variables climáticas en Europa. En este sentido, el coeficiente de correlación lineal, r^2 , muestra valores bajos por las razones que se comentaban anteriormente, pero la pendiente del ajuste [PP] contiene aproximadamente el promedio de la modificación (incremento o reducción) de las variables climáticas representadas para un periodo temporal.

Desviación Estándar y Varianza

En estadística, la desviación estándar [SD] representa el grado de variación o dispersión de un conjunto de datos en cuanto a su valor promedio. Así, una desviación baja indica que los datos tienden a estar muy cercanos a la media y una desviación alta que existe una mayor dispersión.

En este trabajo, la SD hace referencia a la amplitud de una determinada tendencia inter-anual y, por lo tanto, cuanto mayor sea el valor obtenido para este estadístico, mayor sería la variabilidad inter-anual. En resumen, la SD permite comparar la amplitud de un conjunto de datos obtenidos con el EC-Earth (BSC) con la amplitud de las observaciones y/o de proyecciones similares.

La varianza [VR] se entiende como la desviación estándar dividida por el valor medio del conjunto de datos (o también como SD^2). Por lo tanto, éste estadístico evaluaría – al igual que la SD – una medida de la amplitud o dispersión de una determinada tendencia temporal. En este trabajo se emplea la varianza – y no la desviación estándar – para todos aquellos análisis que se relacionan con las variables de precipitación. La razón se debe simplemente a que la precipitación es una medida absoluta que describe un mínimo hacia 0mm/día por lo que la aplicación de la desviación estándar podría ser confusa en algunos casos.

Estos estadísticos se complementan en algunos casos con el error relativo (%) entre la desviación estándar (o varianza) de dos tendencias para permitir una visualización sencilla de la diferencia (relativa) que existe entre las mismas.

Error Relativo (%)

El error relativo es una comparación estadística simple entre dos valores. Este estadístico tiene la desventaja de que no reconoce la variabilidad de los datos. Sin embargo, permite discernir de forma fácilmente comprensible entre la diferencia relativa que existe entre dos medidas.

En esta sección, el error relativo [ER] se aplica con el objetivo de comparar algunos de los estadísticos comentados anteriormente – en particular, entre las proyecciones del modelo y las observaciones. Por ejemplo, puede utilizarse para comparar la desviación estándar entre dos conjuntos de datos y/o la pendiente derivada del ajuste lineal de los mismos. Para su cálculo, se efectúa la diferencia entre los resultados del modelo y las observaciones, y se divide dicha diferencia por los resultados obtenidos en las observaciones. Por lo tanto, con este estadístico se obtendría un porcentaje que representa la magnitud de la diferencia o modificación entre dos análisis; cuanto mayor fuese el porcentaje mayor la magnitud del mismo.

3.4.2. Evaluación Zonal de las Variables Climáticas

La evaluación zonal de las variables meteorológicas pretende representar aquellas regiones dentro de Europa donde las proyecciones del modelo EC-Earth difieren notablemente de las observaciones durante el periodo histórico – en promedio. Así, se representan dos gráficos para cada variable; un gráfico (arriba) correspondiente al promedio de la variable observada durante la segunda mitad del siglo XX, y un gráfico (abajo) que muestra la diferencia entre el promedio – de la misma variable – obtenido de las proyecciones del EC-Earth (BSC) y las observaciones para el mismo periodo. En definitiva, en el segundo gráfico se conocería como el bias zonal de las representaciones de los datos (diferencia modelo – observaciones) [Véase siguiente apartado].

Nótese que, en el caso de las variables de temperatura, era necesario comparar las diferencias entre la temperatura media, máxima y mínima por lo que los gráficos muestran escalas similares en los tres casos. Por su parte, la diferencia entre la precipitación observada y las proyecciones del modelo se expresa como un error relativo en porcentaje (cociente entre los resultados del EC-Earth menos observaciones dividido por las observaciones). El porcentaje relativo (%), en este

caso, facilita la comparación entre ambos conjuntos de datos, ya que la precipitación es un fenómeno regional que depende del área particular en que se estudia y, por lo tanto, una medida absoluta de la diferencia podría causar confusión.

3.4.3. Evaluación Inter-anual de los Índices Climáticos: Promedio Anual

En cuanto al análisis de los eventos climáticos extremos, es necesario recordar que los índices climáticos se obtienen a partir de las variables climáticas – sobre la malla de las observaciones y, por lo tanto, después de adaptar consecuentemente las proyecciones del EC-Earth – y, posteriormente, se lleva a cabo el promedio anual de los resultados con el fin de obtener los análisis temporales.

Nótese que, en este caso, únicamente se lleva a cabo la evaluación de los índices climáticos promediados anualmente. Este análisis, sin embargo, se considera suficiente para evaluar la representatividad de las representaciones de los índices climáticos por parte del EC-Earth gracias a la evaluación de las variables climáticas llevado a cabo con anterioridad. Los estadísticos para evaluar la validez de las representaciones inter-anales de los índices climáticos – en cuanto a la tendencia global y su variabilidad inter-anual – serían los mismos, en este caso, que los empleados en los análisis temporales de las variables: la correlación de Pearson, la regresión lineal y la desviación estándar o la varianza [Véase apartado anterior para su descripción]. Finalmente, se aplica además el *bias* (%) entre los valores promedio del modelo y las observaciones.

Bias (%)

El *bias* se entiende como la diferencia media entre un valor simulado y un valor observado. Este estadístico es un buen indicador de la amplitud de las muestras y de la sobre o subestimación de un modelo.

En este trabajo, el *bias* (%) se obtiene como diferencia entre el valor promedio del modelo y valor promedio de las observaciones – para el periodo histórico 1950-2004 – y dividida esta diferencia entre el promedio de las observaciones. El resultado pues es un porcentaje que permite evaluar directamente la sobre o subestimación de los índices obtenidos con el modelo con respecto a las observaciones.

3.5. ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES: Periodo Futuro 2006-2100 – RCP4.5 y RCP8.5

Una vez evaluada la validez de las proyecciones del modelo EC-Earth, para reproducir tanto las variables como los índices climáticos durante el periodo histórico, se lleva a cabo un análisis de sus proyecciones para el siglo XXI. Recordar además que la representatividad de las proyecciones futuras depende de las conclusiones derivadas de la evaluación previa.

En este trabajo, se analizan únicamente los escenarios futuros RCP4.5 y RCP8.5 – un escenario “intermedio” y un escenario “intensivo” en emisiones de GHGs, respectivamente – pero sin olvidar que estos RCPs están sometidos tanto a la representatividad de las proyecciones del modelo, en cuanto a la temperatura superficial del aire (2m) y la precipitación diaria, junto con la imposibilidad de tener en cuenta cada uno de los forzamientos futuros plausibles – y el gran número de factores que deberían analizarse.

Finalmente, esta sección persigue discernir en cuanto a la posible modificación de la frecuencia, intensidad y persistencia de los eventos climáticos extremos en Europa durante el siglo XXI.

3.5.1. Análisis Inter-anual de las Variables Climáticas: Promedio Anual

Esta sección complementa la evaluación temporal de las variables climáticas presentada en la sección anterior. En este sentido, la evolución inter-anual de variables se extiende mediante las proyecciones futuras y así se permite visualizar fácilmente la modificación de las mismas durante el siglo XXI.

En este caso, las observaciones no permiten evaluar la validez de las observaciones más allá del año 2012. Por lo tanto, es necesario comparar las proyecciones del EC-Earth con proyecciones similares. Con este objetivo, se incluyen en los análisis de las variables meteorológicas las proyecciones del RCP4.5 y RCP8.5 del EC-Earth (ICHEC) y el CanESM-2. El método de evaluación es similar al periodo histórico, pero con algunas diferencias. Por ejemplo, en esta sección no se incluye la correlación de Pearson ya que no puede considerarse que ninguna proyección futura sea más realista que otra [IPCC, AR4-WGI (2007) y AR5-WGI (2013)]. Por lo tanto, para el análisis de las proyecciones futuras se incluye la regresión lineal de las tendencias inter-anales y la desviación estándar [Véase Evaluación del Modelo].

3.5.2. Análisis Inter-anual de los Índices Climáticos: Promedio Anual

El análisis de las proyecciones de los índices climáticos para los resultados del EC-Earth (BSC) sería muy similar al análisis de las variables climáticas durante el periodo futuro 2006-2100. Las tendencias en este caso – obtenidas a partir de los datos originales de temperatura superficial del aire (2m) y precipitación –, permiten evaluar la posible modificación de los extremos climáticos durante el siglo XXI, dependiendo de los forzamientos futuros utilizados para obtener las proyecciones. Los estadísticos que pretenden discernir en cuanto al posible cambio en la

frecuencia, intensidad y persistencia de los extremos climáticos durante este periodo serían la regresión lineal, la desviación estándar (o varianza) [Véase Evaluación del Modelo] y la diferencia promedio entre los últimos 30 años del periodo histórico y futuro.

Diferencia Promedio Esperada

La diferencia promedio esperada [DPE] se utiliza con el fin de dar una magnitud al cambio relativo que representarían las proyecciones futuras de los índices climáticos con respecto al periodo histórico. Por lo tanto, la *DPE* se obtiene como diferencia entre el valor promedio de las proyecciones futuras y valor promedio de las proyecciones históricas – en este caso, durante los últimos 30 años de cada periodo. El porcentaje de esta modificación se obtiene dividiendo esta diferencia entre el promedio de las proyecciones históricas.

3.5.3. Análisis Zonal de los Índices Climáticos

El análisis de los patrones zonales que describen los índices climáticos obtenidos a partir de las proyecciones del EC-Earth en Europa pretende discernir entre aquellas regiones en que los extremos climáticos puedan verse modificados durante el siglo XXI, dependiendo de las emisiones globales de GHGs. Con este objetivo, los resultados se representan de forma similar para el RCP4.5 y el RCP8.5 para facilitar la comparación entre ambos escenarios futuros.

Los análisis consisten en una primera representación de las proyecciones promedio de los índices climáticos del EC-Earth (BSC) para el periodo histórico 1974-2004 y tres representaciones en que se dividen las proyecciones para el siglo XXI, con respecto a los resultados promedio obtenidos durante el periodo histórico. Cada una de las proyecciones corresponde a, al menos, 30 años tal y como requiere la WMO para describir un patrón climático significativo (Arguez et al. 2011). En resumen, una primera figura representa el patrón zonal del índice en cuestión en cuanto a las proyecciones promedio del EC-Earth (BSC) durante el último periodo del siglo XX (periodo 1974-2004), mientras que el resto de las figuras representa la evolución promedio (relativa al periodo histórico) del mismo índice para el siglo XXI. Lo que se observa pues, en estos tres últimos gráficos, correspondería a una anomalía del índice climático respecto a las proyecciones del periodo histórico.

Finalmente, es necesario mencionar que, este análisis es, sin duda, el análisis más representativo que se lleva a cabo en este trabajo, ya que permite hacerse una idea del patrón de cambio que podrían experimentar los extremos climáticos en Europa durante el siglo XXI, en relación al periodo histórico. Además, los mapas podrían servir para relacionar los cambios proyectados en los índices climáticos con las posibles consecuencias socioeconómicas que se esperarían en Europa en unos escenarios futuros fuertemente dependientes de las emisiones de GHGs.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La sección resultados y discusión presenta una evaluación sistemática de la capacidad del modelo EC-Earth para representar las variables e índices climáticos durante la segunda mitad del siglo XX en Europa. Seguidamente, se analiza la evolución de los eventos climáticos extremos que se espera en la misma región durante el siglo XXI, relacionado con las emisiones de GHGs.

4.1. EVALUACIÓN DEL MODELO: Periodo Histórico 1950-2004

En esta sección, se evalúan las variables e índices climáticos de temperatura y precipitación representados por el modelo EC-Earth (BSC) durante el periodo 1950-2004 en Europa. En otras palabras, se comprueba la capacidad del modelo para representar tanto la tendencia general como la variabilidad temporal (p.ej. frecuencia, amplitud, etc.) que describen las observaciones en Europa.

Las representaciones temporales se analizan cualitativamente, pero también cuantitativamente mediante los estadísticos comentados en la metodología (p.ej. correlación, bias, SD, etc.). Mencionar además que, en esta sección, las variables climáticas se analizaron mediante un promedio anual y un promedio estacional, mientras que únicamente se llevó a cabo el estudio de la variación promedio anual para los índices climáticos.

El análisis se completa mediante un análisis zonal cualitativo de las variables climáticas, con el fin de discernir sobre que regiones europeas el modelo EC-Earth (BSC) reproduce adecuadamente los patrones geográficos climáticos – lo que a su vez determinaría la descripción adecuada o no de las proyecciones futuras (tanto de variables como de índices).

Las proyecciones del EC-Earth (ICHEC) y el modelo CanESM-2 complementan la evolución anual de las variables climáticas.

4.1.1. EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Los datos promedio de la temperatura superficial del aire (2m) y la precipitación diaria en Europa – recogidos del CMIP5 y el E-OBS – se representan en esta sección incluyendo un ajuste lineal de los datos y el coeficiente de correlación de Pearson, como paso previo al estudio de la evolución de los índices climáticos, que se presenta a continuación. Como se ha mencionado, se representa la tendencia global y la variabilidad inter-anual de las variables temperatura del aire (2m) y la precipitación diaria promediadas, anual o estacionalmente, para el periodo histórico (1950-2004). Seguidamente, se presenta el análisis zonal de los datos promediados para el mismo periodo.

4.1.1.1. HP – Evaluación Inter-anual de las Variables Climáticas: Promedio Anual

La temperatura superficial media del aire (2m) [Figura 3] fluctúa debido a la existencia de periodos relativamente más cálidos/fríos durante el periodo histórico y la anomalía representa esta diferencia. La representación muestra una tendencia ligeramente creciente de la temperatura superficial media del aire (2m) en Europa para el periodo 1950-2004.

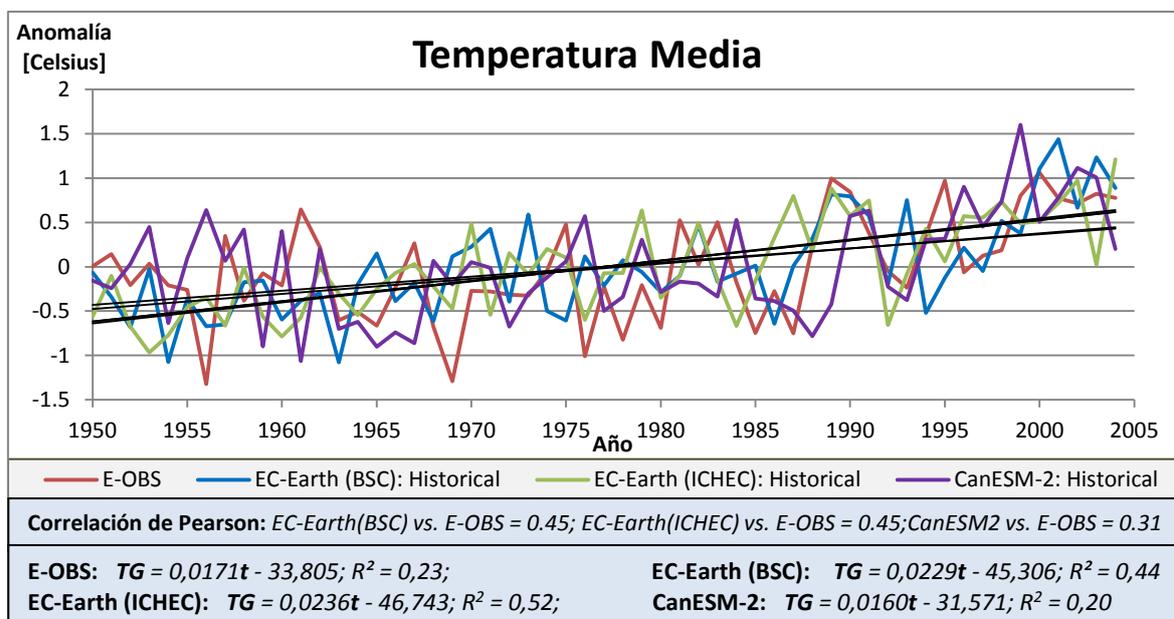


Figura 3: Anomalía de la Temperatura Superficial Media del Aire (2m) (TG) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución de la temperatura media en Europa promediada anualmente respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales de los datos.

Las tendencias obtenidas para la temperatura media en Europa mediante los ESMs no coinciden perfectamente en cuanto a la variabilidad inter-anual mostrada por las observaciones, debido al gran número de factores que condicionan dichas proyecciones (ej. parametrización, bias, etc.) junto con algunos problemas derivados del mismo conjunto de las observaciones (ej. homogeneidad), que se comentan posteriormente. Sin embargo, las cuatro tendencias comparten tanto la amplitud como el ligero incremento que se aprecia durante todo el periodo y visualmente no se aprecian diferencias significativas.

Mediante el coeficiente de correlación de Pearson [Tabla 5] se comprueba que los resultados del EC-Earth (tanto del BSC como del ICHEC) muestran una variabilidad inter-anual similar a las observaciones y relativamente más precisas que el CanESM-2 (0.45 vs. 0.31). El mismo análisis para las temperaturas superficiales del aire (2m) máxima y mínima, muestra tendencias crecientes similares a la temperatura media para el periodo histórico. Para la temperatura máxima [D. Figura 1], las proyecciones del EC-Earth (BSC) describen las observaciones con una correlación ligeramente inferior que las de EC-Earth (ICHEC) (0.43 vs. 0.46), mientras que el modelo CanESM-2 mantiene los resultados previos (0.29). Para la temperatura mínima [D. Figura 2], los datos del EC-Earth (ICHEC) no estaban disponibles, pero existe una mejoría en cuanto a la correlación de los resultados del EC-Earth del grupo BSC (0.52) frente al CanESM-2 (0.35).

Por otro lado, la variación en la temperatura superficial del aire (2m) durante el periodo 1950-2004 se evalúa comparando las tendencias lineales y la desviación estándar (SD) entre modelos y observaciones. En los ajustes de regresión lineal, los coeficientes muestran una correlación pobre debido a la alta variabilidad inter-anual tanto de observaciones como de las proyecciones, pero también debido al relativamente corto periodo de tiempo del ajuste. Sin embargo, la pendiente se relaciona con el promedio de la desviación de la temperatura media durante el periodo histórico [Tabla 6]. En concreto, las observaciones [E-OBS] muestran un incremento en la temperatura media de 0.017°C/año (o 0.855°C durante el periodo histórico) muy similar a estudios publicados de observaciones globales [Rhode et al. (2011)]. Por su parte, el modelo EC-Earth proyecta un incremento de 0.023-0.024°C/año – dependiendo de la inicialización – que sobreestima a la tendencia observada, la cual a su vez se estima adecuadamente con CanESM-2 (0.016°C/año). Finalmente la desviación estándar (SD) – que informa de la amplitud en que fluctúan las tendencias – se encuentra alrededor de 0.57°C para las observaciones y se captura adecuadamente por el modelo CanESM-2 (0.57°C), pero existe una pequeña desviación con los resultados del EC-Earth (BSC) (0.55°C) y del EC-Earth (ICHEC) (0.53°C).

En el caso de la temperatura máxima, el análisis lineal y la desviación estándar muestran resultados similares aunque con una mayor desviación por parte de la SD (0.54°C obtenido por el EC-Earth (BSC) vs. 0.58°C de la observaciones). La temperatura mínima, por su parte, muestra un incremento de unos 0.022°C/año con las observaciones, el cual se captura adecuadamente con los resultados del EC-Earth (BSC) (0.025°C/año), pero no con el CanESM-2 (0.015°C/año). En este caso, la desviación estándar entre modelos y observaciones se sobreestima ligeramente (0.58 vs. 0.56°C).

En resumen, existe una alta correlación entre los resultados del EC-Earth y el E-OBS, una desviación estándar muy similar en todos los casos, pero también una sobreestimación de las tendencias lineales muy similar entre los ESMs. La temperatura mínima, en este caso, es la variable mejor representada en términos de correlación, desviación estándar y tendencia lineal. Además, la temperatura mínima es la variable que muestra un incremento más pronunciado durante el periodo histórico y el EC-Earth es capaz de capturar esta variación adecuadamente. Por otro lado, el EC-Earth y el CanESM-2 producen resultados similares, tanto en amplitud [SD], como en variación de la tendencia global (correlación, y regresión), aunque en algunos casos el modelo CanESM-2 representa relativamente mejor las observaciones (ej. tendencia lineal de la temperatura media). Estas diferencias entre los modelos se deben probablemente a la parametrización y/o diferencias en la representación de algunos procesos climáticos por parte de los modelos.

La evaluación de la precipitación [Figura 4] se basa en el promedio de la precipitación total diaria en Europa [mm/día]. Para esta variable, las proyecciones de los modelos no coinciden perfectamente con las observaciones debido al gran número de factores que influyen en las proyecciones climáticas, pero también, a la medida de esta variable (p.ej. homogeneidad), al igual que en el caso anterior. Sin embargo, es necesario resaltar que la precipitación es más difícil de representar que la temperatura superficial del aire (2m) por parte de los ESMs (Dai et al. 2006). Por lo tanto, la correlación de Pearson es significativamente más baja que en análisis previos –

alrededor de 0.14 – para los resultados del EC-Earth (BSC), aunque más elevada que con el EC-Earth (ICHEC) y el CanESM-2. Un ejemplo claro de la incapacidad de los modelos para representar las observaciones se observa al principio del periodo histórico, alrededor de 1950-1958, cuando los ESMs sobreestiman a las observaciones.

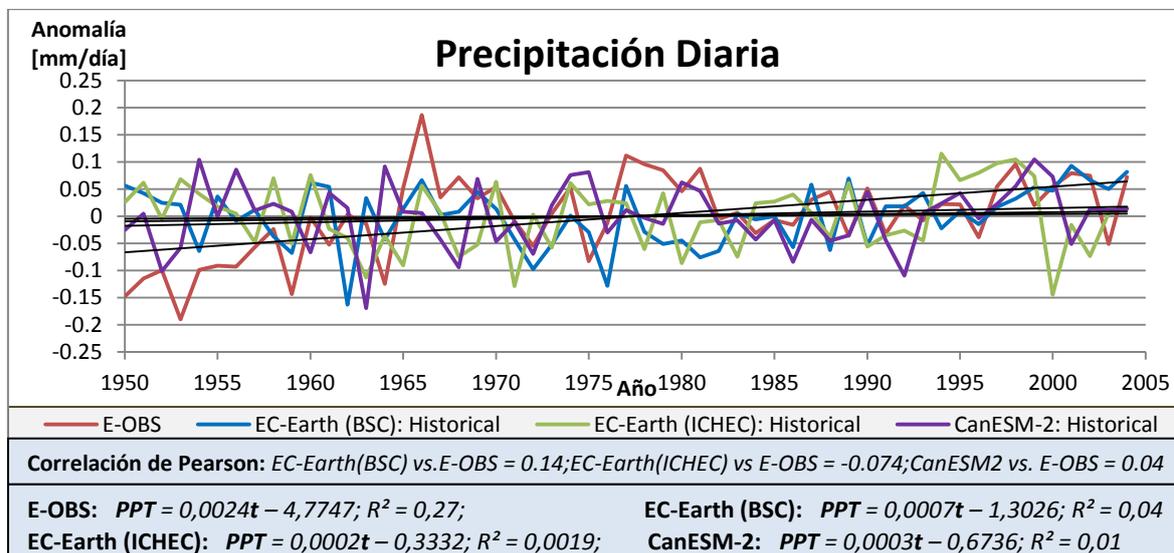


Figura 4: Anomalía de la Precipitación Diaria (PPT) en Europa [mm/día]. El grafico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la precipitación diaria respecto al promedio global de la precipitación diaria para el periodo 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales.

La variación de la precipitación diaria en Europa durante 1950-2004 no parece capturarse adecuadamente con los ESMs; las tendencias lineales de los modelos muestran desviaciones en la precipitación global considerablemente inferiores a las medidas para el periodo histórico (0.0024mm/día). La varianza es también, en este caso, ligeramente inferior con los modelos; 0.003mm/día frente a los 0.005mm/día medidos por las observaciones. Finalmente, las proyecciones del EC-Earth (BSC) son aquellas que capturan relativamente mejor la tendencia lineal, pero no la varianza – o amplitud de las observaciones.

Las variaciones en la precipitación parecen tener poco significado en cuanto a la intensidad y/o la frecuencia en el conjunto del territorio. Por lo tanto, el análisis anterior debe complementarse con un análisis espacial (y también estacional) para comprobar que los patrones de precipitación se capturan adecuadamente en Europa con EC-Earth. Sin embargo, puede comprobarse que el modelo EC-Earth (BSC) es capaz de capturar la variabilidad anual y la variación global de la precipitación en Europa durante el periodo histórico 1950-2004 relativamente mejor en algunos casos que las demás proyecciones (ej. correlación y regresión). Las diferencias en este caso entre ESMs pueden deberse también a una parametrización diferente con la que simplificar aquellos procesos que definen la precipitación (ej. convección, evaporación, etc.).

En resumen, representar adecuadamente cada una de las características y procesos que definen el clima requiere de la aproximación de un gran número de factores que intervienen en la descripción del mismo, lo que hoy en día es prácticamente imposible, debido a las limitaciones computacionales de los ESMs y, en algunos casos, al relativo poco desarrollo de los modelos para incluir todos procesos o forzamientos climáticos. Esta afirmación es particularmente cierta en el

caso de la precipitación, en que los modelos muestran especial dificultad en capturar la variación inter-anual en Europa. En concreto, la representación de las variables climáticas temperatura superficial del aire (2m) y precipitación diaria en Europa muestra desviaciones (en algunos casos importantes). Las razones son atribuibles a multitud de factores entre los que se destaca el tamaño de la región (ya que a su vez incluyen subregiones con características particulares de clima en muchos casos difíciles de representar con los ESMs), las diferencias en la orografía entre modelo y observaciones (debido a la menor resolución de los modelos), así como a la homogeneidad de las observaciones en el espacio como se comenta posteriormente. Aun con todo, las proyecciones de los ESMs definen aproximadamente las observaciones durante el periodo histórico. En este sentido, la SD (o varianza) es similar a las observaciones, la correlación es muchos casos adecuados, etc. Finalmente, dado que las diferencias entre los grupos de EC-Earth (ICHEC y BSC) no fueron significativas, puede decirse que las condiciones iniciales implementadas en el modelo tienen una mínima influencia en la representación de las variables climáticas en Europa durante la segunda mitad del siglo XX.

4.1.1.2. HP – Evaluación Inter-Anual de las Variables Climáticas: Promedio Estacional

Los promedios anuales de las variables pueden en algunos casos enmascarar representaciones pobres en algunas estaciones. Por esta razón, el análisis estacional busca discernir entre las estaciones en que el modelo EC-Earth simula mejor el periodo histórico – lo que a su vez influencia la representación de los índices climáticos presentados posteriormente. Por ejemplo, una estimación “holgada” de la temperatura mínima en verano puede suponer estimaciones diferentes en cuanto al Tropical Nights Index (TR20).

En la Tabla 8, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson para la evaluación estacional. Comparando las correlaciones entre los promedios anual y estacional de las variables, los promedios estacionales muestran una correlación relativamente menor con las observaciones, aunque las diferencias dependen tanto de la estación, como de la variable en particular. Por un lado, cada una de las variables se correlaciona peor en otoño (SON) que durante el resto del año, verano (JJA) e invierno (DJF) muestran valores similares a las estimaciones anuales y, finalmente, primavera (MAM) muestra la mejor correlación – en algunos casos, incluso mejorando la correlación anual (p.ej. PPT). Por otra parte, entre las variables, la precipitación sería otra vez la variable que muestra diferencias más significativas con las observaciones y la temperatura superficial mínima del aire (2m) aquella que las aproxima mejor en todos los casos.

En las Tablas 9 y 10, se muestran las pendientes obtenidas del ajuste de las variables y la desviación estándar (SD) (o varianza), respectivamente. En cuanto a las pendientes lineales, los resultados confirman los resultados para la correlación de Pearson; primavera (MAM) y otoño (SON) son las estaciones “mejor” y “peor” aproximadas, respectivamente. Sin embargo, la pendiente de todas las variables se subestima en primavera (MAM), en claro contraste con los resultados para el promedio anual. Además, los resultados entre las variables no son exactamente iguales a aquellos propuestos en el apartado anterior. Por ejemplo, la temperatura media es la variable mejor estimada en primavera (MAM), pero es la temperatura máxima la que muestra la

mayor desviación en otoño (SON). Por otro lado, los resultados para la precipitación, en este caso, son comparables en magnitud [error relativo (%)] al resto de las variables. Por ejemplo, en primavera (MAM), la precipitación muestra una desviación relativa del -16.7%.

Con la desviación estándar [SD] – o la varianza en el caso de la precipitación – EC-Earth (BSC) muestra diferencias relativas (%) en cuanto a las observaciones – aunque no puede comprobarse que coincidan con los patrones en los estadísticos anteriores. En concreto, se muestran mejoras significativas en muchos casos – por ejemplo la precipitación en verano (JJA) – pero también desviaciones significativas entre modelo y observaciones y, en algunos casos, superiores a aquellas mostradas para el promedio anual – por ejemplo, en la temperatura media en primavera (MAM).

En resumen, dependiendo del estadístico analizado, las distintas estaciones y variables pueden clasificarse según su mayor o menor similitud con respecto a las observaciones. En este sentido, con la correlación y la tendencia lineal, primavera (MAM) y otoño (SON) son las estaciones cuyas proyecciones coinciden “mejor” y “peor” con las observaciones, respectivamente. Por último, la diferencia relativa en desviación estándar puede decirse que aumenta en, prácticamente, todos los casos.

Con estos resultados, se confirma que las variables promediadas anualmente enmascaran el comportamiento real de las variables en las distintas estaciones, en mayor o menor medida. Por lo tanto, estos resultados podrían suponer desviaciones en la representación de los índices climáticos, ya que muchos de estos índices dependen fuertemente de las estaciones. Por poner un ejemplo, la precipitación en primavera (MAM) y otoño (SON) muestra variaciones significativas en cuanto al promedio anual (p.ej. la correlación y regresión), sin embargo, ambas son conocidas por su alto índice de precipitación en Europa. Las diferencias estacionales entre modelo y observaciones no pueden atribuirse a una causa clara, pero podría sugerirse, en este caso, la parametrización o el proceso de “tuneo” del EC-Earth, por ejemplo, favoreciendo una estación a expensas de las demás cuando tienen lugar procesos importantes en la definición del clima (p.ej. primavera como la época de cultivo en el hemisferio norte).

Finalmente, el análisis estacional confirma los resultados previos en cuanto a que el EC-Earth es un modelo adecuado para representar características particulares de las variables temperatura superficial del aire (2m) en Europa. En cuanto a la precipitación, se aprecian algunas mejoras en algunas estaciones en relación al promedio anual. Sin embargo, no puede decirse que mejoren las conclusiones derivadas del apartado anterior.

4.1.1.3. HP – Evaluación Zonal de las Variables Climáticas

En esta sección, se representa el bias zonal entre modelo y observaciones para las variables climáticas de temperatura superficial del aire (2m) y precipitación diaria. En otras palabras, la evaluación zonal pretende definir las regiones europeas particulares donde las proyecciones del modelo EC-Earth (BSC) difieren sustancialmente de las observaciones.

Las observaciones muestran que la temperatura superficial media del aire (2m) [Figura 5, *arriba*] es máxima en la costa norte-africana – alrededor de 300K o 27°C – y decrece hacia latitudes norte (p.ej. la península escandinava), pero también en zonas con elevada altitud (p.ej. los Alpes) – alrededor de 260K – [aprox. 40 grados de diferencia]. En el gráfico inferior, el bias zonal resalta las regiones europeas donde EC-Earth muestra mayores desviaciones respecto a las observaciones. Estas diferencias se aprecian, especialmente, en áreas montañosas como, por ejemplo, los pirineos, los Alpes y algunos otros puntos que se corresponden a zonas con elevada altitud alrededor de las costas mediterráneas. El EC-Earth parece sobreestimar la temperatura media en estos puntos alrededor de unos +7K, mientras que se observan sobreestimaciones de alrededor de +3K, principalmente, en áreas de Europa del este o Italia. Por su parte, en el mismo gráfico se muestran subestimaciones de alrededor -6K en muchas áreas sub-montañosas y una amplia región alrededor del Mediterráneo con una subestimación de -3K. Con todo esto, nótese que las sobreestimaciones del EC-Earth (BSC), en cuanto a la temperatura superficial media del aire (2m), corresponden principalmente a zonas de orografía compleja, mientras que las subestimaciones comprenden un área mucho mayor, con distintas características, pero principalmente alrededor de la cuenca mediterránea.

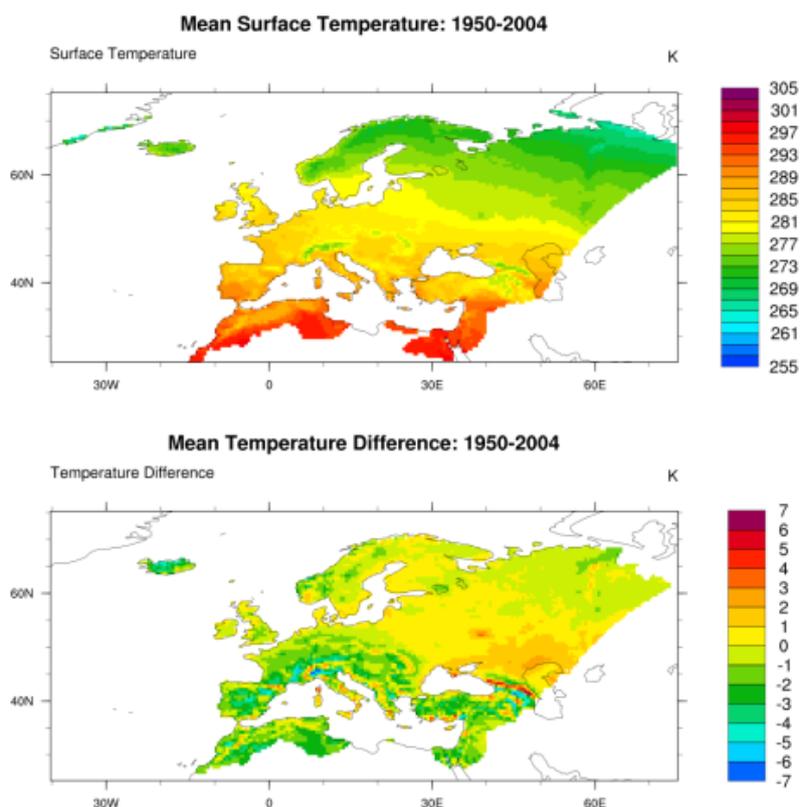


Figura 5: Evaluación Zonal de la Temperatura Superficial Media del Aire (2m) (TG) en Europa [Kelvin]. Promedio de la temperatura para el Periodo Histórico 1950-2004. Temperatura media observada (arriba) y diferencia entre las proyecciones del EC-Earth y las observaciones (abajo).

Las temperaturas superficiales máxima y mínima [D. Figura 5] muestran similitudes en cuanto a las áreas de sobre y subestimación aunque cabe resaltar algunas diferencias. En cuanto a la temperatura máxima [Figura 5, izquierda], la variación medida (arriba) muestra aproximadamente

35K de diferencia entre las regiones norte y sur. Por su parte, la diferencia entre EC-Earth (BSC) y observaciones (abajo) comparte muchas de las áreas con orografía compleja mencionadas anteriormente, donde la desviación entre modelo y observaciones es significativa. En este caso, sin embargo, la temperatura máxima muestra un área relativamente más extensa con subestimación de -3 K. Éste área comprendería regiones como la península ibérica, Europa central, Turquía e incluso la península escandinava.

La temperatura mínima [Figura 5, derecha], muestra una variación medida (arriba) de unos 30K de diferencia (aprox.) entre las regiones norte y sur, así como amplias áreas alrededor de las zonas montañosas. Por otro lado, la diferencia entre modelo y observaciones (abajo) muestra un gran número de zonas con sobreestimación correspondientes, principalmente, a regiones de una altitud media-alta alrededor del Mediterráneo y el Mar Negro. Estas áreas muestran sobreestimaciones de entre +7K y +4K. Por su parte, la temperatura mínima también parece subestimarse alrededor del Mediterráneo, a pesar de la menor extensión en comparación con los dos casos anteriores.

En resumen, el modelo EC-Earth subestima la temperatura superficial del aire (2m) ligeramente alrededor de la cuenca mediterránea, mientras que muestra sobreestimaciones a su vez en áreas montañosas y, en general, ligeramente sobre la mitad norte de Europa durante el periodo 1950-2004. Estas desviaciones corresponderían a una sinergia de diferentes factores como, por ejemplo, las diferencias entre la topografía real de la región y aquella definida por el modelo (mas suavizada debido a la limitada resolución), a la distribución desigual de las estaciones meteorológicas a lo largo y ancho del territorio, así como a la parametrización, entre otros factores (p.ej. “tuneo” del modelo).

La precipitación promedio diaria [Figura 6] recogida (arriba) durante el periodo histórico muestra una variación desde zonas desérticas (o prácticamente desérticas) en África, la península del Sinaí o el mar Caspio – con un promedio prácticamente nulo de precipitación durante todo el periodo – hasta las regiones al noroeste de Europa donde, algunas áreas como, por ejemplo, la península escandinava y la islas británicas, recogen una precipitación durante el periodo histórico de 80 mm/día. En promedio, se muestran valores de entre 8 y 40 mm/día a lo largo del territorio con una precipitación considerable en la región de los Alpes (desde 44 a 56 mm/día). Por su parte, el bias o error relativo (%) entre modelo y observaciones sugiere una sobreestimación de la precipitación en Europa durante todo el periodo. En particular, dejando de lado las zonas no pertenecientes a Europa, EC-Earth muestra sobreestimaciones en algunos casos cercanas al 80% de la precipitación promedio diaria. Estas áreas corresponderían principalmente a la península ibérica y Europa central.

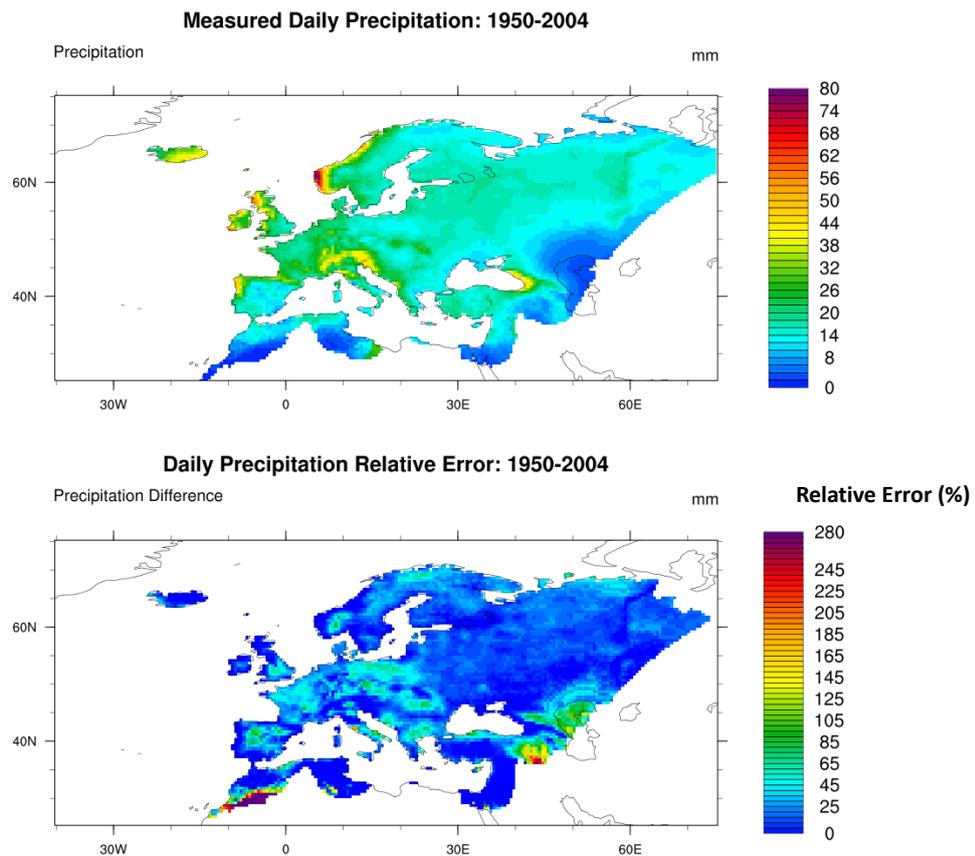


Figura 6: Evaluación Zonal de la Precipitación Diaria (PPT) en Europa [mm/día]. Promedio de la Precipitación Diaria para el Periodo Histórico 1950-2004. Precipitación diaria observada (arriba) y error relativo (%) entre las proyecciones del EC-Earth y las observaciones (abajo).

Estos resultados sugieren que EC-Earth representa adecuadamente el promedio de la precipitación diaria en regiones con una orografía compleja (p.ej. los Alpes), mientras que sobreestima la misma variable uniformemente en toda Europa. Sin embargo, nótese que, mientras el análisis zonal de la precipitación muestra sobreestimaciones en todo el territorio, los análisis temporales muestran subestimaciones. Este último comportamiento es contra-intuitivo pero podría asociarse al mecanismo de representación de la precipitación por el EC-Earth – Flujo vs. Medidas Discretas.

En resumen, el análisis zonal culmina la evaluación global de las proyecciones del modelo EC-Earth para el periodo histórico 1950-2004, ayudando a detectar aquellas zonas donde el modelo difiere relativamente de las observaciones. Con este análisis, se demuestra que la representación de la temperatura superficial del aire (2m) depende marcadamente de la orografía, al encontrarse las mayores desviaciones en regiones con topografía compleja. Por ejemplo, las tres temperaturas se sobreestiman en los Alpes mientras que se subestiman en las regiones colindantes. Además, las tres variables muestran un comportamiento similar con una sobreestimación en la orografía compleja y una subestimación alrededor de la cuenca mediterránea pero, también, con algunas diferencias como, por ejemplo, en cuanto a la temperatura mínima mostrando una área significativamente mayor con sobreestimación. Por su parte, la precipitación se sobreestima en todo el territorio, en contraste con los análisis inter-anales, aunque aquellas áreas con orografía

compleja parecen representarse adecuadamente.

Con todo lo anterior, la evaluación zonal confirma, por un lado, que los análisis inter-anales son insuficientes para entender el patrón espacial que EC-Earth describe respecto a las variables climáticas y, por otro lado, que existen multitud de factores determinando las diferencias entre las proyecciones del modelo y las observaciones. Además, con el análisis de la temperatura superficial del aire (2m), es posible apreciar como el modelo EC-Earth describe dos áreas diferenciadas norte-sur dentro de Europa – en cuanto a la representatividad de los resultados. En concreto, la temperatura se subestima alrededor de la cuenca mediterránea, mientras que se sobreestima para altas latitudes. En cuanto a la representación zonal de la precipitación diaria, parece existir una mayor precisión en la representatividad de las proyecciones en la mitad norte del territorio. Sin embargo, el bias zonal entre el modelo y las observaciones se sobreestima, en contraposición con las tendencias inter-anales. Este último comportamiento no puede explicarse fácilmente pero parece confirmar resultados anteriores, en que el EC-Earth demostraba una representación pobre de la precipitación diaria promedio.

Se concluye así que, EC-Earth reproduce adecuadamente las variables de temperatura superficial del aire (2m), pero muestra desviaciones importantes en cuanto a la representación de la precipitación diaria en el conjunto del territorio. En consecuencia, el modelo podría ser adecuado para simular los índices climáticos de temperatura superficial del aire (2m) que se presentan a continuación, mientras que los índices de precipitación diaria deberían ser analizados con cautela debido a las deficiencias en la representación de la variable que se han mencionado.

En cuanto a los factores que podrían jugar un papel fundamental en la representación zonal – y por lo tanto en los análisis temporales también –, la topografía, la resolución y el número de estaciones disponibles regionalmente, junto con las sinergias entre los mismos, podrían ser considerados los más importantes en el caso de la temperatura superficial del aire (2m), mientras que la parametrización tomaría una mayor importancia en el caso de la precipitación.

En cuanto a la topografía, algunos de los mayores bias zonales en el caso de la temperatura aparecen en regiones con una elevación considerable, lo que puede ser debido a una discordancia entre la topografía del modelo – normalmente suavizada – y la topografía real. En el caso de las estaciones meteorológicas, tanto el número de estaciones como su distribución espacial en el territorio analizado jugarían un papel fundamental en el proceso de re-análisis de las observaciones y, por lo tanto, en las diferencias con las proyecciones del modelo. En concreto, la relativa baja densidad de las estaciones en algunas zonas de Europa puede suponer unos valores en la red que podrían no considerarse totalmente representativos de estas regiones. Por ejemplo, las estaciones de la precipitación [B. Figura 1 (b)] se encuentran muy dispersas en áreas de Turquía y la península ibérica (sin tener en cuenta las zonas exteriores a Europa). Por lo tanto, es entendible que los análisis de la precipitación en dichas zonas muestren importantes desviaciones entre modelo y observaciones, sobre todo si estas áreas incluyen orografía compleja. Nótese además que en el caso de la temperatura, se encuentra en todo el territorio un menor número de estaciones de medida.

Otros factores que influirían en los resultados zonales estarían relacionados en la parametrización del EC-Earth y el método de “reajuste” de la malla. Como se ha mencionado anteriormente, los Earth System Models (ESMs) están preparados para representar aquellos procesos que tiene lugar en grandes escalas espaciales (aprox. 150km). Por esta misma razón, aquellos fenómenos regionales y/o locales derivados de la orografía compleja deben ser parametrizados, con el fin de salvar la desventaja del elevado cálculo computacional. Esta incertidumbre se hace especialmente patente en el caso de la precipitación diaria – un fenómeno estrechamente dependiente regionalmente –, tal y como mencionan algunos autores (Dai et al. 2006) y confirman los resultados de este trabajo. Finalmente, esta desventaja, junto con el método de “reajuste” de la malla del modelo a las observaciones, podría influir significativamente en las diferencias entre modelo y observaciones. Nótese que el “reajuste” de la malla del modelo a las observaciones es una reducción sustancial.

4.1.2. EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS

Al igual que en el caso de las variables climáticas, la evaluación de los índices persigue comprobar la capacidad del EC-Earth para capturar la tendencia global y su variabilidad durante el periodo histórico 1950-2004. Estos resultados influirán, en última instancia, en el análisis de las proyecciones futuras. Por otro lado, es necesario recordar que, en esta sección, se introduce el bias (%) entre las proyecciones del modelo y las observaciones.

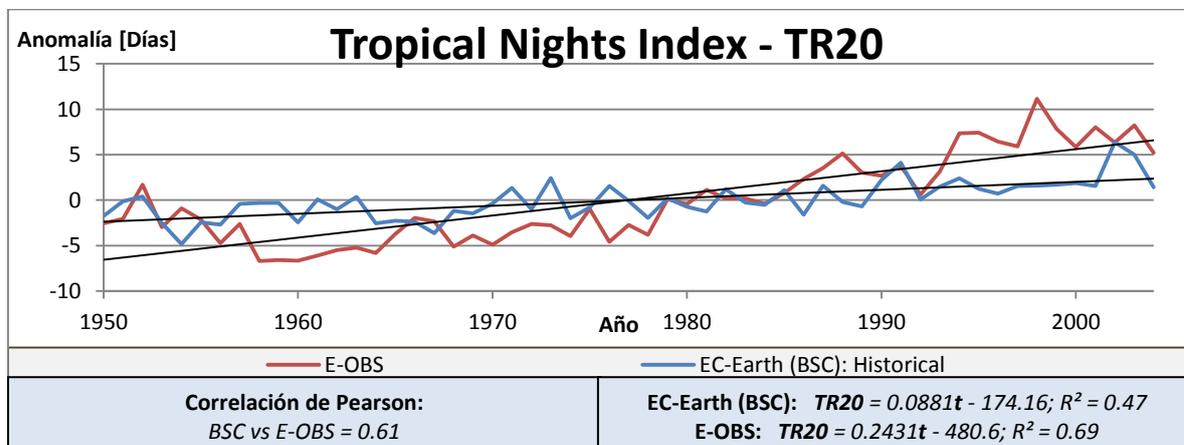


Figura 7: Anomalía del Tropical Nights Index (TR20) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución interanual del promedio anual de TR20 respecto al promedio global de TR20 para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

Las proyecciones obtenidas mediante EC-Earth (BSC) para el Tropical Nights Index (TR20) [Figura 7] sobreestiman la tendencia derivada de las observaciones durante la primera mitad del periodo histórico, mientras que las subestiman durante la segunda mitad. A pesar de estas diferencias, el coeficiente de Pearson entre ambas tendencias es de 0.609, lo que puede considerarse una buena correlación. Por su parte, las observaciones describen una tendencia creciente (PP=0.243 días/año), pero la tendencia descrita por el modelo es mucho más plana (PP=0.088días/año). En cuanto al bias (%), sin embargo, se obtiene una subestimación del -24% por parte del modelo. Finalmente, la desviación estándar presenta una variación alrededor de -56% entre modelo y

observaciones.

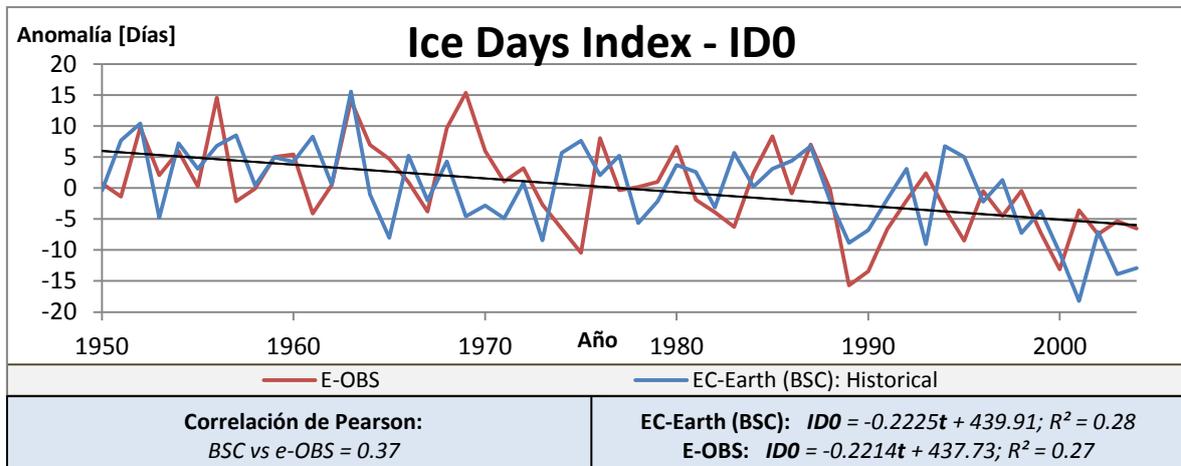


Figura 8: Anomalía del Ice Days Index (IDO) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de IDO respecto al promedio global de IDO para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

El Ice Days Index (IDO) [Figura 8] describe dos tendencias decrecientes que visualmente concuerdan bien y se obtiene una correlación de 0.37. La pendiente, en este caso, es prácticamente idéntica, el bias (%) muestra una subestimación del -6% y la desviación estándar es, también, muy similar. Se puede decir pues que, las proyecciones para el IDO describen adecuadamente la tendencia derivada de las observaciones, definiendo una reducción de 11 días de IDO menos durante el periodo histórico 1950-2004.

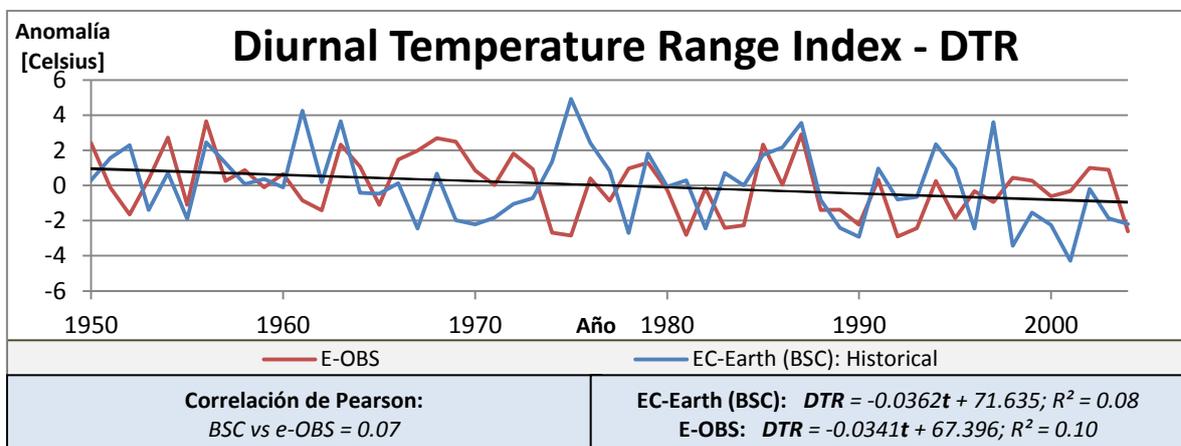


Figura 9: Anomalía del Diurnal Temperature Range Index (DTR) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de DTR respecto al promedio global de DTR para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

Las tendencias definidas por las observaciones y el EC-Earth para el Diurnal Temperature Range Index (DTR) [Figura 9] concuerdan bastante bien, a pesar de algunas diferencias que pueden apreciarse como, por ejemplo, durante los periodos 1966-1977, 1983-1984 y 1992-2003. La pendiente para este índice es muy similar entre ambas tendencias y el bias (%) muestra subestimación del -7%. El coeficiente de Pearson, sin embargo, es bajo en este caso (0.07), lo que sugiere una diferencia inter-anual importante entre las tendencias. Con la desviación estándar (error relativo cercano al 22%) se aprecia una pequeña diferencia entre la amplitud de ambas

tendencias. Finalmente, los ajustes lineales sugieren una disminución alrededor de 1.75°C de DTR – o rango de temperatura diaria – durante el periodo de estudio, similar en ambos casos.

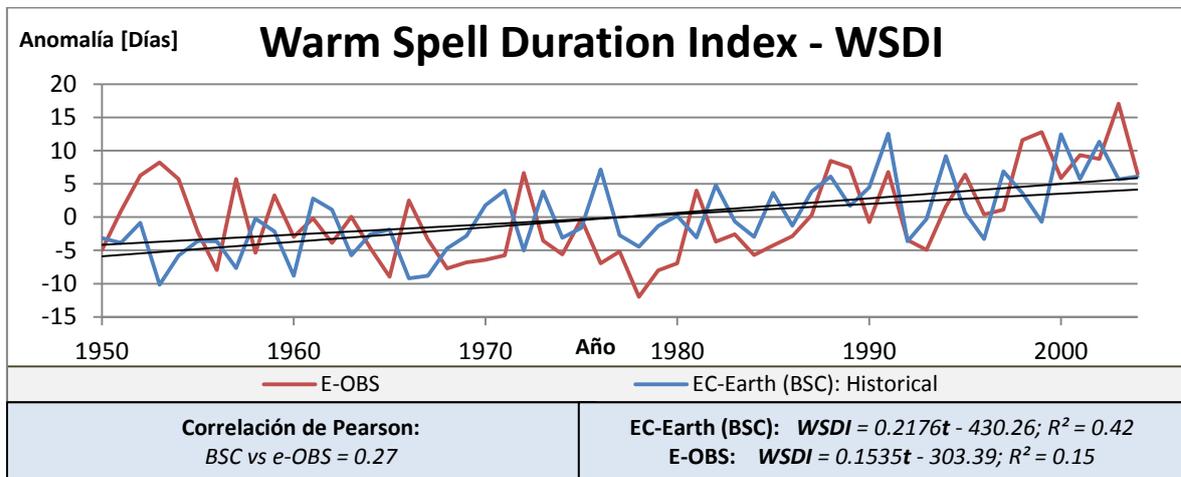


Figura 10: Anomalía del Warm Spell Duration Index (WSDI) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de WSDI respecto al promedio global de WSDI para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

El Warm Spell Duration Index (WSDI) [Figura 10] muestra una pequeña diferencia entre la tendencia descrita por el EC-Earth y las observaciones. Así, la pendiente del modelo es mayor que en las observaciones (alrededor de un 40%) y la desviación estándar muestra un error en la amplitud cercano al -16%. Sin embargo, el coeficiente de correlación muestra un valor adecuado entre la variabilidad inter-anual (0.272) y el bias es del +6%. Con estos resultados, podría decirse que el modelo describe bien el WSDI, aunque las tendencias lineales muestren un incremento de 11 días de WSDI por año durante todo el periodo, frente al 7.7 días de las observaciones.

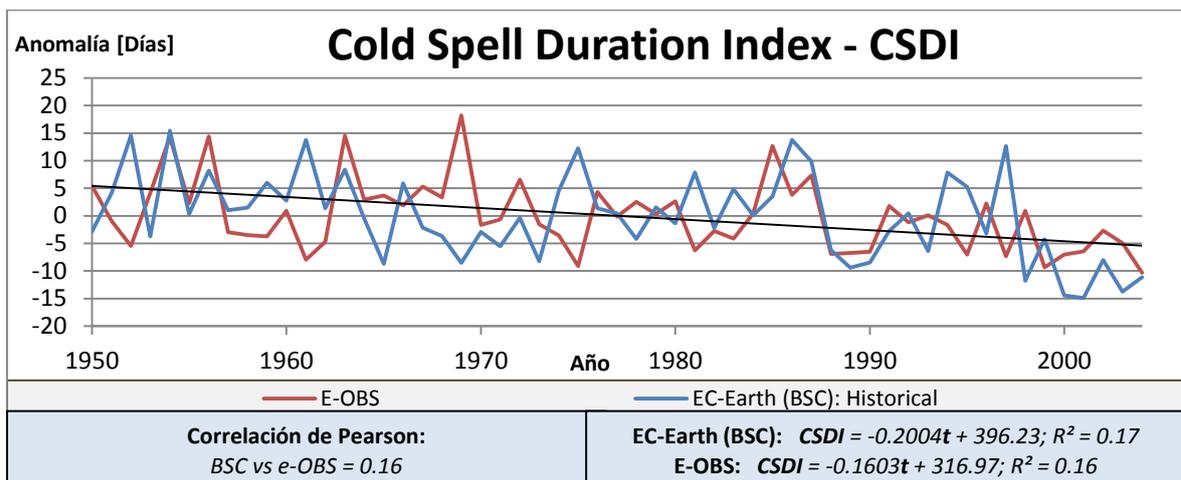


Figura 11: Anomalía del Cold Spell Duration Index (CSDI) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de CSDI respecto al promedio global de CSDI para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

Para el Cold Spell Duration Index (CSDI) [Figura 11], modelo y observaciones describen tendencias decrecientes muy similares durante el periodo histórico, aun con algunas diferencias como, por ejemplo, en 1964-1969 y 2000-2003. La correlación inter-anual muestra un valor medio-bajo

(PC=0.15), la pendiente se subestima con un error alrededor del 25% y se obtiene un bias del 1%. La desviación estándar muestra, además, una diferencia de alrededor del +20% en la amplitud de ambas tendencias. Finalmente, nótese que existe una tendencia inversa entre los índices WSDI y CSDI durante el periodo histórico.

Los datos cuantitativos para los índices de temperatura se recogen en la Tabla 11 y Tabla 12.

En resumen, los índices “mejor” y “peor” correlacionados con la variación inter-anual de las observaciones serían el TR20 y el DTR, respectivamente. La pendiente lineal promedio se captura adecuadamente con los índices ID0 y DTR (mínimo error relativo) y la tendencia para el WSDI sería la única que podría considerarse sobreestimada, en contraste con los demás índices de temperatura. El bias (%) se captura adecuadamente con todos los índices, a excepción del TR20 donde se muestra una subestimación del -24%. Finalmente, la desviación estándar mostraría una buena concordancia en la amplitud en el caso del ID0 y la mayor desviación mayor en el TR20.

Nótese en este punto que, la variabilidad interanual descrita por las proyecciones – y relacionada directamente con la desviación estándar – es significativamente mayor en el caso de los índices que intentan representar los extremos “fríos”. Estos resultados parecen coincidir con aquellos propuestos por Kharin et al. (2007) en que las proyecciones de los GCM del IPCC [AR4-WGII (2007)] describen una variabilidad más alta para los extremos considerados “fríos”, que para aquellos considerados “cálidos”.

Con estos resultados, se considera que el modelo EC-Earth es capaz de representar los índices de temperatura superficial del aire (2m) adecuadamente durante el periodo histórico. Esta afirmación se basa en el bias (%) bajo entre modelo y observaciones en todos los casos – con excepción del TR20 –, las tendencias lineales similares (con errores relativos inferiores al 100%) y unas correlaciones adecuadas en todos los casos – con la excepción del DTR.

Mencionar además que, comparando los resultados cuantitativos entre variables e índices climáticos, no se aprecian patrones significativos. Por ejemplo, el índice TR20 obtenido a partir de la temperatura mínima (TN) muestra una mayor correlación pero un error relativo en la pendiente de signos opuestos. Por lo tanto, estos resultados confirmarían que, no es posible evaluar la descripción de los índices climáticos (y, por lo tanto, de los extremos que estos intentan representar) mediante el estudio de las variables climáticas. En este sentido, la implementación de los índices climáticos modifica los resultados para las variables climáticas tanto de las proyecciones como de las observaciones llegando, en algunos casos, a mejorar la representatividad del modelo (p.ej. correlación). Esta modificación de los datos debe considerarse también como una fuente de incertidumbre, que explicaría las diferencias entre los resultados del modelo y las observaciones, junto con aquellas incertidumbres ya comentadas para las variables climáticas (p.ej. parametrización, orografía, homogeneidad de las medidas, etc.).

Para los índices de precipitación es necesario recordar que, las proyecciones del EC-Earth para la variable precipitación diaria mostraban desviaciones sustanciales respecto a las observaciones durante la segunda mitad del siglo XX, en cuanto a la correlación, pendiente, desviación estándar

e incluso representación zonal – a pesar de la relativa mejora que se aprecia con los análisis estacionales. Por lo tanto, hay que tener en cuenta que, estos resultados podrían afectar negativamente a la representación de los índices de precipitación.

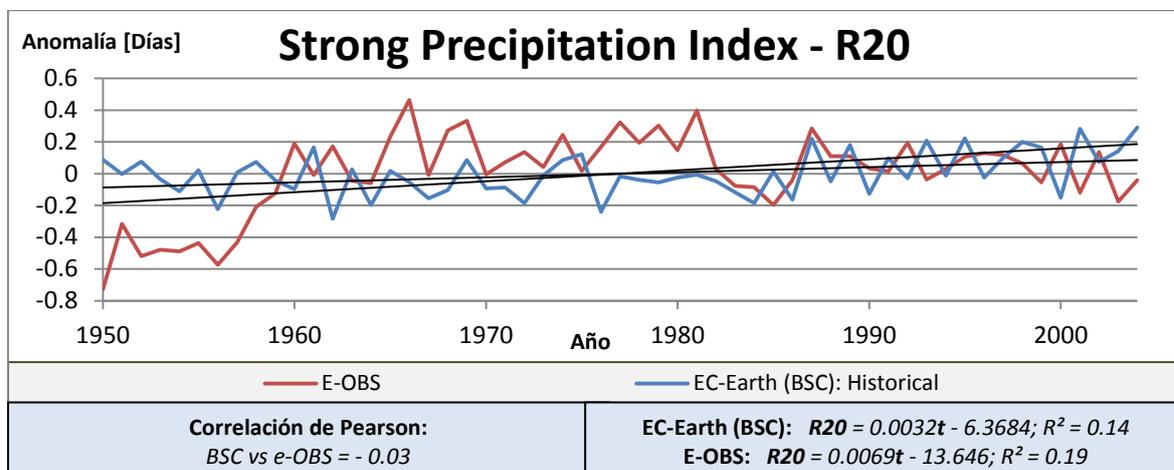


Figura 12: Anomalía del Strong Precipitation Index (R20) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de R20 respecto al promedio global de R20 para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

Visualmente, puede apreciarse como el modelo EC-Earth (BSC) muestra una variación significativa respecto a las observaciones tanto en la amplitud, como en la variación inter-anual para el *Strong Precipitation Index (R20)* [Figura 12]. Por ejemplo, la tendencia derivada de las proyecciones del modelo sobreestima aquella de las observaciones hasta 1959, pero posteriormente la subestima hasta 1984. Por lo tanto, el bajo coeficiente de Pearson (-0.03) junto con las diferencias entre las pendientes lineales y las varianzas (alrededor del -50% y -72% respectivamente) corroboran la diferencia entre las tendencias globales y la variabilidad inter-anual existente. El bias (%) por su parte muestra una subestimación del -57% con los resultados del modelo.

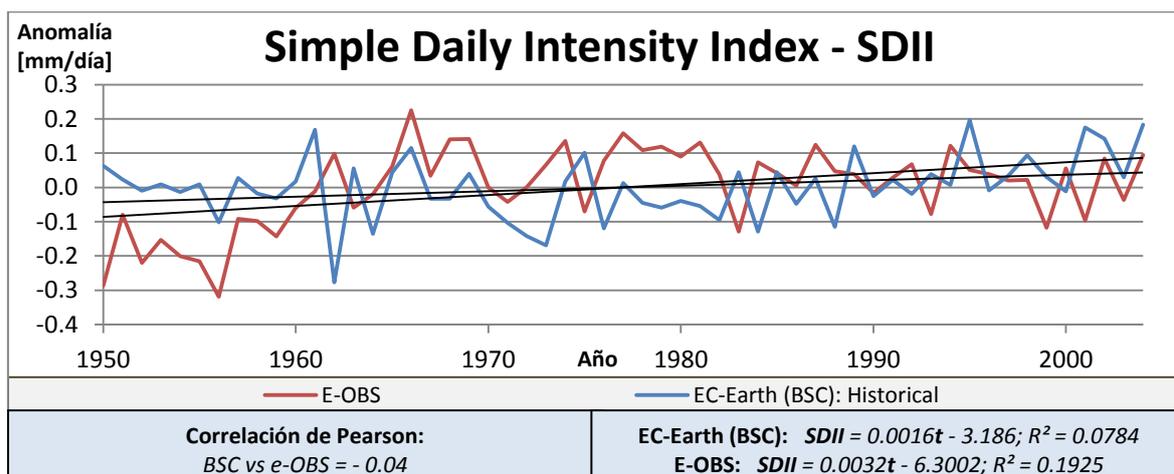


Figura 13: Anomalía del Simple Daily Intensity Index (SDII) en Europa [mm/día]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de SDII respecto al promedio global de SDII para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

Los resultados para el *Simple Daily Intensity Index (SDII)* [Figura 13], son visualmente similares al R20. Para este índice, la correlación inter-anual es pobre (PC=-0.04) mientras que la pendiente y la

varianza con modelo se subestiman alrededor del -50% y -40%, respetivamente. El bias (%), en este caso, es del -15% corroborando la subestimación por parte del modelo. La similitud entre estos índices (R20 y SDII) se debe probablemente a que ambos están relacionados con los días de precipitación “fuerte” o “muy fuerte” en Europa durante el periodo histórico.

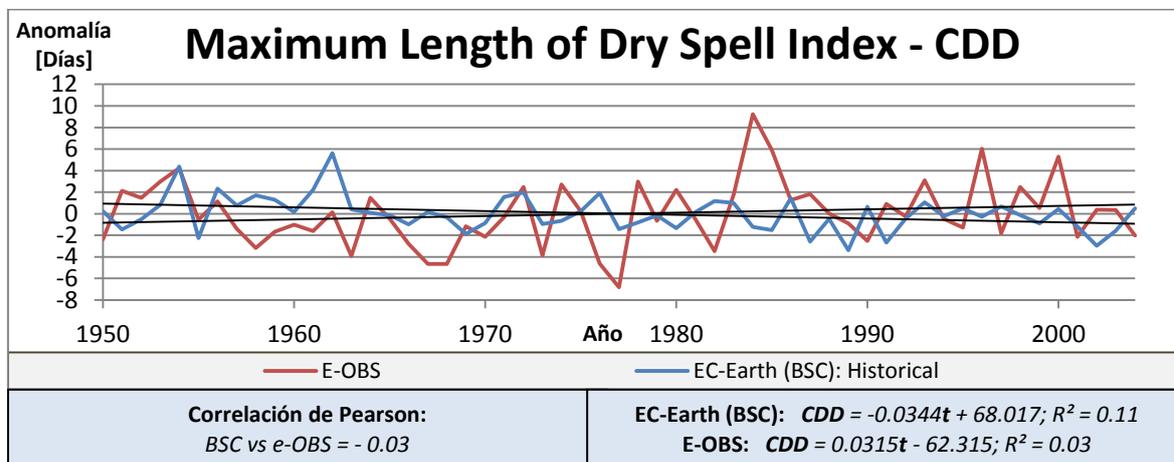


Figura 14: Anomalía del Maximum Length of Dry Spell Index (CDD) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de CDD respecto al promedio global de CDD para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

Para el Maximum Length of Dry Spell Index (CDD) [Figura 14], el modelo es incapaz de describir la amplitud que muestran las observaciones durante el periodo histórico. Algunos ejemplos de estas diferencias pueden apreciarse en 1966-1968, 1976-1977y 1985-1986. La correlación inter-anual, en este caso, es también pobre (PC=-0.03), el modelo subestima la varianza alrededor de un -70%, mientras que el bias (%) se subestima en -35%. La pendiente entre ambas tendencias muestra un error del -200% al mostrar signos distintos.

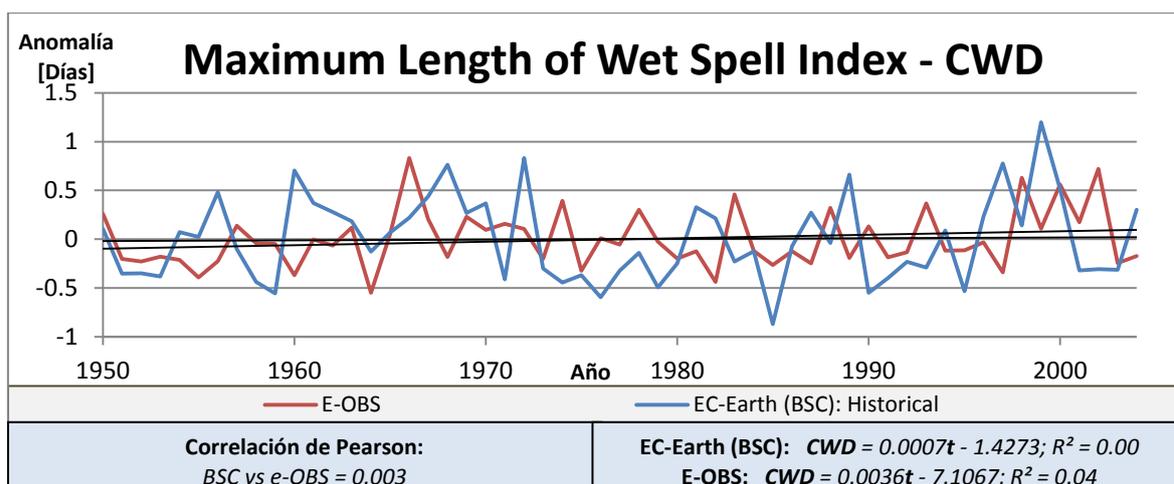


Figura 15: Anomalía del Maximum Length of Wet Spell Index (CWD) en Europa [días]. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de CWD respecto al promedio global de CWD para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representa el ajuste lineal de los datos.

Para el Maximum Length of Wet Spell Index (CWD) [Figura 15], los resultados muestran también diferencias entre modelo y observaciones. Así pues, la correlación es nula en este caso (PC=0.003), la pendiente se subestima por parte del modelo (aprox. -80%), pero el bias (%) y la varianza se

sobrestiman en el 30% y 120%, respectivamente.

Los resultados cuantitativos para los índices de precipitación se recogen en la Tabla 13 y Tabla 14.

En resumen, los índices de precipitación mostraron desviaciones significativas, tanto en la variabilidad inter-anual, como en la tendencia global. En concreto, la correlación entre las tendencias es prácticamente nula, las pendientes se subestiman (con especial énfasis en el CDD), el bias (%) se subestima – a excepción del CDD – y las varianzas son diferentes entre modelo y observaciones (especialmente para el CWD).

Con estos resultados, no puede afirmarse que el EC-Earth describa adecuadamente las tendencias que se obtienen mediante las observaciones para los índices de precipitación diaria en Europa durante el periodo histórico. Las diferencias es muy probable se deban a los problemas que mostraba EC-Earth para describir la variable precipitación durante el periodo histórico tal y como se comentaba anteriormente – principalmente debido a la parametrización –, junto con la incertidumbre asociada a modificar los datos de origen. Por lo tanto, es muy probable que esta falta de representatividad en los índices de precipitación se extendiese al caso de las proyecciones futuras durante el siglo XXI.

4.2. ANÁLISIS DE LAS PROYECCIONES: Periodo Futuro 2006-2100 – RCP4.5 y RCP8.5

Una vez analizadas las proyecciones del modelo EC-Earth para el periodo histórico 1950-2004, se analizan a continuación las proyecciones para el periodo futuro 2006-2100 con el objetivo de discernir entre los posibles cambios en cuanto a la frecuencia, intensidad o duración de los eventos climáticos extremos en Europa. En esta sección, las observaciones se extendieron, en algunos casos, hasta 2012 pero la única forma de corroborar la representatividad de las proyecciones futuras es mediante la comparación directa de las proyecciones del EC-Earth (BSC) con las proyecciones de otros modelos. Finalmente, únicamente se analiza en esta sección los escenarios futuros RCP4.5 y RCP8.5.

En esta sección, una regresión lineal y la desviación estándar (o varianza) de las proyecciones evalúa la tendencia inter-anual que cabe esperarse hacia finales del siglo XXI. Asimismo, con el fin de discernir entre la magnitud del cambio proyectado por el modelo en cuanto a los índices climáticos, se incluye una diferencia relativa entre las proyecciones del modelo para últimos 30 años del periodo histórico (1975-2004) y los últimos 30 años del periodo futuro (2070-2099).

4.2.1. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

En esta sección se presentan las proyecciones futuras de las variables temperatura y precipitación, junto con sus correspondientes proyecciones para el periodo histórico (presentadas anteriormente), con el fin de mostrar la tendencia proyectada continua para el periodo de 1950-

2100 y el rango de posibles escenarios futuros –, en este caso, obtenidos por los modelos EC-Earth y CanESM-2.

Las proyecciones futuras para la temperatura superficial media del aire (2m) [Figura 16] con el modelo EC-Earth (BSC) prácticamente coinciden durante un periodo relativamente largo con ambos RCPs. Sin embargo, el RCP8.5 proyecta valores más altos de temperatura que el RCP4.5 durante 2024-2032, 2041-2056, 2070-2080 y 2090-2093. Comparando estas tendencias con aquellas proyectadas por el EC-Earth (ICHEC) y el CanESM-2, los resultados del EC-Earth (BSC) describen tendencias significativamente menos pronunciadas para el siglo XXI – aunque la diferencia es relativamente menor con el RCP4.5.

Las proyecciones del EC-Earth (ICHEC y BSC) para el RCP4.5 son muy similares, pero ligeramente superiores con el EC-Earth (ICHEC) durante todo el periodo (aprox. +0.1°C). Por su parte, la proyección del CanESM-2 para este escenario muestra una variación de la temperatura superficial del aire (2m) aproximadamente +0.4°C superior durante todo el periodo. Con el escenario RCP8.5, sin embargo, la proyección del EC-Earth (BSC) es menor que la correspondiente tendencia del EC-Earth (ICHEC) y ambas son alrededor de -1°C inferiores a las del CanESM-2. Nótese además que, la proyección RCP8.5 del EC-Earth (BSC) no muestra una tendencia continua; aparecen discontinuidades en forma de pico que se aproximan a las proyecciones del EC-Earth (ICHEC) a pesar de que ambas divergen a partir de 1944 (aprox.). Esta fluctuación sugiere que existe algún tipo de problema con las proyecciones del EC-Earth (BSC) para el escenario RCP8.5.

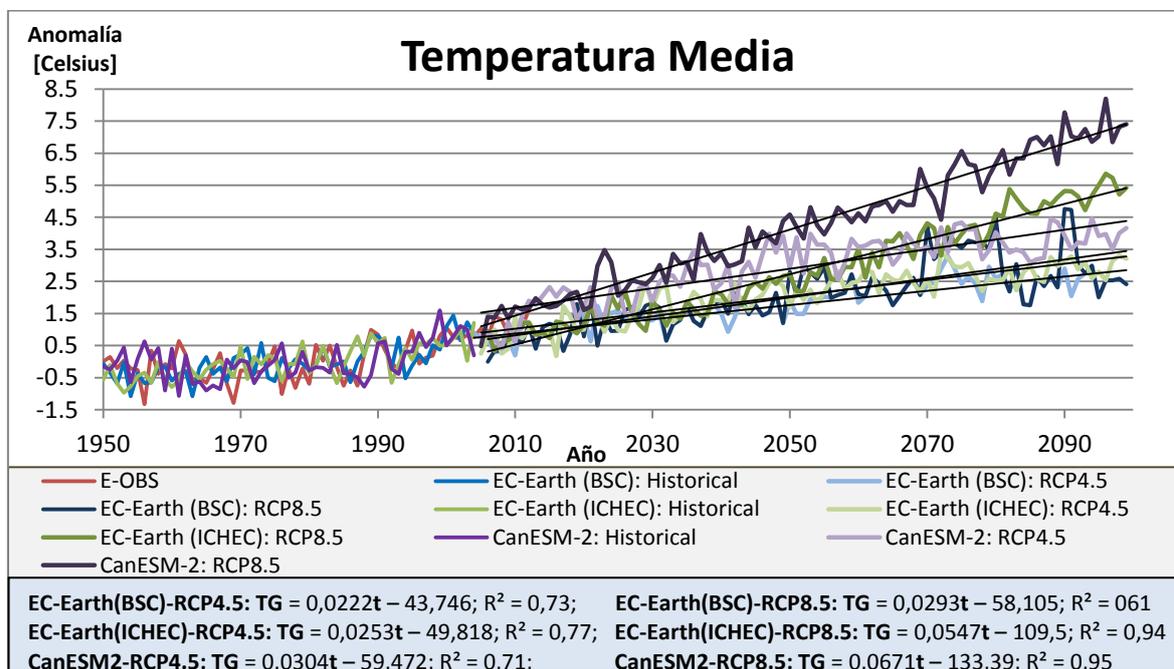


Figura 16: Anomalía de la Temperatura Superficial Media del Aire (2m) (TG) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la temperatura media respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

Los ajustes lineales de estas proyecciones [Tabla 15] muestran para el escenario RCP4.5 un

incremento anual de 0.022°C con los resultados del EC-Earth (BSC), de 0.025°C con EC-Earth (ICHEC) y de 0.03°C con el modelo CanESM-2 (lo que traducido a un periodo de 100 años supondría un incremento de 2.2, 2.5 y 3.3°C, respectivamente). Para el RCP8.5, los incrementos anuales serían de 0.029, 0.055 o 0.067°C anuales con las proyecciones del EC-Earth (BSC), EC-Earth (ICHEC) y CanESM-2, respectivamente (2.9, 5.5 y 6.7°C hacia el año 2100). En cuanto a la desviación estándar [Tabla 16], se observa que la amplitud de las proyecciones para el escenario RCP4.5 es ligeramente inferior para el EC-Earth (BSC), en comparación con las demás proyecciones (aprox. 0.72 vs. 1°C). En el caso del RCP8.5 sucedería algo similar pero se amplía el intervalo (1 vs. 1.5-1.9°C). Por lo tanto, no solo la evolución de tendencia lineal es significativamente distinta con la proyección del EC-Earth (BSC) para el RCP8.5 en comparación con las demás tendencias, sino que la diferencia relativa en la SD también es más importante con este escenario. Se concluye pues que, es probable que la proyección para el escenario RCP8.5 con el modelo EC-Earth del BSC presente problemas de desestabilización.

Dejando de lado la posible desestabilización mencionada, las distintas proyecciones de los ESMs muestran, tanto para el RCP4.5 como para el RCP8.5, un claro incremento de la temperatura superficial media del aire durante el siglo XXI y más importante en un escenario “intensivo” en emisiones de GHGs. Las proyecciones del EC-Earth (ICHEC) y el CanESM-2, por su parte, mostrarían incrementos incluso superiores a las proyecciones del EC-Earth (BSC) para el mismo periodo.

Las temperatura máxima y mínima [D. Figura 3 y D. Figura 4, respectivamente] comparten el patrón descrito en cuanto a la temperatura media [Figura 16], aunque las proyecciones del EC-Earth (ICHEC) para la temperatura mínima no se incluyen – debido a que el promedio para el periodo histórico 1950-2004 es necesario para obtener la anomalía de temperatura. En concreto, la diferencia entre las tres temperaturas es inapreciable visualmente y tampoco se aprecian diferencias significativas cuantitativamente, en cuanto a la regresión lineal y la desviación estándar [SD]. Sin embargo, podría decirse que las temperaturas máximas y mínimas parecen describir unas proyecciones ligeramente más baja y más alta, respectivamente, en cuanto a los resultados de regresión de la temperatura media – relativo a las proyecciones del EC-Earth (BSC).

Los resultados cuantitativos para las tres variables se muestran en la Tabla 15 y Tabla 16.

En resumen, dejando de lado la posible desestabilización de las proyecciones del EC-Earth (BSC) para el escenario RCP8.5, el EC-Earth proyecta una variación en la temperatura superficial del aire (2m) en el mismo rango que ESMs similares (CanESM-2), como puede apreciarse en los análisis cuantitativos (tendencia lineal y SD). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, los índices climáticos presentados posteriormente se refieren a las proyecciones del EC-Earth (BSC). Por lo tanto, se considera la posible subestimación de los índices climáticos – en particular, de temperatura – en el caso del escenario RCP8.5. Finalmente, se demuestra como los ESMs proyectan escenarios con un incremento de temperatura en Europa durante el siglo XXI relativamente mayor en aquellos escenarios con mayores emisiones también de GHGs.

Las proyecciones para la precipitación diaria [Figura 17] describen con los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5 una tendencia ligeramente ascendente, en cuanto a la intensidad de esta

variable, durante el siglo XXI. En este caso, sin embargo, las distintas proyecciones se superponen, dificultando la diferenciación entre las mismas. Las semejanzas entre las distintas tendencias se confirman, a su vez, con estadísticos empleados (tendencia lineal y varianza).

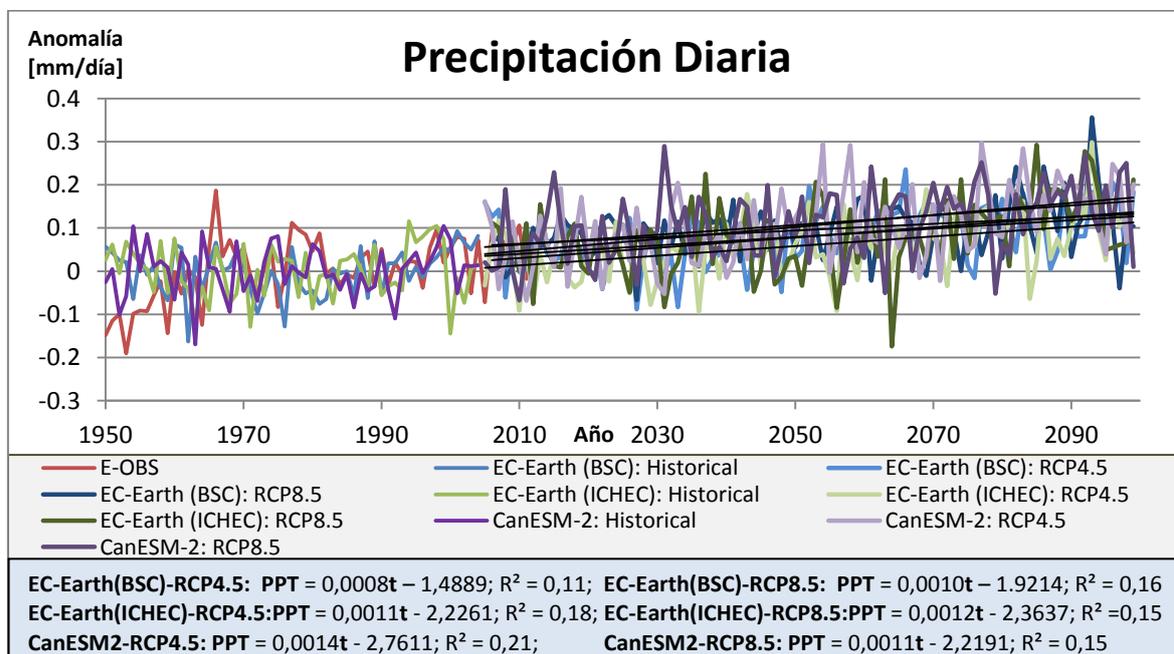


Figura 17: Anomalía de la Precipitación Diaria (PPT) en Europa [mm/día]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la precipitación diaria respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

En cuanto a la pendiente lineal de los distintos escenarios y modelos [Tabla 15], todas las proyecciones muestran una magnitud similar en cuanto al incremento en la intensidad de la precipitación, en ningún caso superior a 0.0014mm/día/año. En particular, las proyecciones del EC-Earth (BSC) muestran el menor incremento en intensidad, seguido de las proyecciones del EC-Earth (ICHEC) y CanESM-2. Por su parte, los resultados para el RCP4.5 con el modelo EC-Earth (ICHEC y BSC) muestran incrementos relativamente menores también en intensidad, en comparación con el RCP8.5 y, en contraposición, con las proyecciones para del CanESM-2. Los resultados en cuanto a la varianza de estas proyecciones [Tabla 16] coincidirían, en este caso, con las pendientes (varianza del EC-Earth (BSC) menor que en los demás casos).

En estos resultados, sin embargo, habría que tener en cuenta los problemas que muestran las proyecciones durante la evaluación del periodo histórico. Por otro lado, se requeriría de un análisis regional con el cual discernir sobre la magnitud de éste cambio – de cuyo análisis es objeto el siguiente apartado. De momento, únicamente mencionar que, algunos autores (p.ej. Tebaldi et al. 2006), sugieren que el incremento de la temperatura en la atmosfera – debido a la emisión de GHGs – es muy probable que favoreciese tanto la evaporación como la mayor capacidad de retener vapor de agua en la misma. Por lo tanto, es posible que los fenómenos extremos de precipitación se manifiesten con mayor intensidad en un escenario con una temperatura global más elevada. En este sentido, el incremento de precipitación proyectado en la Figura 17 podría estar representando este último fenómeno.

En resumen, los ESMs proyectan un ligero aumento en la intensidad de la precipitación en Europa con una magnitud similar en ambos escenarios de emisiones – RCP4.5 y RCP8.5. Estas proyecciones, sin embargo, estarían sujetas a las incertidumbres para describir los fenómenos de precipitación con los ESMs, tal y como se comentaba anteriormente (y se menciona en Dai et al. (2006)), junto a la incertidumbre asociada a las proyecciones futuras por parte de los modelos.

Por último, es necesario comentar que, al igual que las variables de precipitación y temperatura están estrechamente relacionadas en la descripción del clima global, es probable que si las proyecciones de temperatura superficial del aire (2m) del EC-Earth (BSC) – para el escenario RCP8.5 – mostrasen problemas de desestabilización, la representación de la precipitación podría estar sujeta a una inconsistencia similar.

4.2.2. ANALISIS DE ÍNDICES CLIMÁTICOS

En esta sección se analizan las tendencias globales de los índices climáticos y su variabilidad inter-anual obtenidas a partir de las proyecciones de temperatura y precipitación del modelo EC-Earth y en relación a los escenarios de forzamiento futuros RCP4.5 y RCP8.5. En este sentido, nótese que (1) el análisis de las proyecciones futuras de los índices climáticos está directamente relacionado con todos los análisis llevados a cabo con anterioridad y que (2) esta sección pretende ejemplificar la modificación en cuanto a frecuencia, intensidad y persistencia de los extremos climáticos en Europa proyectados con un modelo de última generación como es el EC-Earth. Por último, es necesario mencionar que estas modificaciones en los patrones de los extremos climáticos podrían llevar asociadas importantes consecuencias socio-económicas en la región durante el siglo XXI.

4.2.2.1. FP – Análisis Inter-anual de los Índices Climáticos: Promedio Anual

Al igual que en la sección anterior, las proyecciones inter-anales de los índices climáticos derivados de los resultados del EC-Earth se extienden hasta el año 2100, con los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. En este caso, la regresión lineal, la desviación estándar (o varianza) y el cambio relativo esperado durante los 30 últimos años del siglo XXI, son los estadísticos utilizados para evaluar las proyecciones del EC-Earth.

Las proyecciones del *Tropical Nights Index (TR20)* [Figura 18] comparten el patrón mostrado para las proyecciones de temperatura mínima [D. Figura 4] durante el siglo XXI; ambos RCPs coinciden aproximadamente, excepto en los periodos 2051-2057, 2069-2080 y 2090-2091. Las tendencias lineales muestran incrementos anuales de 0.097 y 0.158 días (de TR20) con el RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. En cuanto a la desviación estándar, el RCP8.5 prácticamente dobla el valor del RCP4.5 (3.27 vs. 6.27 días). Finalmente, se aprecia un incremento la diferencia relativa [DPE] de aproximadamente 9.6 y 15 días más de TR20 con los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente durante el último periodo del siglo XXI.

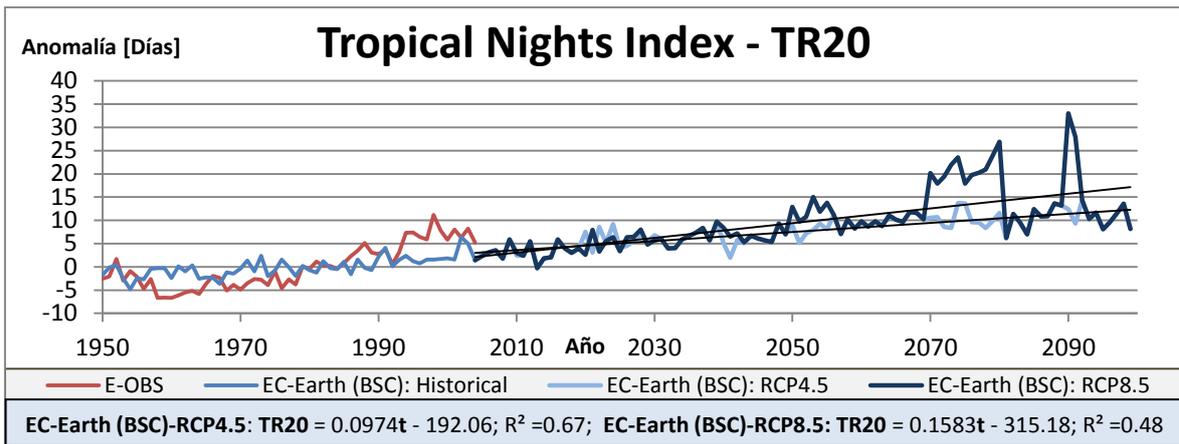


Figura 18: Anomalía del Tropical Nights Index (TR20) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del TR20 respecto al promedio global para de TR20 el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

Las proyecciones para el *Ice Days Index (IDO)* [Figura 19] durante el siglo XXI continúan con la tendencia decreciente obtenida durante el periodo histórico, sugiriendo una reducción considerable en el número de días especialmente fríos en Europa hacia finales de siglo. En este caso, ambos RCPs muestran tendencias similares, tanto en la pendiente (ligeramente más pronunciada para el RCP8.5) como en la desviación estándar (7.81 y 8.42 días para el RCP4.5 y el RCP8.5, respectivamente). La diferencia esperada para este índice respecto a los últimos 30 años del periodo histórico muestra una reducción de entre -16.5 y -18 días de IDO en Europa hacia finales de siglo, con el RCP4.5 y el RCP8.5, respectivamente.

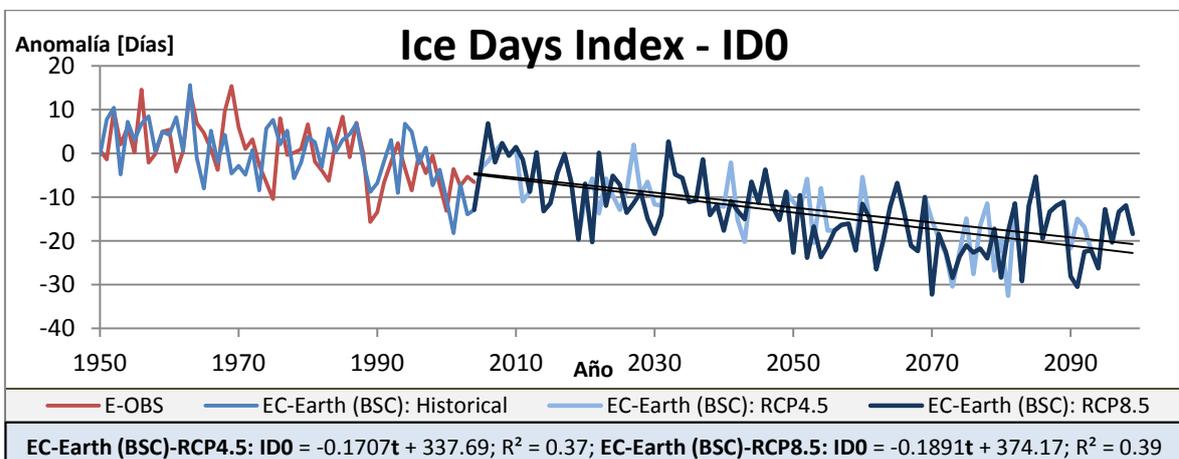


Figura 19: Anomalía del Ice Days Index (IDO) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del IDO respecto al promedio global para de IDO el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

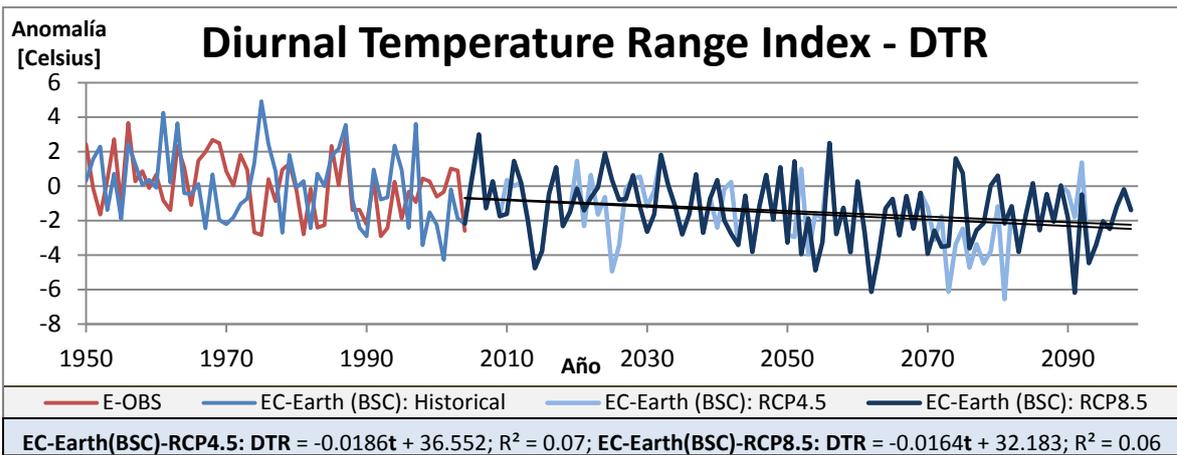


Figura 20: Anomalía del Diurnal Temperature Range Index (DTR) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del DTR respecto al promedio global para de DTR el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

El Diurnal Temperature Range Index (DTR) [Figura 20] muestra también una tendencia decreciente y superpuesta con ambos RCPs durante el siglo XXI; las proyecciones para el RCP4.5 y el RCP8.5 describen unas reducciones lineales de -0.0186 y $-0.0164^{\circ}\text{C/año}$, con unas desviaciones estándar de $+1.9$ y $+1.86^{\circ}\text{C}$, durante este periodo. En cuanto a la reducción relativa del rango de temperatura diario, se obtiene unas diferencias de entre -2.2 y -1.7°C con los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente.

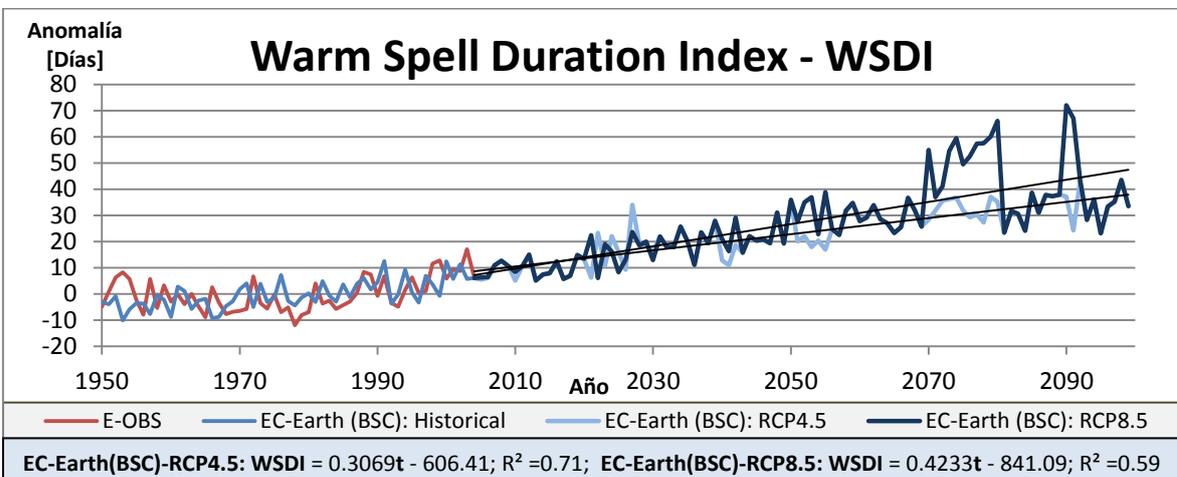


Figura 21: Anomalía del Warm Spell Duration Index (WSDI) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del WSDI respecto al promedio global para de WSDI el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

El Warm Spell Duration Index (WSDI) [Figura 21] muestra un incremento en las proyecciones durante el siglo XXI, con fluctuaciones similares en el RCP8.5 a las mostradas, tanto para el TR20, como para las variables de temperatura, durante el mismo periodo. Las pendientes muestran un incremento mayor del WSDI para el RCP8.5 durante el siglo XXI (0.31 vs. 0.42 días/año). La desviación estándar también sería más elevada en el caso del RCP8.5 ($+10$ vs. $+15.1$ días). En cuanto al cambio promedio esperado durante los últimos 30 años del siglo XXI – respecto al siglo

XX -, el RCP4.5 y el RCP8.5 muestran incrementos aproximados de +30 y +42 días, respectivamente.

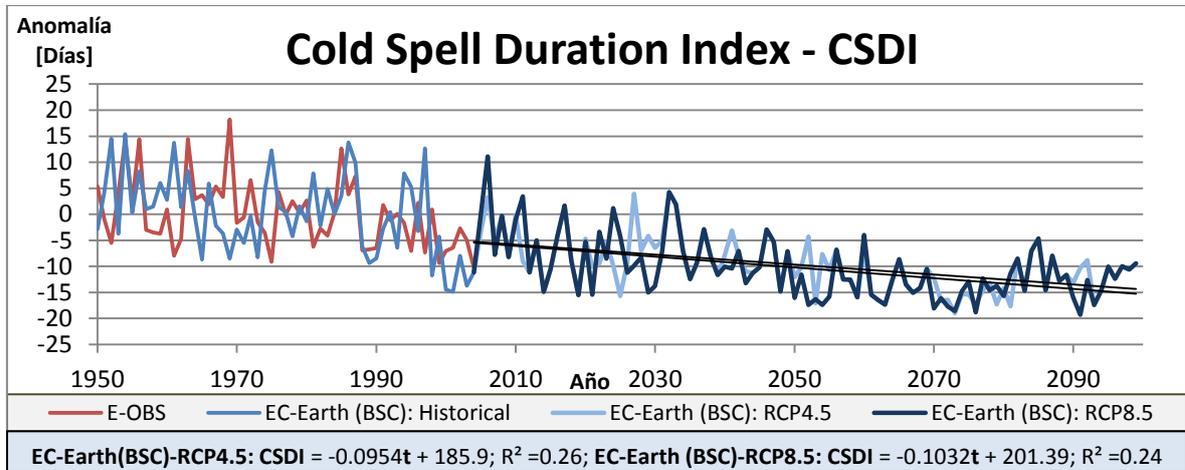


Figura 22: Anomalía del Cold Spell Duration Index (CSDI) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del CSDI respecto al promedio global para de CSDI el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

Las proyecciones para el *Cold Spell Duration Index (CSDI)* [Figura 22] muestran una reducción significativa con ambos RCPs para el periodo 2006-2100. Para este índice, los ajustes lineales son similares (pendiente de -0.095 y -0.103 días/año para el RCP4.5 y el RCP8.5, respectivamente) y también la desviación estándar y la diferencia relativa de los últimos 30 años del siglo XXI. En cuanto a este último estadístico, se observa una reducción de aproximadamente -12 días de CSDI.

Los resultados cuantitativos para los índices de temperatura superficial del aire (2m) se recogen en la Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19.

En resumen, las proyecciones futuras de los índices climáticos de temperatura superficial del aire (2m) con EC-Earth muestran variaciones tanto en la frecuencia, como en la amplitud y persistencia de los eventos climáticos de temperatura en Europa durante el siglo XXI. En concreto, atendiendo a las diferencia relativa entre las proyecciones del modelo durante los últimos 30 años del periodo histórico y futuro, los índices de temperatura (y, por lo tanto, los extremos que intentan representar) variarían en los siguientes intervalos: 9.6-15 días más de TR20, 16.5-18 días menos de ID0, 1.7-2.2°C menos de DTR, 30-41 días más de WSDI y 12 días menos de CSDI hacia el final del siglo XXI. Estos cambios son únicamente ilustrativos, pero suponen una Europa con temperaturas más elevadas y persistentes durante más tiempo, en detrimento de aquellos extremos considerados “fríos”. La magnitud de los cambios dependería, sin embargo, de la representatividad de las proyecciones por parte del modelo así como de las regiones específicas en que estos cambios tuviesen lugar.

Finalmente, es necesario mencionar que, las diferencias entre los RCPs únicamente parecen significativas en cuanto a los índices de TR20 y WSDI – donde el RCP8.5 proyecta valores superiores de estos índices en comparación con las predicciones del RCP4.5. Nótese además que, ambos índices están, por un lado, relacionados con el incremento de temperatura global en la

región y que, a su vez, comparten las tendencias mostradas en el RCP8.5 para las variables de temperatura durante el siglo XXI. Por lo tanto, es posible que si las proyecciones de temperatura del EC-Earth (BSC) mostrasen una subestimación en el caso del RCP8.5, la definición de los índices climáticos TR20 y WSDI podría contener a su vez esta imprecisión. La subestimación del RCP8.5 podría afectar también a la descripción de los demás índices de temperatura durante el siglo XXI.

En lo que respecta a los índices de precipitación, es necesario recordar que las proyecciones, tanto de las variables meteorológicas, como de los índices durante el periodo histórico, se consideran que presentan desviaciones importantes en cuanto a las observaciones. Por su parte, las proyecciones de precipitación durante el siglo XXI muestran una ligera variación en la intensidad, pero existe una incertidumbre considerable en cuanto a su representatividad que influye, a su vez, en la representación de los índices climáticos para el mismo periodo.

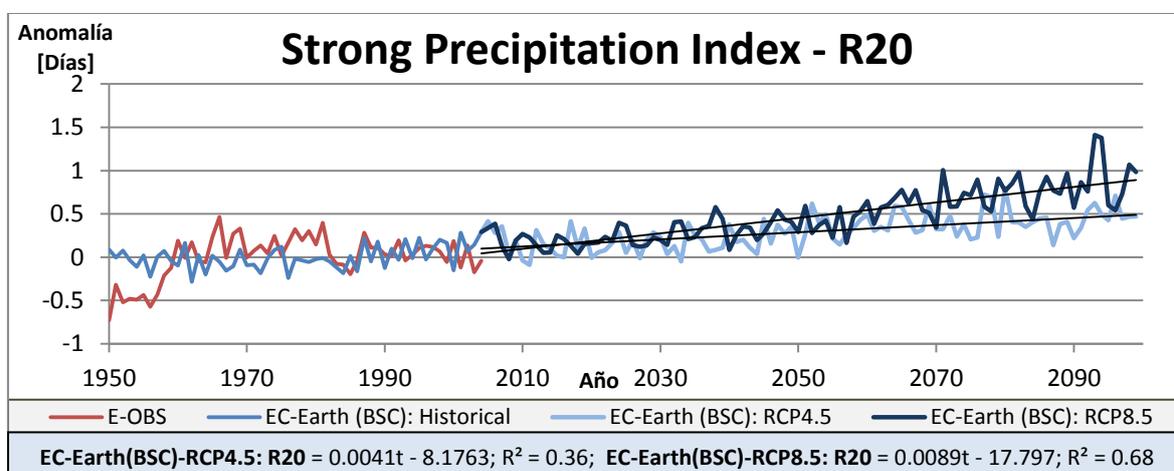


Figura 23: Anomalía del Strong Precipitation Index (R20) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del R20 respecto al promedio global para de R20 el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

Las proyecciones del *Strong Precipitation Index (R20)* [Figura 23] describen una tendencia ascendente durante el siglo XXI y más acentuada en el caso del RCP8.5; la pendiente de la regresión para el RCP8.5 dobla aquella obtenida para el RCP4.5 (0.0041 vs. 0.0089 días/año). La varianza del escenario RCP8.5, a su vez, muestra una mayor amplitud (0.037 vs. 0.09 mm/día). Finalmente, la diferencia relativa entre los 30 últimos años de cada periodo – futuro e histórico – muestra un incremento de 0.4 y 0.75 días de R20 hacia finales del siglo XXI con los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente.

En cuanto al *Simple Daily Intensity Index (SDII)* [Figura 24] se sugiere un aumento de la intensidad de la precipitación durante el siglo XXI, más acentuado en el caso de RCP8.5. Para este índice, los escenarios futuros muestran, a su vez, unos valores que prácticamente duplican con el RCP8.5 aquellos obtenidos con el RCP4.5 – tanto en las pendientes del ajuste lineal (0.0027 vs. 0.005 mm/día/año), como en la varianza (0.014 vs. 0.028 mm/día) e, incluso, en la desviación relativa promedio [DPE] durante los últimos 30 años del periodo (0.28 vs. 0.46 mm/día más hacia finales de siglo).

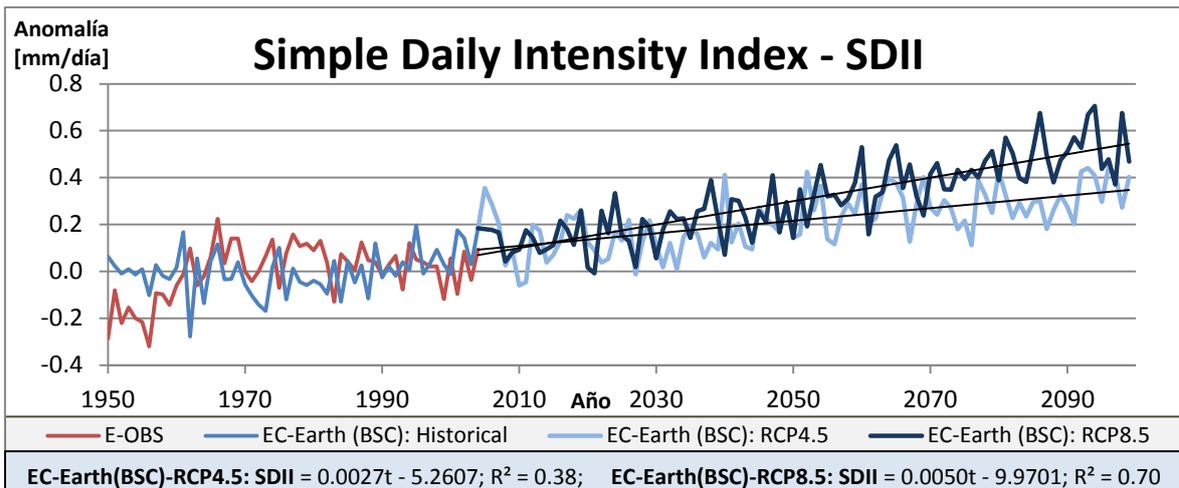


Figura 24: Anomalía del Simple Daily Intensity Index (SDII) en Europa [mm/día]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del SDII respecto al promedio global para de SDII el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

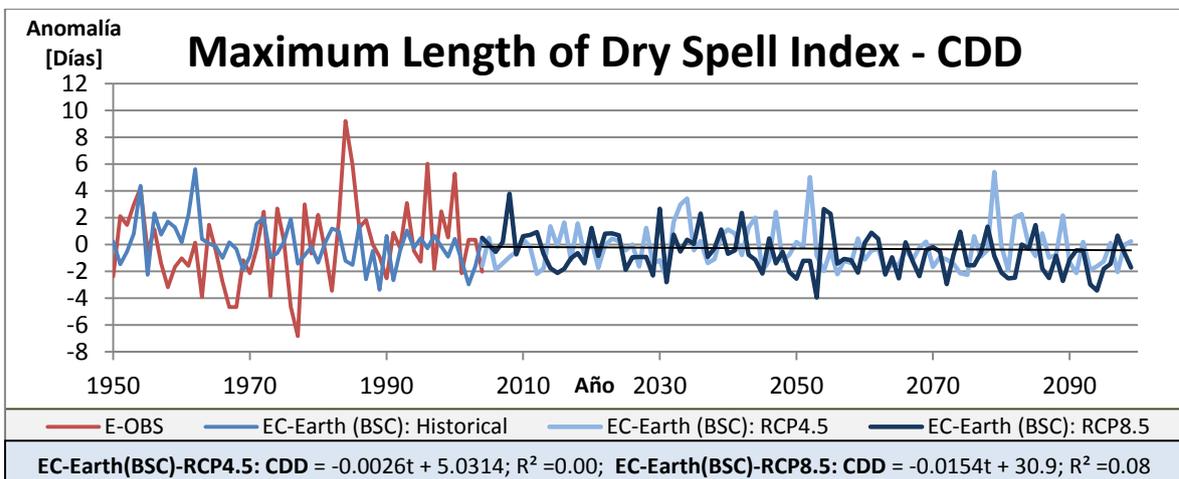


Figura 25: Anomalía del Maximum Length of Dry Spell Index (CDD) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del CDD respecto al promedio global para de CDD el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

El *Maximum Length of Dry Spell Index (CDD)* [Figura 25] describe escenarios futuros similares con ambos RCPs, pero con una tendencia decreciente ligeramente más pronunciada en el caso del RCP8.5. Así, las pendientes lineales sugieren que, los periodos sin precipitación se reducirían considerablemente en el escenario con mayores emisiones de GHGs; las pendientes del RCP4.5 y del RCP8.5 serían -0.0026 y -0.0154 días/año, respectivamente. La varianza o amplitud entre ambos escenarios sería muy similar, pero inferior a aquella amplitud descrita por las observaciones durante el periodo histórico (tal y como se aprecia directamente en la representación). Por su parte, se obtienen un incremento de 0.11 días y una reducción de 0.67 días de CDD con los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente, hacia finales de siglo XXI.

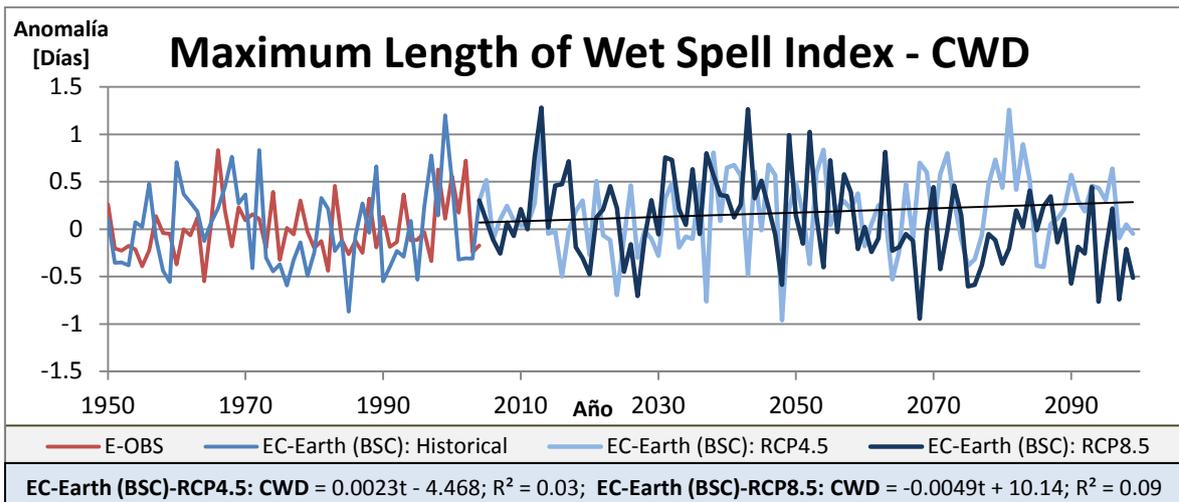


Figura 26: Anomalía del Maximum Length of Wet Spell Index (CWD) en Europa [días]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual del CWD respecto al promedio global para de CWD el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

Las proyecciones del Maximum Length of Wet Spell Index (CWD) [Figura 26] muestran una diferencia entre los RCPs, más importante hacia finales del siglo XXI. En concreto, las tendencias lineales sugieren con el RCP4.5 un ligero incremento en el número de días de CWD, en contraste con la reducción propuesta con el RCP8.5 (+0.0023 vs. -0.0049 días/año). La varianza para este índice sería ligeramente superior en el RCP8.5 (0.17 vs. 0.2 días). Finalmente, la desviación relativa confirma las diferencias entre ambos RCPs, con un incremento de 0.32 días y una reducción de 0.05 días de CWD – respecto al periodo histórico – con los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente.

En resumen, las proyecciones para los índices de precipitación muestran un posible incremento de la frecuencia e intensidad de la precipitación con ambos escenarios futuros, pero con un mayor énfasis del RCP8.5 respecto al RCP4.5. Por su parte, los índices de persistencia muestran una reducción y un aumento – tanto del número de días consecutivos secos (CDD), como de días consecutivos con precipitación (CWD) – con el RCP8.5 y el RCP4.5, respectivamente. Las variaciones proyectadas aproximadas se encontrarían en los siguientes intervalos: 0.4-0.75 días más de R20, 0.3-0.5 mm/día más de SDII, -0.67-0.11 días menos de CDD y -0.05-0.32 días de CWD (signo negativo en los índices de persistencia para un escenario con mayores emisiones de GHGs). Por consiguiente, las proyecciones RCP4.5 y RCP8.5 con el EC-Earth sugieren una Europa con precipitaciones más intensas y persistentes hacia finales del siglo XXI. La magnitud de estos extremos, sin embargo, dependería, al igual que en el caso de los índices de temperatura, de la incertidumbre inherente a estas proyecciones y de las regiones particulares donde se proyectasen los cambios, tal y como se muestra en el siguiente apartado.

4.2.2.2. FP – Análisis Zonal de los Índices Climáticos

A lo largo de esta sección se pretende, por un lado, (1) identificar aquellas regiones dentro de Europa donde las variaciones en términos de frecuencia, intensidad y persistencia de los índices climáticos tendrían una influencia relativamente mayor y, por otro lado, (2) resaltar las diferencias zonales entre las proyecciones del RCP4.5 y el RCP8.5 a lo largo del siglo XXI. En este sentido, las proyecciones futuras para los dos RCPs coinciden en algunos casos, al igual que sucedía en los análisis inter-anales de las mismas proyecciones. Sin embargo, es necesario recordar que las diferencias entre ambos escenarios podrían acentuarse si el escenario RCP8.5 contuviese algún tipo de subestimación.

Las proyecciones para el *Tropical Nights Index (TR20)* [D. Figura 6 y D. Figura 7] para el periodo 1974-2004 incluyen algunas zonas alrededor de la costa mediterránea entre aquellas áreas con mayor número de TR20. En estas zonas se observa un promedio de 30 TR20 anuales, mientras que en determinadas islas como Chipre y Creta llegan a proyectarse 110 y 140 TR20, respectivamente. El resto de Europa (coloreado en azul oscuro) no parece superar el límite de los 10 TR20 anuales. En cuanto a las proyecciones para el RCP4.5, se aprecia un avance progresivo del incremento de TR20 sobre un área que comprende la cuenca mediterránea pero también, especialmente, las cuencas del Mar Negro y Mar Caspio. En concreto, durante el periodo 2006-2036 se observa un promedio de entre 15 y 24 días más de TR20 anualmente – aproximadamente un 50% más del número de días de TR20 respecto al periodo histórico – y un promedio de 6 días más de TR20 sobre algunas zonas más alejadas. Durante 2037-2067, las áreas previamente coloreadas en azul claro muestran un cambio de color – desde verde a amarillo – lo que significa un aumento del número de días de TR20 en estas zonas. Por ejemplo, algunas zonas de la cuenca del Mediterráneo alcanzarían valores de 48 días más de TR20 por año – un 100% más aproximadamente. Para el resto de Europa no se aprecian cambios significativos. Durante el periodo 2068-2100, este índice extiende su área de influencia sobre el norte de África, pero también sobre las islas de Córcega, Cerdeña y Sicilia con alrededor de 50 días más de TR20 anualmente – un 150% más aproximadamente. La evolución de este índice con el RCP8.5 es muy similar durante los periodos 2006-2036 y 2037-2067 – únicamente se aprecia un ligero incremento en los alrededores del mar Caspio. Sin embargo, el color rojizo que se muestra durante el último periodo afecta a muchas de las áreas previamente no incluidas en el RCP4.5. Por ejemplo, la costa oeste de Francia y España, la península de Anatolia y las cuencas de Mar Caspio y Mar Negro. En términos de incremento relativo de TR20, algunas regiones de la cuenca mediterránea sobrepasarían el límite de los 60 días anuales de TR20, doblando, en algunos casos, el número de TR20 proyectado durante el periodo histórico. Por su parte, se muestra una región considerable de Europa del este en que podría superarse en algunos casos el 60% de los TR20 proyectados durante el periodo histórico. Estos resultados podrían coincidir con el incremento en los extremos de temperatura máxima y mínima que se mencionan en Orłowsky et al. (2011), donde se demuestra que existe un incremento en el índice de frecuencia de temperatura extrema en la región mediterránea hacia finales del siglo XXI.

Las proyecciones para el *Ice Days Index (IDO)* [D. Figura 8 y D. Figura 9] muestran un incremento progresivo de este índice con la latitud durante el periodo histórico 1974-2004. En concreto, se

proyectan menos de 20 días anuales de ID0 para algunas regiones alrededor de la cuenca mediterránea y valores de 200 días de ID0 para algunas zonas del norte de Europa – en particular, la península escandinava. Las proyecciones para el escenario RCP4.5 muestran una reducción en el número de ID0 anuales, con especial importancia sobre el círculo polar Ártico. Durante el periodo 2006-2036 se observa una ligera reducción en el número de días de ID0 sobre Europa central y algunas regiones como la península escandinava y los Alpes, con una reducción promedio de -20 días anuales de ID0. Durante el periodo 2037-2067, la reducción en el número de ID0, principalmente en la mitad superior de Europa, es notable siendo las regiones alpinas aquellas donde se apreciaría una reducción de aproximadamente -40% ID0 anuales. Durante el periodo 2068-2100, se proyectan reducciones considerables en el número de días de ID0 en algunas áreas al norte de Europa. Por ejemplo, en algunos puntos de las costas al noroeste del continente se muestran reducciones de alrededor de 90 días anuales de ID0 – aprox. 60% menos. Finalmente, las proyecciones para el RCP8.5 son prácticamente iguales para el periodo 2006-2036, pero, en conjunto, se aprecia una reducción más significativa en el número de días de ID0 en las mismas zonas que se mencionaban del noroeste de Europa, en comparación con el RCP4.5. Estas reducciones son especialmente importantes durante el último periodo del RCP8.5. Así, la península escandinava muestran una reducción de hasta 110 días de ID0 anuales y un incremento relativo en el área de influencia hacia finales del siglo XXI. En otras palabras, ambos RCPs proyectan hacia final del siglo XXI un escenario con menos de la mitad de días especialmente fríos en el círculo polar ártico – respecto al periodo histórico – y con un efecto considerable también en las regiones montañosas alpinas.

Las proyecciones del *Diurnal Temperature Range (DTR)* [D. Figura 10 y D. Figura 11] muestran para el periodo 1974-2004 una de las características que diferencian el clima continental y costero; mientras que en las áreas costeras – y especialmente en islas de pequeño tamaño – la amplitud diaria de temperatura es reducida, en las zonas continentales se observa una mayor variabilidad y como esta incrementa hacia las regiones de Europa central. Este comportamiento se relaciona con la capacidad de las brisas marinas para mantener la temperatura diaria dentro de un intervalo más o menos estable a lo largo del año. Se observa pues un promedio de temperatura diario de 20-30°C en las regiones costeras, mientras que en algunas zonas de Europa del Este pueden alcanzar valores superiores a los 64°C de diferencia. Para las proyecciones del RCP4.5 se aprecia una reducción y un aumento del DTR en la cuenca mediterránea y la mitad norte de Europa, respectivamente, a lo largo del siglo XXI, con un incremento también de DTR hacia el oeste del territorio. Durante el periodo 2006-2036, las región sur de la península Ibérica y la costa oeste de la península escandinava muestra un incremento de +2°C mientras pueden observarse reducciones de unos -2°C en algunas zonas de Europa del Este. Posteriormente, excluyendo la cuenca mediterránea, se aprecia una reducción de -3 a -5°C en toda la mitad noreste de Europa – con valores -7°C en las regiones de Escandinavia. Las proyecciones para el RCP8.5 muestran una variación similar a las comentadas para el RCP4.5 durante el siglo XXI. Sin embargo, el área en que se aprecia un aumento de +2°C se extiende considerablemente sobre la cuenca mediterránea, mientras las reducciones en DTR seguirían siendo significativas en la mitad norte de Europa y, en especial, en el círculo polar ártico. Las proyecciones pues sugieren que, mientras que la mitad norte y sur de Europa describirían dos escenarios distintos en cuanto a la amplitud diaria de la temperatura, con una reducción y un incremento en la misma, respectivamente, el área con un

incremento en la amplitud sería considerablemente más amplia en un escenario con una mayor emisión de GHGs. El efecto diferenciado que se aprecia con respecto a las mitades norte y sur del territorio se menciona también en Nikulin et al. (2011) donde se sugiere que “la mitad norte del territorio podría llegar a ser alrededor de 12°C más cálida en comparación con el periodo histórico”.

El *Warm Spell Duration Index (WSDI)* [D. Figura 12 y D. Figura 13] muestra durante el periodo histórico 1974-2004 un promedio de 24-26 días anuales de WSDI alrededor de la cuenca mediterránea, con Italia y Grecia superando el límite promedio de 30 días anuales. Por su parte, la costa cantábrica y los Alpes serían aquellas regiones con el menor promedio de WSDI anual – aproximadamente 12 días. Asimismo, las regiones de centro Europa, algunas regiones de las islas británicas y de la península escandinava muestran un promedio de 18 WSDI anuales encontrándose el resto de Europa entre el intervalo 20-24 días de WSDI anuales. Para este índice, las proyecciones del RCP4.5 muestran un incremento uniforme del número de días “cálidos” consecutivos en Europa durante el siglo XXI, con mayor énfasis hacia el oeste del territorio. Durante el periodo 2006-2036, las regiones al oeste de Europa y algunas regiones alrededor del Mediterráneo y la Península Escandinava muestran un incremento promedio de 20 días de WSDI anuales, mientras que la Península Ibérica mostrarían un aumento promedio de 26 WSDI – ambos periodos comprenderían aproximadamente el mismo número de días WSDI que durante el periodo histórico. Por su parte, el resto de Europa muestra un incremento promedio cercano al 50%. Durante el periodo 2037-2067, el incremento en WSDI se extiende hacia el este de Europa (con algunas excepciones) en el intervalo de 100-140% días más de WSDI. En este escenario, algunos puntos de Francia, la península ibérica y Reino Unido llegaría a alcanzarse valores superiores al 200% de los días proyectados durante el periodo histórico para el WSDI. Hacia finales del siglo XXI, el incremento promedio en la longitud de WSDI alcanzaría en zonas de Europa central y la península escandinava valores alrededor de 300% más largos. En cuanto a las proyecciones con el RCP8.5, durante el periodo 2006-2036 se muestra un área relativamente menor con un incremento promedio de 20 días de WSDI. Sin embargo, durante el periodo 2037-2067 la península ibérica e Italia se incluirían en aquellas regiones con un promedio de 40 días más de WSDI anualmente. Posteriormente, la influencia de este incremento se extendería considerablemente prácticamente en todo el territorio y, con especial influencia, en las regiones situadas más al oeste del mismo. Estas proyecciones sugieren pues que, las regiones en las que podría notarse un incremento superior del WSDI – o mayor persistencia de las temperaturas cálidas – serían aquellas cercanas al círculo polar ártico, pero también la península ibérica con incrementos, en algunos casos, de hasta el 350%. Por lo tanto, estos resultados sugieren un incremento en la longitud de los periodos “cálidos” en Europa durante el siglo XXI y, en consecuencia, una mayor probabilidad de que se mantengan durante periodos de tiempo más prolongados las olas de calor en este territorio. En esta línea, Beniston et al. (2007) menciona que “hacia finales del siglo XXI, los países de centro Europa experimentarían el mismo número de días “cálidos” que existen en la actualidad en las zonas situadas al sur de Europa”.

El *Cold Spell Duration Index (CSDI)* [D. Figura 14 y D. Figura 15] muestra para el periodo histórico 1974-2004 valores cercanos a 12 días de CSDI en algunas zonas al oeste de Europa – incluyendo las islas británicas y las penínsulas ibérica y escandinava – un promedio de 16-24 días de CSDI en

prácticamente todo el territorio. En cuanto a las proyecciones para el RCP4.5, se aprecia una reducción importante para este índice en latitudes norte pero también en la Europa central durante el siglo XXI. Durante el periodo 2006-2036 se muestra una reducción promedio de 8 días de CSDI en toda la región, afectando especialmente a los Alpes y el círculo polar Ártico, con valores cercanos a 14 días menos de CSDI – una reducción aproximada del 50%. Posteriormente estas regiones notarían una reducción progresiva durante el periodo 2037-2067 y, hacia finales de siglo predominaría un promedio de 14 días menos de CSDI en Europa y, especialmente, hacia el noroeste del continente con reducciones superiores a 24 días de CSDI anuales – reducciones aproximadas del 100%. Las proyecciones con el RCP8.5 son muy similares pero se aprecia durante los periodos 2037-2067 y 2068-2100, un incremento en la extensión en que se produciría una reducción promedio de 24 días de CSDI en zonas del círculo polar ártico, es decir, una reducción aproximada del 100% en la persistencia de los eventos considerados “fríos”. Los resultados coinciden con las proyecciones mostradas en Nikulin et al. (2011) donde se menciona que “los extremos fríos en Europa prácticamente desaparecerían hacia finales del siglo XXI”.

En resumen, el modelo EC-Earth proyecta modificaciones en la frecuencia, intensidad y persistencia de los eventos climáticos de temperatura a lo largo y ancho de toda Europa relacionadas con los forzamientos futuros del RCP4.5 y el RCP8.5. Las modificaciones, sin embargo, dependerían de la zona particular. Por ejemplo, la costa norte de Escandinavia podría experimentar una influencia significativa en cuanto a la persistencia de eventos “cálidos”, así como temperaturas considerablemente más elevadas. Además, se muestra una marcada diferencia entre las mitades norte y sur de Europa en cuanto al efecto en la modificación de los eventos climáticos extremos de temperatura, pero también entre las regiones este y oeste del territorio. En concreto, en el caso de la cuenca mediterránea se espera un incremento en el número de TR20 anuales, mientras que podría producirse una reducción en el número de IDO en las regiones comprendidas alrededor del círculo polar ártico y los Alpes. En cuanto a la variación de temperatura diaria o DTR, la mitad norte y sur de Europa podrían mostrar patrones diferenciados; un incremento alrededor de la cuenca mediterránea y una reducción (relativamente más significativa) en la mitad norte. Finalmente, se proyectan en la región al oeste de Europa – incluyendo también Escandinavia – un incremento aproximado de entre el 180 y el 350% en la persistencia de los eventos “cálidos”, en contraposición a una reducción aproximada del 100% de los eventos más “fríos”. En la Tabla 3, se presenta un resumen de los principales resultados.

Estos resultados sugieren que – a pesar de la incertidumbre asociada a las proyecciones de los índices climáticos –, la emisión a nivel global de GHGs favorecería la presencia de olas de calor con una persistencia y temperaturas relativamente más elevadas alrededor de la cuenca mediterránea con respecto a aquellas proyectadas para el periodo histórico, tal y como se menciona en Beniston et al. (2007). Por su parte, podría darse un aumento progresivo de la temperatura superficial del aire (2m), junto con una reducción en la amplitud de temperatura diaria y la persistencia de los eventos climáticos “fríos” para las latitudes altas de Europa, al igual que se propone en Nikulin et al. (2011). Por lo tanto, las proyecciones sugieren que las modificaciones en los eventos climáticos extremos de temperatura podrían afectar tanto a sociedades como a ecosistemas en toda Europa – particularmente en un escenario “intensivo” en emisiones – y con un progresivo estrés hacia final del siglo XXI.

Tabla 3: Cambios Proyectados en los Índices Climáticos de Temperatura Superficial del Aire (2m) con el Análisis Zonal del Periodo Futuro: 2066-2100.

Índice	Cambios Proyectados en los Índices hacia finales del siglo XXI
<i>Tropical Nights Index (TR20)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de TR20 en la toda la costa del Mediterráneo con el RCP4.5. • Incremento más acusado de TR20 en la cuenca Mediterránea con el RCP8.5 – mayor número de días y área de influencia – doblando en algunos casos el número de TR20 proyectado durante el periodo histórico. • El incremento de TR20 podría coincidir con los resultados de Orłowsky et al. (2011).
<i>Ice Days Index (IDO)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de IDO hacia latitudes norte y con especial importancia en el círculo polar Ártico y los Alpes con el RCP4.5. • Reducción de IDO también hacia latitudes norte y los Alpes con el RCP8.5. En este caso, la reducción del IDO sería más pronunciada – mayor número de días – en una región más extensa también del círculo polar ártico. • Ambos RCPs proyectan hacia final de siglo un escenario con menos de la mitad de días especialmente fríos en el círculo polar ártico – respecto al periodo histórico.
<i>Diurnal Temperature Range DTR</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de entre -3 a -5°C de DTR la mitad norte de Europa e incremento de +2°C en la región mediterránea y el oeste de Europa con el RCP4.5. • Con el RCP8.5 el área con +2°C de DTR alrededor del Mediterráneo se extiende considerablemente – y se muestran DTR de +3°C en algunos casos – pero continúan reducciones similares en la mitad norte de Europa. • El efecto diferenciado norte-sur en Europa se menciona también en Nikulin et al. (2011)
<i>Warm Spell Duration Index (WSDI)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de WSDI en toda Europa con el RCP4.5, más marcado hacia el oeste de la región y la península escandinava con un WSDI de entre el 200 y 300% más persistente. • Incremento del WSDI en toda Europa con el RCP8.5, con mayor número de días cálidos – en comparación con RCP4.5 – en el oeste de Europa y Escandinavia. • Los resultados podrían ser similares a los presentados en Beniston et al. (2007).
<i>Cold Spell Duration Index (CSDI)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de CSDI en toda Europa con el RCP4.5, afectando especialmente al oeste del territorio y el círculo polar ártico – reducción del 100% en CSDI. • Reducción de CSDI en toda Europa con el RCP8.5, afectando especialmente al oeste del territorio y el círculo polar Ártico pero una mayor extensión en latitudes norte en comparación con RCP4.5. • Los resultados coinciden con las proyecciones en Nikulin et al. (2011) donde los extremos “fríos” en Europa prácticamente desaparecerían hacia finales de siglo XXI.

Un análisis muy similar se lleva a cabo para los índices promedio de precipitación diaria en Europa. En este caso, sin embargo, las proyecciones estarían sujetas a una incertidumbre incluso más importante que en el caso de los índices de temperatura, como se comenta posteriormente.

En primer lugar, el índice que representa la frecuencia de los eventos de precipitación “fuertes” o *Heavy Precipitation Index (R20)* [D. Figura 16 y D. Figura 17] describe gran parte de Europa bajo el límite de los 2 días con un precipitación superior a 20 mm diarios durante el periodo 1974-2004. Las áreas que muestran valores más elevados en el número de días de R20 corresponden a las regiones oeste de las penínsulas escandinava e ibérica, junto con algunas regiones situadas bajo la influencia de los Alpes. En estas regiones, las proyecciones para el periodo histórico muestran valores en algunos casos superiores a los 11 días de R20. Las proyecciones para el RCP4.5, por su parte, muestran áreas distribuidas en toda Europa con una variación entre +1 y -1 días anuales de

R20, mostrando a su vez una modificación progresiva hacia algunas regiones alpinas con un incremento de +3 días de R20 anuales hacia finales del siglo XXI. Las proyecciones para el RCP8.5 contienen diferencias mínimas durante el periodo 2006-2036, pero ya durante el periodo 2037-2067 se muestra un área sustancialmente menor con una reducción de -1 día anual de R20. Durante este periodo, el número de días con R20 incrementaría especialmente en las penínsulas escandinava e ibérica, así como la costa este del mar Adriático – con incrementos superiores en algunos casos a los +4 días de R20 anuales. Hacia finales de siglo, la influencia de este índice se extiende en zonas de Europa central y se incrementa el número de R20 en aquellas regiones mencionadas anteriormente con, en algunos casos, hasta 5 días más anualmente de R20. En este caso, las proyecciones podrían coincidir con los resultados de Beniston et al. (2007) en que se menciona “un claro incremento de la precipitación fuerte en las zonas centrales y norte de Europa hacia finales del siglo XXI”.

El *Simple Daily Intensity Index (SDII)* [D. Figura 18 y D. Figura 19] representa un promedio de la precipitación diaria anual. En particular, algunas de las regiones en Europa con mayor índice de precipitación comprenderían – al igual que en el caso anterior – las costas oeste de las penínsulas escandinava e ibérica, el norte de Italia y la costa este del mar Adriático entre las regiones con una precipitación superior a los 8.4mm por día. En las áreas cercanas a éstas, se aprecia una reducción progresiva en la intensidad de la precipitación, mostrando valores mínimos hacia áreas de Europa del Este con valores no superiores a los 2.8 mm por día. Con las proyecciones del RCP4.5, se puede observar que existe una variación entre +0.2 y +0.6 mm/día para, prácticamente, todo el continente durante el periodo 2006-2036, mientras que se aprecia algunas regiones alrededor de la cuenca mediterránea con reducciones aproximadas de -0.2 mm/día de SDII. Durante el periodo 2037-2067, se aprecia un incremento progresivo en la intensidad de la precipitación que predominaría, a su vez, durante el último periodo del siglo XXI, cuando gran parte de Europa muestra un incremento de +0.6mm por día de SDII – aproximadamente un incremento promedio del 14% en la intensidad. Las proyecciones para el RCP8.5, por su parte, no difieren significativamente durante los periodos 2006-2036 y 2037-2067. Durante el periodo 2068-2100, sin embargo, se observan valores superiores a +1mm/día de SDII en algunos puntos de Europa – especialmente en la península escandinava – con un incremento alrededor del 20% en SDII.

La proyección histórica del *Consecutive Dry Days Index (CDD)* [D. Figura 20 y D. Figura 21] muestra Europa bajo el límite de los 10 días de CDD anuales, con excepción de algunas regiones alrededor del Mediterráneo (ej. El sur de la península ibérica), con valores de alrededor de 50 días de CDD. Para este índice, las proyecciones tanto del RCP4.5 como del RCP8.5 muestran una variación para todo el territorio de entre -5 y +10 días de CDD, pero sin mostrar un patrón de efecto claro durante el siglo XXI. Únicamente podría mencionarse que, durante el último periodo del RCP8.5, empiezan a aparecer algunos puntos de la región mediterránea con incrementos de +25 días CDD pero también una reducción de entre -10 a -15 días de CDD en la región más al este del Mediterráneo. Incluso a pesar del pequeño intervalo de variación que se describe para la mayor parte del territorio con los dos escenarios futuros, estas variaciones podrían comprender entre un cuarto y la mitad de días de CDD anuales representados durante el periodo histórico. Estos resultados sin embargo no parecen concordar con aquellos que se proponen en Orłowsky et al. (2011) donde se aprecia “un incremento en el CDD más acusado en las regiones mediterránea y

centro de Europa”.

Con el *Wet Spell Duration Index (CWD)* [D. Figura 22 y D. Figura 23] se observa, durante el periodo histórico 1974-2004, un promedio de +14 días de CWD en las regiones de Europa central. Por su parte, las costas noroeste de la península escandinava y las islas británicas alcanzarían el límite de +32 días de CWD anuales. En cuanto a las proyecciones futuras para el RCP4.5, éstas muestran un mapa disperso en que se alternan zonas en el intervalo -2 a +3 días anuales de CWD – respecto al periodo histórico. Se muestra además, un incremento progresivo en el número de días de CWD hacia la mitad norte de Europa y algunos puntos en la cuenca mediterránea con reducciones de hasta -3 días de CDD. Las proyecciones para el RCP8.5 son muy similares durante los dos primeros periodos del siglo XXI, pero se observa una extensión considerable del área alrededor de la cuenca mediterránea en que existiría una reducción de hasta -4 días anuales de CWD. Entre las regiones en que la reducción podría ser más significativa se encuentra la península ibérica, Italia y Grecia. En concreto, la reducción en el número de días de CWD podría significar el 50% de los días proyectados para el periodo histórico. Estos resultados sugieren que, existe una distinción entre la mitad norte de Europa y la cuenca mediterránea con un incremento y una reducción respectiva en cuanto a la extensión del número de CWD anual – o número de días consecutivos con precipitación mayor o igual que 1mm. Los resultados, en este caso, parecen representar en cierta medida los resultados obtenidos en estudios publicados (p.ej. Orłowsky (2011), Beniston (2007) y Heinrich (2012)) donde se mencionan reducciones significativas en la precipitación en la región mediterránea durante el siglo XXI.

En resumen, el modelo EC-Earth predice modificaciones en los patrones de frecuencia, intensidad y persistencia de los índices climáticos de precipitación con los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5. En concreto, se observan cambios en el número de días con R20, principalmente alrededor de los Alpes y la península escandinava con incrementos cercanos al 50%. El índice de intensidad de la precipitación, SDII, muestra un posible incremento promedio del 14% en toda la región y superior al 20% en la península escandinava. Por su parte, el índice CDD varía entre -5 días y +10 días en toda Europa (intervalo 20-50%) mientras que el índice CWD definiría un incremento y una reducción en los días consecutivos con precipitación para la mitad norte y sur de Europa durante el siglo XXI. En cuanto a los diferentes escenarios de emisiones, RCP4.5 y RCP8.5, las proyecciones sugieren en algunos casos diferencias. En concreto, en ambos escenarios se proyectan incrementos, tanto en la intensidad como en la frecuencia de la precipitación – particularmente en la península escandinava –, con un especial énfasis en el caso del RCP8.5. La persistencia de los periodos secos podría mantenerse más o menos estable en la mayor parte del territorio. Sin embargo, es conveniente resaltar que durante el último periodo del escenario RCP8.5 para el índice CDD se apreciaba una diferencia sustancial en el número de días de CDD descritos para la península ibérica. Finalmente, los periodos prolongados con precipitación podrían reducirse (tanto en longitud como en extensión) alrededor de la cuenca mediterránea en un escenario con mayores emisiones de GHGs y, en contraste, con el aumento relativo que proyecta el EC-Earth en la mitad norte de Europa para éste índice. En la Tabla 4, se encuentra un resumen de los principales resultados.

Tabla 4: Cambios Proyectados en los Índices Climáticos de Precipitación Diaria con el Análisis Zonal del Periodo Futuro: 2066-2100.

Índice	Cambios Proyectados en los Índices hacia finales del siglo XXI
<i>Heavy Precipitation Index (R20)</i>	<ul style="list-style-type: none"> El RCP4.5 muestran una variación entre +1 y -1 días de R20 en Europa y un incremento de +3 días de R20 en los Alpes. El RCP8.5 muestra prácticamente toda Europa con un incremento de entre +1 y +4 días de R20. Los resultados de Beniston et al. (2007) mencionan un incremento de la precipitación fuerte en las zonas centrales y norte de Europa.
<i>Simple Daily Intensity Index (SDII)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Incremento de +0.2 y +0.6 mm/día de SDII con RCP4.5, más apreciado en Europa central. Incremento de +0.4 y +1.0 mm/día de SDII con RCP8.5, más apreciado en Europa central y Escandinavia.
<i>Consecutive Dry Days Index (CDD)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Variación de entre -5 y +10 días de CDD en Europa con RCP4.5 – sin un patrón claro. Variación de entre -5 y +10 días de CDD en Europa con RCP8.5 – muy similar a RCP4.5 –, pero el Mediterráneo muestra algunos puntos dispersos de +25 días CDD (p.ej. IP) Estas variaciones comprenderían entre un cuarto y la mitad de días de CDD anuales representados durante el periodo histórico. En Orłowsky et al., (2011) se aprecia un incremento en el CDD, particularmente en las regiones mediterránea y centro de Europa.
<i>Wet Spell Duration Index (CWD)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Se alternan zonas entre -2 y +3 días anuales de CWD con RCP4.5. Las zonas con -2 días de CWD se concentran en el Mediterráneo. Se muestra la cuenca mediterránea con una reducción de -3 a -4 días de CWD con RCP8.5, mientras que las proyecciones en el norte sería similares al RCP4.5. Esta distinción norte-sur en Europa con un incremento y una reducción de CWD se menciona en otros estudios (p.ej. Orłowsky (2011)).

Estos resultados permiten hacerse una idea de cómo los eventos de precipitación extremos podrían modificarse a lo largo del siglo XXI y quizá discernir sobre los efectos socio-económicos que podrían asociarse a su modificación. En concreto, los resultados sugieren que, mientras los eventos de precipitación intensa podrían incrementarse en latitudes norte – favoreciendo episodios de inundaciones –, en la cuenca del mediterráneo podrían darse periodos relativamente más prolongados de sequías. Por lo tanto, estos cambios en los patrones de los eventos climáticos de precipitación podrían suponer un efecto directo en los ecosistemas y recursos hídricos a lo largo y ancho de toda Europa.

Los resultados para los índices de precipitación diaria, sin embargo, no parecen capturar las diferencias significativas en cuanto a las regiones particulares norte-sur tal y como se menciona en estudios publicados. Por ejemplo, el incremento en intensidad que aprecia en latitudes norte en Orłowsky et al. (2011) o el patrón que se define en la región mediterránea en Heinrich et al. (2012), en cuanto al incremento de los periodos secos. En este sentido, únicamente el índice CWD con el escenario RCP8.5 parece capturar esta diferencia norte-sur apreciablemente. La explicación podría deberse a que los estudios publicados analizados utilizan en la mayoría de casos modelos distintos (p.ej. modelos regionales, RCM) y/o escenarios futuros distintos (relativamente más antiguos o no directamente comparables). Sin embargo, la explicación más plausible para estas

diferencias se relacionarían con la imposibilidad de los modelos globales para representar los fenómenos de precipitación tal y como se menciona el IPCC [AR4-WGI (2007) y AR5-WGI (2013)] y en Dai et al. (2006). Esta limitación se relacionaría con las restricciones computacionales y la parametrización que debe implementarse para simplificar algunos de los procesos climáticos en los ESMs. Particularmente, la precipitación es un fenómeno marcadamente local-regional y no puede decirse que el EC-Earth conseguiría una representación suficientemente exacta con las proyecciones analizadas en este trabajo en comparación con estudios publicados.

Se concluye pues que, todavía existen deficiencias en cuanto a la descripción de la precipitación diaria y sus índices con el EC-Earth, en contraste con la descripción de la temperatura superficial del aire (2m) y sus índices que sí podrían considerarse aceptables para una región tan grande como es Europa.

5. CONCLUSIONES

El principal objetivo de éste Trabajo Final de Máster (TFM) ha sido evaluar la capacidad del modelo EC-Earth – un “Earth System Model” basado en el concepto de “Seamless Prediction” – para representar los índices climáticos en Europa durante el periodo histórico 1950-2004 y el análisis de las proyecciones futuras de los mismos índices durante el siglo XXI. En otras palabras, con el objetivo de discernir sobre las modificaciones que se podrían apreciar en las proyecciones futuras de los índices y extremos climáticos en Europa durante el periodo 2006-2100, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo previo de las variables meteorológicas de temperatura del aire superficial (2m) y de precipitación diaria, así como los índices climáticos derivados de las mismas, durante el periodo histórico 1950-2004, para evaluar su representatividad con respecto a las observaciones.

El modelo representa los índices de temperatura superficial del aire (2m) adecuadamente durante el periodo histórico (1950-2004), aunque se aprecian también algunas incertidumbres en cuanto a la descripción de los mismos. Estas incertidumbres se asocian a las proyecciones originales de temperatura superficial del aire (2m) (p.ej. representando mejor la temperatura mínima que la temperatura máxima), a la parametrización, al proceso de “remapeo” de la malla del modelo (a una malla considerablemente más fina), así como a la modificación de estos datos mediante la implementación de los índices climáticos. Sin olvidar, también, las incertidumbres que se incluyen en cuanto a la homogeneidad espacial de las observaciones. Otras fuentes de error podrían deberse a las fuentes de incertidumbre inherentes al proceso de modelización climática como, por ejemplo, forzamientos climáticos, “tuneo”, etc.

Los índices de precipitación diaria, sin embargo, no parecen representarse tan adecuadamente como los índices de temperatura. La razón se debe a una captura pobre de los fenómenos de precipitación debida, principalmente, a la parametrización de los mismos en el EC-Earth – con el fin de salvar las restricciones computacionales –, junto todas las incertidumbres inherentes al proceso de modelización que se han comentado para el caso de los índices de temperatura (p.ej. adaptación de la malla, implementación de los índices, homogeneidad de las medidas, etc.).

Por lo tanto, incluso tratándose de un modelo de última generación en la descripción del clima, se sugiere una continuación en cuanto al desarrollo del mismo con el objetivo de mejorar en la medida de lo posible sus proyecciones climáticas – particularmente de precipitación – y con ello incrementar la fiabilidad en cuanto a las proyecciones futuras. En esta línea, la versión del EC-Earth2.3 con la cual se han obtenido las proyecciones de temperatura superficial del aire (2m) y precipitación diaria analizadas en este trabajo, incluye únicamente las componentes atmosférica y oceánica. Sin embargo, próximas versiones pretenden desarrollar el modelo incluyendo, por ejemplo, los módulos de química atmosférica, biogeoquímica de los océanos y modelos dinámicos del suelo.

Las principales conclusiones obtenidas en el apartado de la evaluación del modelo durante el periodo histórico 1950-2004 son las siguientes:

- A) Las proyecciones del EC-Earth para las variables meteorológicas de temperatura superficial del aire (2m) promediadas anualmente se consideran mejor representadas que la precipitación diaria en Europa durante el periodo 1950-2004. En concreto, todos estadísticos son más aproximados a las observaciones en el caso de la temperatura (Correlación, Regresión y SD). Las condiciones iniciales implementadas en el modelo EC-Earth (BSC vs. ICHEC), por su parte, muestran poco efecto en el resultado de las proyecciones para Europa. La parametrización, la resolución y el “remapeo”, en este caso, serían los factores que influyen más significativamente en las diferencias entre las proyecciones del EC-Earth y las observaciones.
- B) La evaluación estacional muestra, con el análisis de la correlación y la regresión, que las estaciones “mejor” y “peor” representadas son primavera (MAM) y otoño (SON), respectivamente. Con la SD (o varianza) se observa, sin embargo, una mayor dispersión en cuanto a la variabilidad interanual de las cuatro estaciones y cuatro variables meteorológicas analizadas. Los resultados confirman aquellos resultados mencionados en el apartado anterior – a pesar de que algunos estadísticos para la precipitación muestran una magnitud similar a las variables de temperatura.
- C) La evaluación zonal de las variables durante el periodo histórico demuestra que la temperatura superficial se sobreestima, en general, en aquellas regiones de elevada altitud y se subestima en las regiones cercanas. La razón se atribuye tanto a la menor resolución, como a la topografía del modelo (suavizada), así como al proceso de “remapeo” de los datos. Las temperaturas se subestiman, además, alrededor de la cuenca mediterránea, mientras que se sobreestiman en la mitad norte de Europa – particularmente la temperatura mínima –, lo que podría relacionarse también con el “remapeo” o algún otro proceso que no se analiza en este trabajo (p.ej. “tuneo” del modelo). La precipitación, por su parte, se sobrestima en todo el territorio, en contraposición a la subestimación observada en los análisis temporales, aunque se captura adecuadamente en regiones con una orografía compleja (p.ej. los Alpes).
- D) La evaluación de los índices climáticos muestra un bias (%) bajo para los índices de temperatura – con la relativa excepción del TR20. En cuanto a los demás estadísticos, la representación es bastante aproximada para todos los índices de temperatura – aun con algunas excepciones (p.ej. correlación en DTR). Para los índices de precipitación, el bias (%) muestra desviaciones ligeramente mayores que en el caso de la temperatura – especialmente en el R20 – al igual que los demás estadísticos analizados (p.ej. varianza del CDD). En resumen, la implementación de los índices climáticos en los datos originales de proyecciones y observaciones modifica tanto los datos de partida como los estadísticos que los representan – obteniéndose mejoras en algunos casos. Sin embargo, se sugiere la implementación de estos índices como una nueva fuente de incertidumbre en cuanto a la comparación entre observaciones y proyecciones.

En resumen, las fuentes de error que explicarían la incertidumbre o diferencias entre las proyecciones del EC-Earth respecto a las observaciones se deben a (1) la parametrización utilizada para aproximar procesos importantes (p.ej. la nubosidad, convección, etc.) – y que influirían significativamente en la representación de la precipitación –, (2) la limitada resolución del modelo, (3) el método de “remapeo” de la malla del mismo, ya que se introduce una resolución artificial – y, por lo tanto, una fuente de incertidumbre – en los resultados (particularmente en las zonas de orografía compleja) y, finalmente, (4) la poca homogeneidad de las observaciones sobre amplias regiones del territorio, lo que afectaría al promedio global y, por lo tanto, a los estadísticos (p.ej. correlación). Finalmente, el EC-Earth puede considerarse que describe adecuadamente los índices de temperatura superficial del aire (2m) en Europa durante el siglo XX. En contraste, los índices de precipitación diaria presenta desviaciones más importantes – en relación a los de temperatura – durante el periodo histórico. Por lo tanto, las proyecciones futuras de los índices climáticos podrían considerarse más representativas en el caso de la temperatura que en el caso de la precipitación.

Por su parte, las principales conclusiones obtenidas en apartado del análisis de las proyecciones futuras son:

- E) Las proyecciones futuras de la temperatura superficial del aire (2m) con EC-Earth (BSC) sugieren aumentos de entre 2.2°C y 3.2°C (derivados de la regresión lineal) en Europa durante el siglo XXI en un escenario “intermedio” e “intensivo” en emisiones, respectivamente. Sin embargo, las proyecciones del EC-Earth (BSC) muestran un incremento de menor magnitud en cuanto a otras proyecciones – particularmente en el caso del RCP8.5 (el cual podría mostrar algún tipo de inconsistencia atribuible a una desestabilización en el proceso de cálculo del modelo). En cuanto al incremento en la intensidad de la precipitación, las proyecciones de ambos RCPs en el EC-Earth (BSC) coinciden durante el siglo XXI, con un incremento no superior a 0.10mm/día hacia finales del siglo. Las proyecciones del EC-Earth (BSC), en este caso, coinciden con los demás conjuntos de datos analizados, tanto en la pendiente de la regresión lineal como en la varianza.
- F) Las proyecciones temporales futuras de los índices de temperatura superficial del aire (2m) muestran modificaciones tanto en la frecuencia, como en la amplitud y la persistencia de los eventos climáticos en Europa durante el siglo XXI. En resumen, se proyectan modificaciones en los intervalos: 9.6-15 días más de TR20, 16.5-18 días menos de ID0, 1.7-2.2°C menos de DTR, 30-40.6 días más de WSDI y 12 días menos de CSDI hacia finales del siglo XXI. Estos resultados podrían significar una Europa con temperaturas más elevadas y más persistentes – en el conjunto del territorio –, en detrimento de los extremos más fríos. Además, se observan diferencias en las proyecciones del TR20 y WSDI en cuanto a ambos RCPs – particularmente incrementando su efecto en un escenario “intensivo” en emisiones. Las variaciones proyectadas aproximadas con los índices de precipitación diaria se encuentran en los siguientes intervalos: 0.4-0.75 días más de R20, 0.3-0.5 mm/día más de SDII, -0.67-0.11 días menos de CDD y -0.05-0.32 días de CWD (signo negativo en los índices de persistencia para un escenario con mayores emisiones de

GHGs) hacia finales del siglo XXI. Por lo tanto, las proyecciones en los índices de frecuencia e intensidad de precipitación diaria sugieren una Europa con precipitaciones más intensas durante el siglo XXI, y más acentuadas en el caso del RCP8.5. En cuanto a los índices de persistencia, los periodos continuos secos y con precipitación podrían reducirse e incrementarse con un escenario “intensivo” y un escenario “intermedio” en emisiones de GHGs, respectivamente, durante el siglo XXI. El efecto en cuanto a la modificación de todos estos índices depende, sin embargo, de la región particular donde se estudian. Los índices de precipitación, además, podrían estar marcados por una incertidumbre considerable en algunos casos.

- G) El análisis zonal de los índices de temperatura sugiere dos zonas diferenciadas norte-sur en Europa, pero también diferencias este-oeste en cuanto al cambio proyectado en los mismos. En el caso de la región mediterránea, se sugiere una mayor persistencia y temperaturas también más elevadas de los eventos “cálidos” – particularmente hacia el oeste del territorio. En cuanto a la mitad norte del territorio, se aprecia una reducción de los eventos climáticos más “fríos”, tanto en intensidad como en persistencia, que se apreciarían también, con mayor intensidad, hacia el oeste de Europa. La magnitud de estos cambios, además, es más importante en un escenario “intensivo” en emisiones de GHGs. Por su parte, las proyecciones de los índices de precipitación muestran un incremento en la frecuencia e intensidad de la precipitación en las latitudes norte y el centro de Europa, mientras que los índices de persistencia no muestran un patrón de cambio claro. Únicamente puede decirse que los periodos húmedos se reducen y se incrementan en las regiones sur y norte de Europa, respectivamente, en el escenario RCP8.5. Estos resultados, sin embargo, podrían ser objeto de una incertidumbre considerable, especialmente si se comparan con estudios publicados, en los que se aprecia más claramente la distinción norte-sur.

Para terminar, las incertidumbres derivadas del análisis – en conjunto – no permiten hacer predicciones fiables sobre los efectos concretos que podrían darse en Europa hacia finales del siglo XXI (en un escenario con emisiones crecientes de GHGs). Sin embargo, parece claro que el incremento de temperatura superficial del aire (2m) durante el periodo histórico se captura adecuadamente con los “Earth System Models” (ESMs) y, que las proyecciones futuras indican que la temperatura superficial del aire en Europa continuará aumentando – lo que podría influir a su vez en los patrones de los eventos climáticos extremos. Por lo tanto, la emisión de GHGs a la atmosfera a nivel global podría suponer un efecto directo sobre las sociedades y ecosistemas en Europa.

Con todo lo anterior, continuar con la investigación sobre el cambio climático es esencial con el fin de minimizar el estrés ocasionado por los eventos climáticos extremos en Europa – y las posibles consecuencias desastrosas asociadas a los mismos. En esta línea, a pesar de que podrían darse algunos cambios beneficiosos asociados al cambio climático, numerosos estudios publicados mencionan que el cambio climático global podría suponer pérdidas sin precedentes en la biodiversidad y ecosistemas de todo el mundo, por una combinación de los efectos del cambio climático (p.ej. sequías, inundaciones, incendios, acidificación de los océanos, etc.) junto con la

influencia de otros drivers humanos (p.ej. la contaminación, la fragmentación de los ecosistemas, la sobreexplotación de los recursos, etc.). En cualquier caso, una mitigación temprana podría reducir pérdidas considerables – tanto socioeconómicas como en biodiversidad – mientras continúa el esfuerzo para entender y adaptar las sociedades al cambio climático.

Vicente Pastor Poquet

Máster en Ingeniería Ambiental

UPC – Universitat Politècnica de Catalunya

Febrero de 2014

REFERENCIAS

- Arguez, A. (2011) The Definition of the Standard WMO Climate Normal: The Key to Deriving Alternative Climate Normals. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 699–704.
- Alexander, LV. et al. (2006) Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysics Res.* 2006, 111:D05109. doi: 10.1029/2005JD006290.
- Baldasano, J.M. (2011) Curso de Modelización Ambiental. Laboratorio de Modelización Ambiental. UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (SPAIN).
- Beniston, M. (2007) Future Extreme Events in European Climate: An Exploration of Regional Climate Model Projections. *Climatic Change* (2007) 81:71–95. DOI 10.1007/s10584-006-9226-z
- Brandt, M. (2010) EC-Earth: IS-ENES European Network Infrastructure for Earth System Modeling
- BSC, Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación. Website: <http://www.bsc.es/>
- CCCMA, the Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Website: <http://www.cccma.ec.gc.ca/>
- CDO (2009) Climate Data Operators: User’s Guide. Version 1.4.1.
- CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project. Website: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>
- Comiso, J. C. (2006) Arctic warming signals from satellite observations, *Weather*, 61, 70–76, doi: 10.1256/wea 222.05.
- Comiso, J. C. (2010), *Polar Oceans From Space*, 507 pp., Springer, New York.
- CRU - Climate Research Unit, University of East Anglia. Website: www.cru.uea.ac.uk
- Dai, A. (2006): Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models. *J. Climate*, 19, 4605-4630.
- EC-Earth Home Page: <http://eearth.knmi.nl/>
- E-OBS Gridded Dataset. Website: <http://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>
- ENSEMBLES Project. Website: <http://www.ensembles-eu.org/>
- ETCCDI, Expert Team on Climate Change Detection and Indices. Website: <http://www.clivar.org/organization/etccdi/etccdi.php>
- GHCN, Global Historical Climatology Network. NOAA, US. Website: www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/
- Giorgi F, Lionello P (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Glob Planet Change* 63(2–3):90–104. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

GISS, NASA Goddard Institute for Space Studies. Website: www.giss.nasa.gov

Haylock, M. (2008) A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, **113**, D20119, doi:10.1029/2008JD10201"

Hazeleger, W. (2010) EC-Earth: A Seamless Earth-System Prediction Approach in Action. American Meteorological Society. DOI:10.1175/2010BAMS2877.1

Heinrich, G. (2012) The future of dry and wet spells in Europe: a comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models. *Int. J. Climatol.* **32**: 1951–1970 (2012) DOI: 10.1002/joc.2421

IPCC, Intergovernmental Panel for Climate Change. Website: <http://www.ipcc.ch/>

IPCC, Fourth Assessment Report (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.

IPCC, Fourth Assessment Report (2007) Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC, Fourth Assessment Report (2007) *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jones, P. (1997) A User's Guide for SCRIP: A Spherical Coordinate Remapping and Interpolation Package. Version 1.4. Copyright © 1997, 1998 the Regents of the University of California.

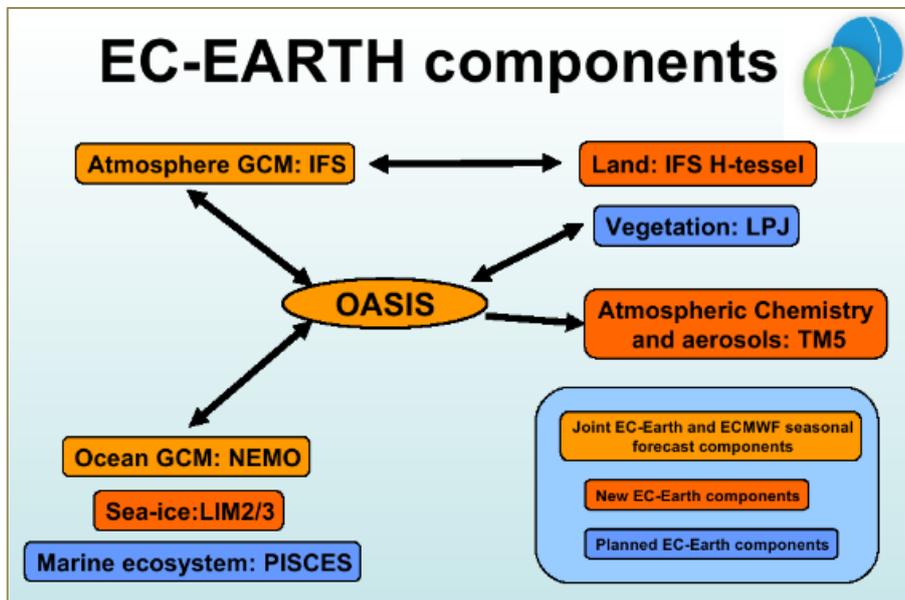
Kharin, V. V., Zwiers F. W., Zhang X. and Hegerl, G. C. 2007. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *J. Clim.* **20**, 1419–1444.

- Klein, T. (2009) Guidelines of Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation. World Meteorological Organization (WMO)
- Moss, R. (2008) Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts. IPCC, Geneva, ISBN: 978-92-9169-124-1.
- NCL, NCAR Command Language Website: <http://www.ncl.ucar.edu/>
- Orlowsky, B. & Seneviratne, S. (2011) Global changes in extreme events: regional and seasonal dimensión. Climatic Change. DOI 10.1007/s10584-011-0122-9
- Rhode, R., D. Brillinger, J. Curry, D. Groom, R. Jacobsen, R.A. Muller, S. Perlmutter, A. Rosenfeld, C. Wickham, J. Wurtele (2011), Berkeley Earth Temperature Averaging Process, submitted to Econometrics.
- Tebaldi, C. (2006) Going to the Extremes. An Intercomparison of Model-Simulated Historical and Future Changes in Extreme Events. Climatic Change (2006). DOI: 10.1007/s10584-006-9051-4.
- Van Vuuren (2008) Work Plan for Data Exchange Between the Integrated Assessment and Climate Modelling Community in Support of Phase-0 of Scenario Analysis for Climate Change Assessment (Representative Community Pathways), s.l.: s.n.
- Van Vuuren, D. (2009) RCP Extension Paper, s.l.: s.n.
- Wilks, D. (2006) Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition. ISBN 13: 978-0-12-751966-1. Elsevier Inc. All rights reserved.
- WMO, World Meteorological Organization. Includes GAW, Global Atmospheric Watch, Research and Monitoring Reports. Website: www.wmo.int
- Zhang, X. (2011) Indices for Monitoring changes in Extreme Based on Daily Temperature and Precipitation Data. WIREs Clim Change 2011. doi: 10.1002/wcc.147

ANEXO A: Modelo y Recursos Computacionales

A.1. EC-Earth V2.3: Seamless Earth-System Prediction

El modelo EC-Earth es un “Earth System Model” (ESM) – o un modelo perfectamente acoplado – de Atmosfera-Océano-Suelo-Biosfera desarrollado para el estudio y la predicción climática y basado en el concepto de “Seamless Prediction” (Bandt et al., 2010). Este modelo fue desarrollado – y es normalmente actualizado – por un consorcio de 22 centros de investigación procedentes de 10 países europeos. Entre estas instituciones se incluye el *Barcelona Supercomputing Center (BSC)* y “the *Irish Center for High-End Computing*” (ICHEC), algunos de cuyos resultados se presentan en este trabajo.



A. Figura 1: Componentes del EC-Earth. Fuente: Brandt et al. (2010).

La versión actual del EC-Earth es la versión 2.3 y consiste principalmente en dos componentes: un modelo de Atmosfera, Superficie Terrestre y Vegetación, junto con un modelo de Océano y Cubiertas de hielo acoplados. A su vez, estos dos sistemas principales consisten en varios subcomponentes desarrollados para la representación de procesos climáticos físicos, biológicos y geoquímicos extremadamente complejos. Ambos modelos comunican , a través del acoplador OASIS-3. El sistema se ilustra esquemáticamente en la [A. Figura 1].

La parametrización en el esquema anterior (p.ej. para la nubosidad, precipitación y descripción de la turbulencia) se implementa en una malla Gaussiana “reducida” correspondiente a un espaciado de 1.125° (http://badc.nerc.ac.uk/data/ecmwf-op/grids.html#n80_reduced). Esta versión incluye a su vez algunas mejoras con respecto a versiones anteriores como, por ejemplo, un tratamiento avanzado de la interacción de la nubosidad, mejoras en el procedimiento de “tuneo”, modificaciones en las cubiertas de nieve y hielo debido a la sublimación y al deshielo, así como una representación exhaustiva de la química troposférica y aerosoles, etc. Además, el modelo permite implementar toda una serie de condiciones de contorno para representar las diferentes

facetas del sistema climático y que a su vez pueden utilizarse para llevar a cabo proyecciones del clima futuro como emisiones de GHGs, aerosoles (incluyendo naturales y antropogénicos), modificaciones en la cubiertas de vegetación y forzamiento solar en el planeta Tierra. En particular, la división de los aerosoles entre naturales y antropogénicos permite también llevar a cabo simulaciones en cuanto al periodo pre-industrial y en cuanto a las condiciones actuales y con ello estudiar y comprender el efecto de los mismos en el clima global.

Finalmente, este modelo se considera en Hazeleger et al. (2010) como “un Earth System Model capaz de describir adecuadamente el promedio del clima global tanto para la escala temporal diaria como para la escala inter-anual e incluso las modificaciones del clima durante periodos especialmente prolongados”.

A.2. Recursos Computacionales

La complejidad del modelo EC-Earth requiere de una capacidad computacional elevada con la que llevar a cabo las simulaciones que no habría sido posible sin el supercomputador MareNostrum que alberga el BSC-CNS (<http://www.bsc.es/marenostrum-support-services>). Este superordenador es, sin duda, el más rápido de España y se sitúa en el puesto 29 en la lista TP500 de supercomputadoras más rápidas del mundo (Junio 2013).



- Peak Performance of 1,1 Petaflops
- 100.8 TB of main memory
- Homogeneous Nodes
 - 3,056 compute nodes
 - 2x Intel SandyBridge-EP E5-2670/1600 20M 8-core at 2.6 GHz
 - 8x4GB DDR3-1600 DIMMS (2GB/core)
- Heterogeneous Nodes
 - 42 heterogeneous compute nodes
 - 2x Intel SandyBridge-EP E5-2670/1600 20M 8-core at 2.6 GHz
 - 2x Xeon Phi 5110 P
 - 8x8GB DDR3-1600 DIMMS (4GB/core)
- 2 PB of disk storage
- Interconnection networks:
 - Infiniband FDR10
 - Gigabit Ethernet
- Operating System: Linux - SuSe Distribution

A. Figura 2: Detalle del Supercomputador MareNostrum y sus Componentes Principales.

Con la última actualización (2012-2013), el MareNostrum tiene un rendimiento pico de 1,1

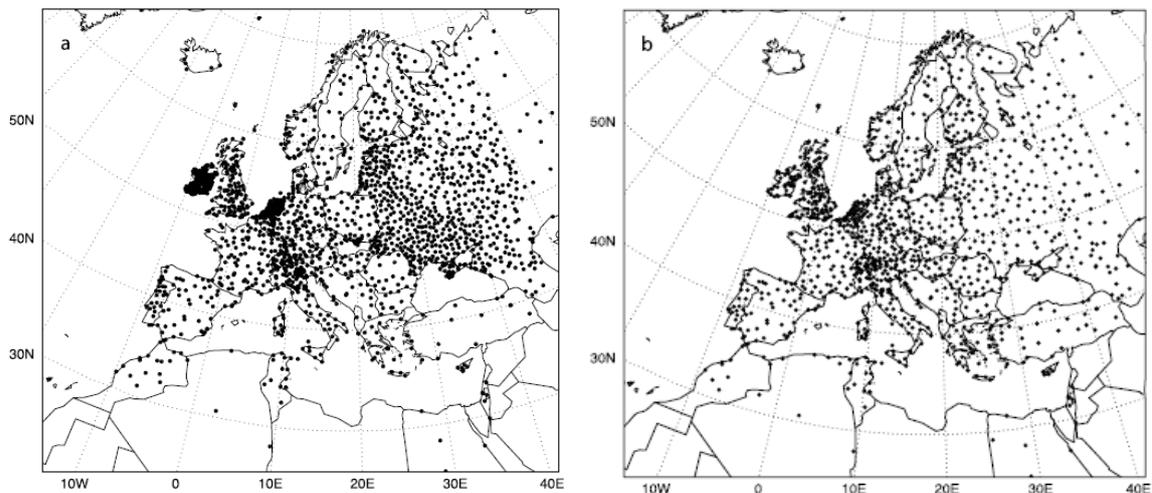
Petaflops, que se obtienen con unos 48.896 procesadores Intel Sandy Bridge disponibles en 3056 nodos y 84 coprocesadores Xeon Phi 5110P disponibles en 42 nodos. Además, el MN cuenta con más de 100,8 TeraBytes de memoria principal y 2 PetaBytes de almacenamiento en disco GPFS.

Incluso con estos recursos computacionales, las simulaciones del EC-Earth requieren de aproximadamente unas 10 horas de computación del MareNostrum por año de simulación – utilizando 64 procesadores de atmósfera y 4 procesadores para el océano. Por lo tanto, teniendo en cuenta que cada simulación histórica comprende 150 años y cada simulación futura 100 años, para obtener los resultados que se presentan en este trabajo – una simulación histórica y dos escenarios futuros – se habrían utilizado unas 3500 horas de cálculo con MareNostrum.

ANEXO B: Observaciones [E-OBS]

Con el objetivo de evaluar las proyecciones del modelo EC-Earth en este trabajo – particularmente durante el periodo histórico –, se eligieron las observaciones del E-OBS (Haylock et al. 2011) debido a su alta resolución en cuanto al conjunto de medidas diarias en Europa – únicamente de superficie terrestre – que se considera único en el territorio. En este sentido, en la actualidad existen varios conjuntos de medidas diarias malladas para Europa (p.ej. GISS y CRU) sin embargo, “ninguno puede compararse con el E-OBS en cuanto a la longitud temporal en que se tienen medidas, su resolución espacial, el tratamiento de la incertidumbre asociada a los datos así como el método de interpolación de los datos” (Haylock et al. 2011); [A. Figura 2].

Los ficheros de datos del E-OBS contienen datos para la temperatura diaria media (TG), mínima (TN), máxima (TX) y la precipitación (PPT) entre otras variables durante el periodo 1950-2012. Las medidas cubren un área 25N-75N x 40W-75E y pueden obtenerse en varios tipos de mallado – para este trabajo se utiliza una malla Lan-Lon de 0.5°. Este conjunto de observaciones climáticas se desarrolla como parte del “European Union Framework 6 ENSEMBLES Project” con el fin de validar toda una serie de estudios de cambio climático y en especial las proyecciones de los “Regional Climate Models” (RCMs).



B. Figura 1: Estaciones Meteorológicas (únicamente sobre la superficie terrestre) del E-OBS en Europa de (a) Precipitación y (b) Temperatura Media del Aire (2m). Fuente: Haylock et al. (2011).

ANEXO C: Resultados Cuantitativos

En este anexo se recogen todos los datos cuantitativos que se han obtenido de la evaluación del modelo durante el periodo histórico 1950-2004 y el análisis de las proyecciones futuras durante el periodo 2006-2100.

Periodo Histórico

Tabla 5: Correlación de Pearson [PC] – entre ESMs y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004.

Correlación de Pearson	TG	TX	TN	PPT
EC-Earth (BSC)	0.45	0.43	0.52	0.14
EC-Earth (ICHEC)	0.45	0.46		-0.07
CanESM-2	0.31	0.29	0.35	0.04

Tabla 6: Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre ESMs y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004.

*Las unidades se expresan para la temperatura en [°C/año] y para la Precipitación en [mm/día/año].

Pendiente de la Regresión	TG		TX		TN		PPT	
	PP [°C/año]	ER (%)	PP [°C/año]	ER (%)	PP [°C/año]	ER (%)	PP [mm/día/año]	ER (%)
E-OBS	0.0171		0.0173		0.0218		0.0024	
EC-Earth (BSC)	0.0229	33.92	0.0220	27.17	0.0246	12.84	0.0007	-70.83
EC-Earth (ICHEC)	0.0236	38.01	0.0224	29.48			0.0002	-91.67
CanESM-2	0.0160	-6.43	0.0169	-2.31	0.0152	-30.28	0.0003	-87.50

Tabla 7: Desviación Estándar [SD]* y Error Relativo [ER] (%) – entre ESMs y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C] y para la Precipitación en [mm/día]. **En el caso de la PPT se presenta la Varianza [VR].

	TG		TX		TN		PPT**	
	SD [°C]	ER (%)	SD [°C]	ER (%)	SD [°C]	ER (%)	VR [mm/día]	ER (%)
E-OBS	0.5747		0.5881		0.5672		0.0055	
EC-Earth (BSC)	0.5522	-3.91	0.5402	-8.13	0.5819	2.60	0.0030	-45.84
EC-Earth (ICHEC)	0.5267	-8.36	0.5156	-9.10			0.0038	-31.65
CanESM-2	0.5780	0.56	0.5884	3.74	0.5874	-0.11	0.0032	-41.75

Tabla 8: Correlación de Pearson [PC] – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Estacional de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004.

Correlación de Pearson	TG	TX	TN	PPT
DJF	0.27	0.27	0.31	-0.10
MAM	0.39	0.38	0.42	0.17
JJA	0.26	0.22	0.47	-0.05
SON	0.03	-0.02	0.07	-0.12

Tabla 9: Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Estacional de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C/año] y para la Precipitación en [mm/día/año].

Pendiente de la Regresión		TG		TX		TN		PPT	
		PP [°C/año]	ER (%)	PP [°C/año]	ER (%)	PP [°C/año]	ER (%)	PP [mm/día/año]	ER (%)
DJF	E-OBS	0.024	38.75	0.0216	41.20	0.0283	31.45	0.0021	-76.19
	EC-Earth (BSC)	0.0333		0.0305		0.0372		0.0005	
MAM	E-OBS	0.0245	-13.06	0.0249	-18.47	0.0273	-17.58	0.0024	-16.67
	EC-Earth (BSC)	0.0213		0.0203		0.0225		0.002	
JJA	E-OBS	0.0129	62.02	0.0151	38.41	0.0189	13.23	0.002	-70.00
	EC-Earth (BSC)	0.0209		0.0209		0.0214		0.0006	
SON	E-OBS	0.0079	108.8	0.0055	200.0	0.0115	52.17	0.0037	-113.5
	EC-Earth (BSC)	0.0165		0.0165		0.0175		-0.0005	

Tabla 10: Desviación Estándar [SD]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Estacional de las Variables Meteorológicas en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C] y para la Precipitación en [mm/día]. **En el caso de la PPT se presenta la Varianza [VR].

Desviación Estándar y Varianza		TG		TX		TN		PPT**	
		SD [°C]	ER (%)	SD [°C]	ER (%)	SD [°C]	ER (%)	VR [mm/día]	ER (%)
DJF	E-OBS	1.1042	3.70	0.9708	13.83	1.1373	7.39	0.0203	-38.32
	EC-Earth (BSC)	1.1451		1.1051		1.2213		0.0125	
MAM	E-OBS	0.8427	-17.01	0.8484	-16.43	0.8282	-13.97	0.0113	-26.61
	EC-Earth (BSC)	0.6993		0.7090		0.7125		0.0083	
JJA	E-OBS	0.5765	-17.09	0.5882	-11.92	0.5489	-17.78	0.0104	-16.68
	EC-Earth (BSC)	0.4780		0.5181		0.4513		0.0086	
SON	E-OBS	0.6780	-1.09	0.6687	0.88	0.6645	5.26	0.0144	-24.68
	EC-Earth (BSC)	0.6706		0.6746		0.6994		0.0108	

Tabla 11: Correlación de Pearson [PC], Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del DTR [Celsius/año].

Índice	Correlación de Pearson	Pendiente Promedio*		ER (%)
		E-OBS	EC-Earth (BSC)	
TR20	0.61	0.2431	0.0881	-63.76
IDO	0.37	-0.2214	-0.2225	0.50
DTR	0.07	-0.0341	-0.0362	6.16
WSDI	0.27	0.1535	0.2176	41.76
CSDI	0.16	-0.1603	-0.2004	25.02

Tabla 12: Bias (%), Desviación Estándar [SD]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del DTR [Celsius].

Índice	Bias (%)	Desviación Estándar*		ER (%)
		E-OBS	EC-Earth (BSC)	
TR20	-24.44	4.6841	2.0669	-55.87
IDO	-5.72	6.7953	6.7795	-0.23
DTR	-7.05	1.6985	2.0732	22.06
WSDI	6.27	6.4211	5.3972	-15.95
CSDI	0.75	6.4657	7.7326	19.59

Tabla 13: Correlación de Pearson [PC], Pendiente Lineal Promedio [PP]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del SDII [mm/día/año].

Índice	Correlación de Pearson	Pendiente Promedio*		ER (%)
		E-OBS	EC-Earth (BSC)	
R20	-0.03	0.0069	0.0032	-53.62
SDII	-0.04	0.0032	0.0016	-50.00
CDD	-0.03	0.0315	-0.0344	-209.21
CWD	0.003	0.0036	0.0007	-80.56

Tabla 14: Bias (%), Varianza [VR]* y Error Relativo [ER] (%) – entre EC-Earth (BSC) y E-OBS – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa. Periodo Histórico: 1950-2004. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del SDII [mm/día].

Índice	Bias (%)	Varianza*		ER (%)
		E-OBS	EC-Earth (BSC)	
R20	-57.21	0.0656	0.0184	-71.88
SDII	-15.20	0.0135	0.0085	-37.24
CDD	-35.22	9.0289	2.7112	-69.97
CWD	30.05	0.0862	0.1884	118.46

Periodo Futuro

Tabla 15: Pendiente Lineal Promedio [PP]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C/año] y para la Precipitación en [mm/día/año].

Pendiente Promedio*	EC-Earth (BSC)		EC-Earth (ICHEC)		CanESM-2	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
TG	0.0222	0.0293	0.0253	0.0547	0.0304	0.0671
TX	0.0207	0.028	0.0242	0.0524	0.0302	0.0686
TN	0.0242	0.0312			0.0314	0.0674
PPT	0.0008	0.001	0.0011	0.0012	0.0014	0.0011

Tabla 16: Desviación Estándar [SD]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de las Variables Meteorológicas en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan para la temperatura en [°C] y para la Precipitación en [mm/día]. **En el caso de la PPT se presenta la Varianza [VR].

Desviación Estándar*	EC-Earth (BSC)		EC-Earth (ICHEC)		CanESM-2	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
TG	0.7220	1.0325	1.0325	1.5392	0.9932	1.8942
TX	0.6898	1.0072	0.7966	1.4957	1.0030	1.9448
TN	0.7746	1.0801			1.0125	1.8998
PPT**	0.0044	0.0041	0.0052	0.0070	0.0070	0.0065

Tabla 17: Pendiente Lineal Promedio [PP]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del DTR [Celsius/año].

Pendiente Promedio*	RCP4.5	RCP8.5
TR20	0.0974	0.1583
IDO	-0.1707	-0.1891
DTR	-0.0186	-0.0164
WSDI	0.3069	0.4233
CSDI	-0.0954	-0.1032

Tabla 18: Desviación Estándar [SD]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del DTR [Celsius].

Desviación Estándar*	RCP4.5	RCP8.5
TR20	3.2792	6.2793
IDO	7.8116	8.4208
DTR	1.9086	1.8650
WSDI	10.0498	15.1235
CSDI	5.2733	5.7976

Tabla 19: Diferencia Promedio Esperada [DPE]* – entre los últimos 30 años de las Proyecciones del EC-Earth históricas y futuras – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m) en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del DTR [Celsius].

Diferencia Promedio Esperada [30 años]	RCP4.5		RCP8.5	
	[Días]*	(%)	[Días]*	(%)
TR20	9.59	89.13	14.84	137.96
ID0	-16.49	-29.62	-18.01	-32.36
DTR	-2.17	-4.46	-1.72	-3.54
WSDI	30.32	121.66	40.58	162.85
CSDI	-11.58	-64.47	-11.94	-66.51

Tabla 20: Pendiente Lineal Promedio [PP]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días/año] a excepción del SDII [mm/día/año].

Pendiente Promedio*	RCP4.5	RCP8.5
R20	0.0041	0.0089
SDII	0.0027	0.0050
CDD	-0.0026	-0.0154
CWD	0.0023	-0.0049

Tabla 21: Varianza [VR]* para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del SDII [mm/día].

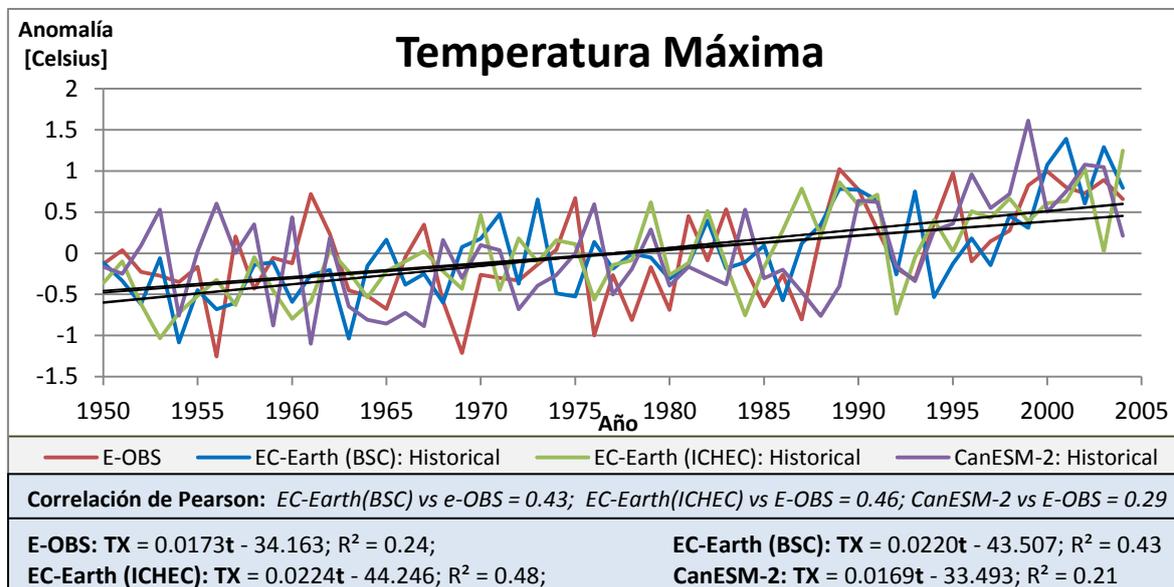
Varianza*	RCP4.5	RCP8.5
R20	0.0370	0.0890
SDII	0.0143	0.0274
CDD	2.3483	2.1452
CWD	0.1689	0.2006

Tabla 22: Diferencia Promedio Esperada [DPE]* – entre los últimos 30 años de las Proyecciones del EC-Earth históricas y futuras – para la Evaluación Inter-anual del Promedio Anual de los Índices de Precipitación Diaria en Europa en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Periodo Futuro: 2006-2100. *Las unidades se expresan en [días] a excepción del SDII [mm/día].

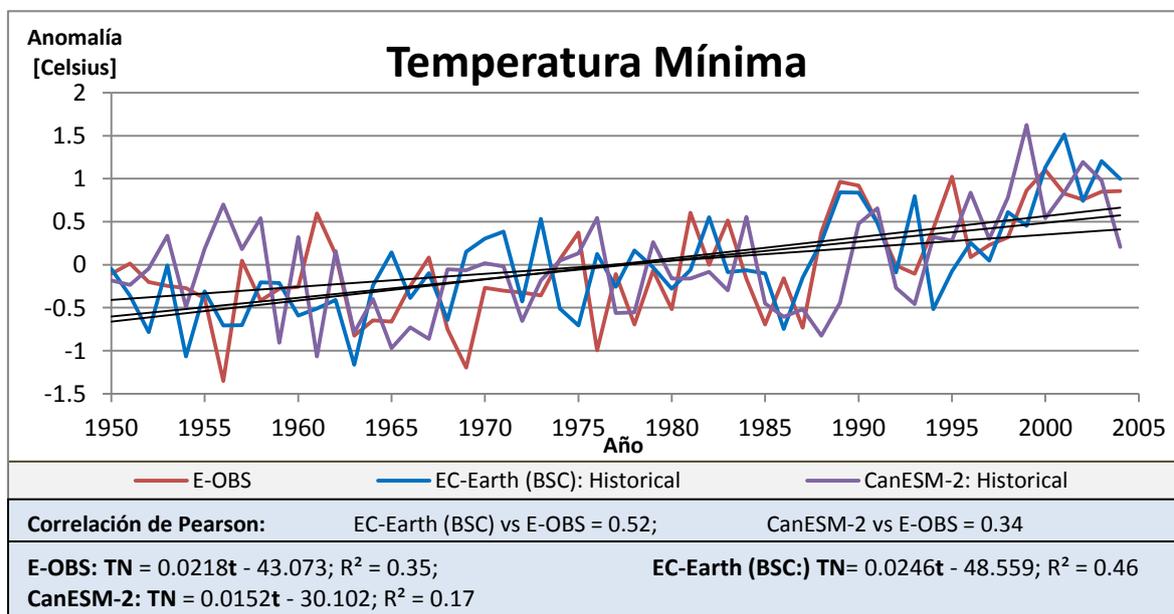
Diferencia Promedio Esperada [30 años]	RCP4.5		RCP8.5	
	[Días]*	(%)	[Días]*	(%)
R20	0.39	38.41	0.75	73.81
SDII	0.28	6.65	0.46	10.88
CDD	0.11	0.43	-0.67	-2.63
CWD	0.32	3.15	-0.05	-0.53

ANEXO D: Resultados Gráficos

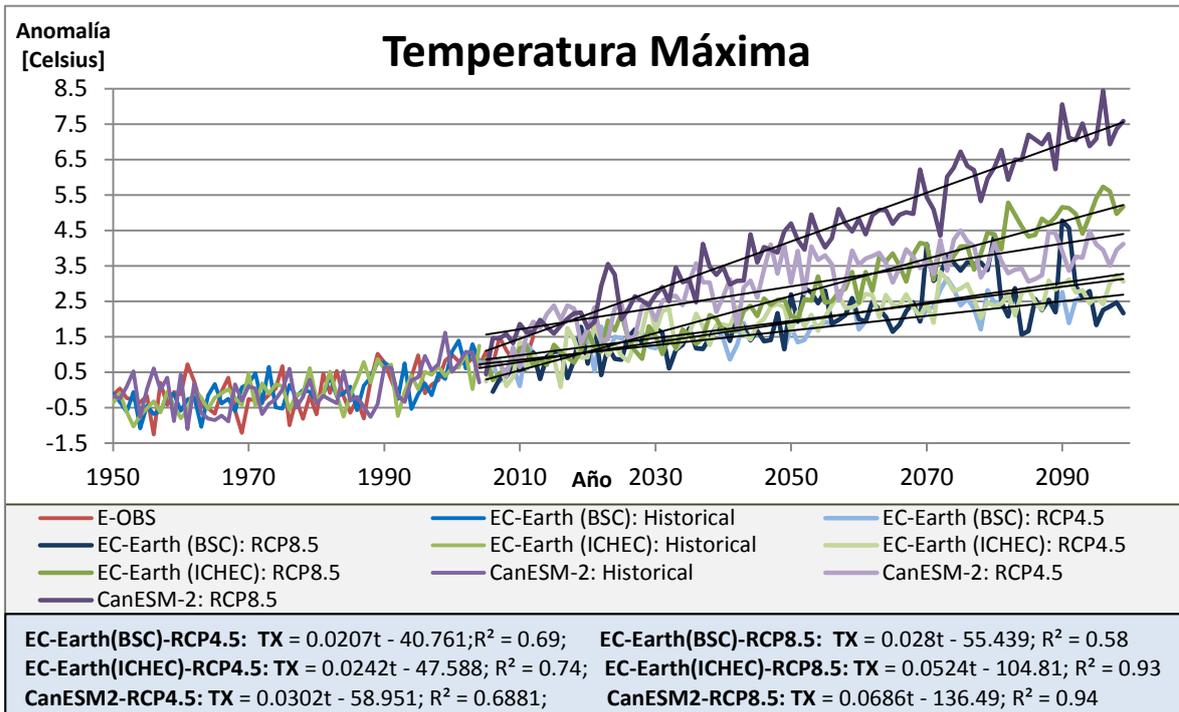
En este anexo se recogen todas aquellas figuras que se han utilizado en la evaluación del modelo o análisis de las proyecciones futuras y que no se incluyen en el fichero original.



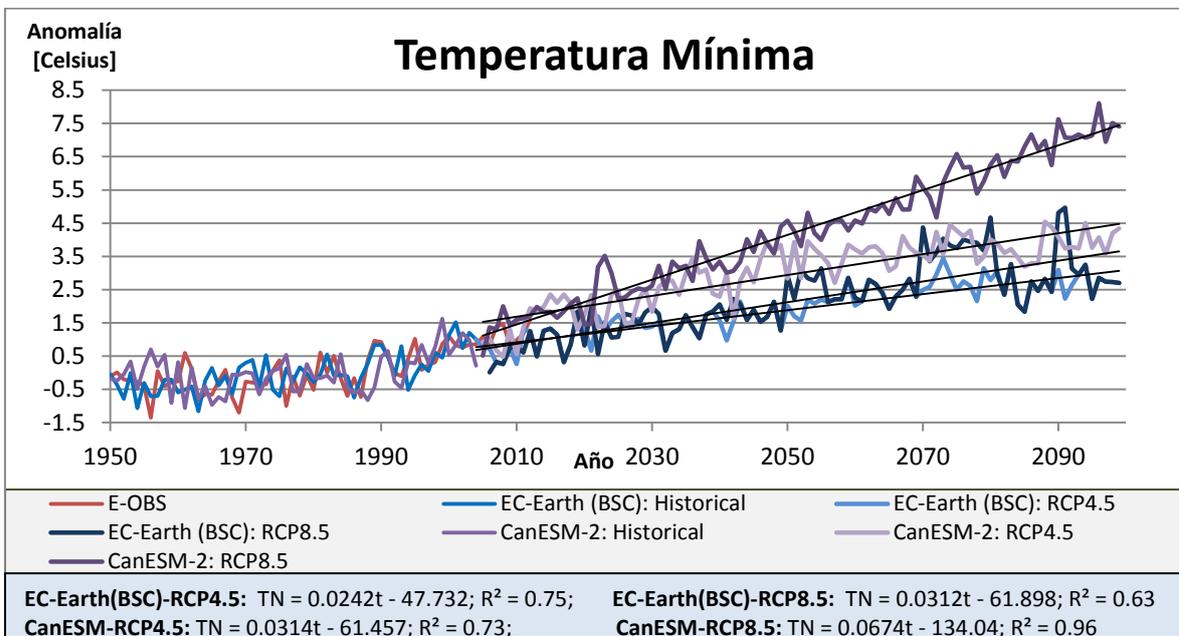
D. Figura 1: Anomalía de la Temperatura Superficial Máxima del Aire (2m) (TX) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución de la temperatura máxima en Europa promediada anualmente respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales de los datos.



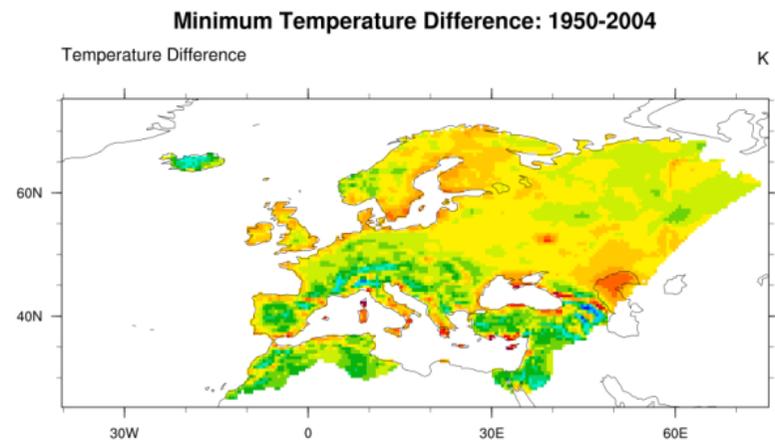
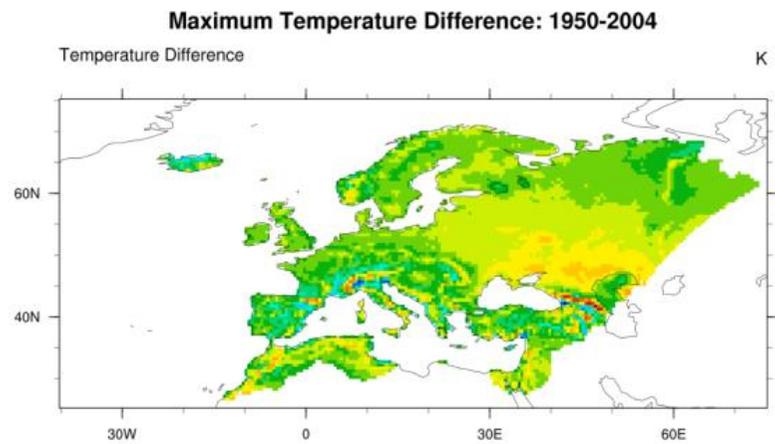
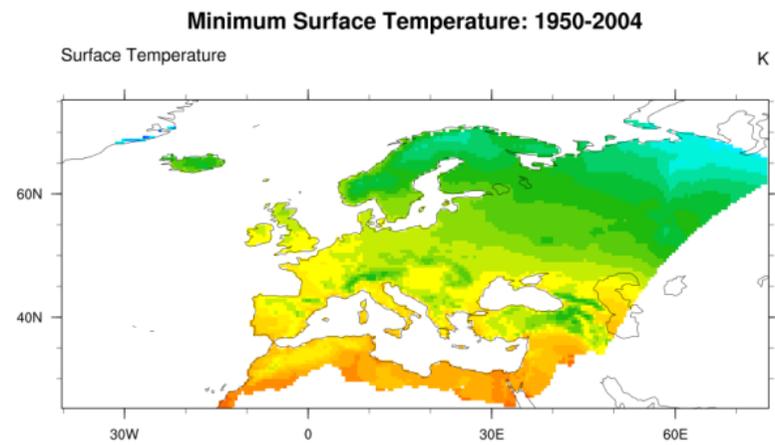
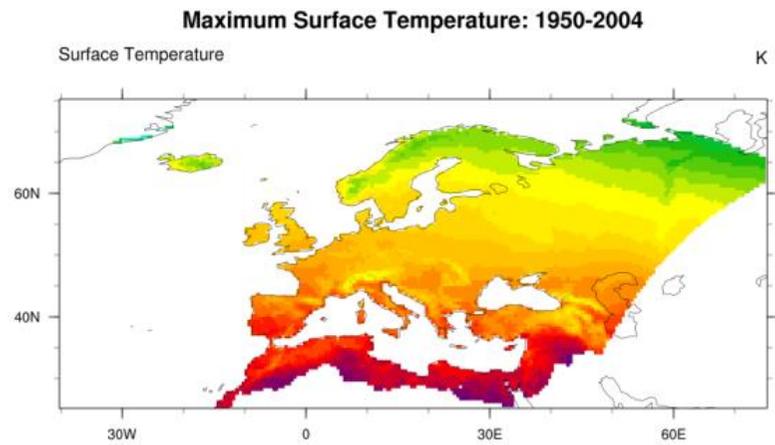
D. Figura 2: Anomalía de la Temperatura Superficial Mínima del Aire (2m) (TN) en Europa [Celsius]. El gráfico representa la evolución de la temperatura mínima en Europa promediada anualmente respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras corresponden a los ajustes lineales de los datos.



D. Figura 3: Anomalía de la Temperatura Superficial Máxima del Aire (2m) (TX) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la temperatura máxima respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.

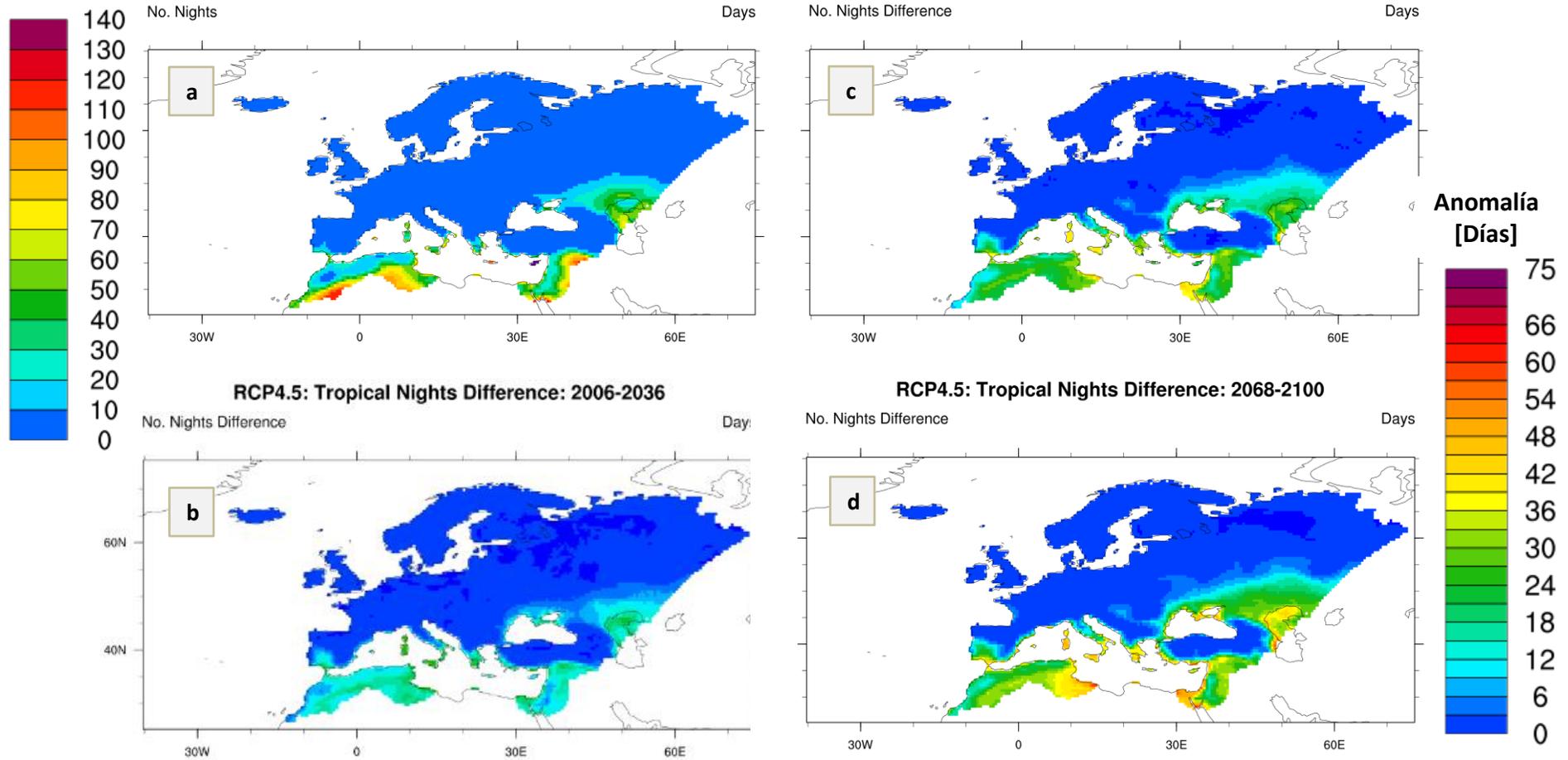


D. Figura 4: Anomalía de la Temperatura Superficial Mínima del Aire (2m) (TN) en Europa [Celsius]. Los escenarios futuros corresponden a los RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo futuro 2006-2100. El gráfico representa la evolución inter-anual del promedio anual de la temperatura mínima respecto al promedio global para el periodo histórico 1950-2004. Las líneas oscuras representan los ajustes lineales de las proyecciones futuras.



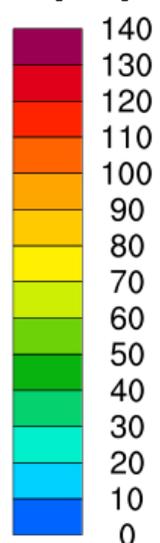
D. Figura 5: Evaluación Zonal de la Temperatura Superficial del Aire (2m) Máxima (**TX**) y Mínima (**TN**) en Europa [Kelvin]. Promedio de la temperatura para el periodo histórico 1950-2004. Temperatura observada (arriba) y diferencia entre las proyecciones del EC-Earth y las observaciones (abajo).

**Tropical Nights
[Días]**

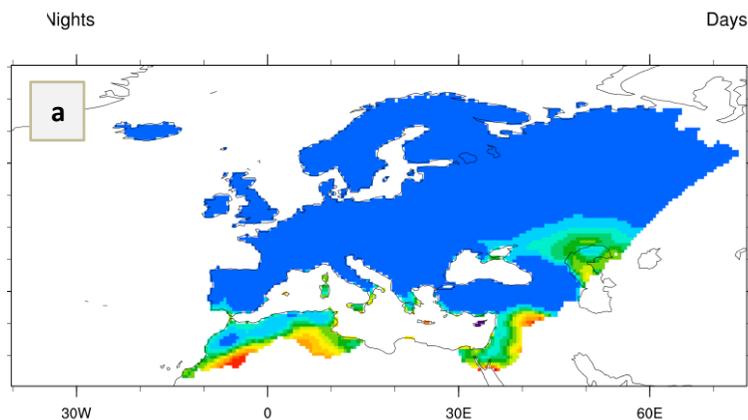


D. Figura 6: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Frecuencia**. Evolución del Tropical Nights Index (TR20) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

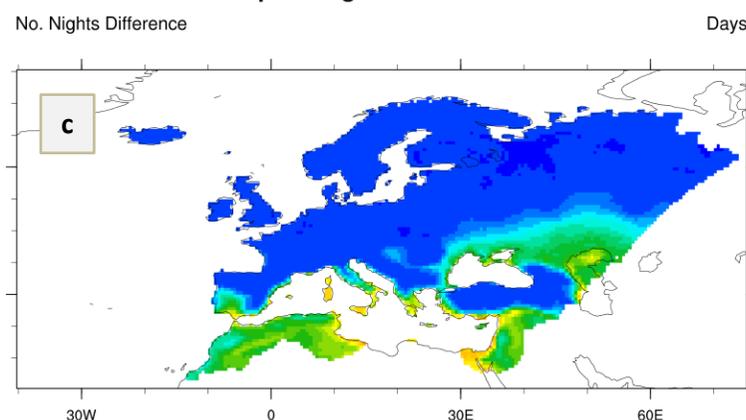
**Tropical Nights
[Días]**



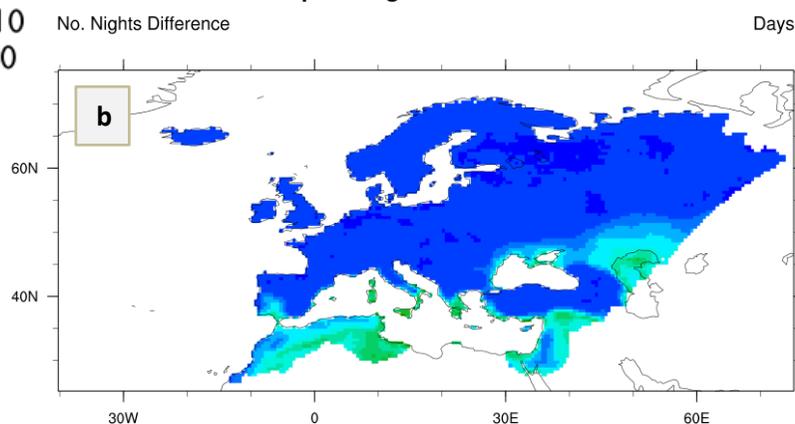
Tropical Nights Index: 1974-2004



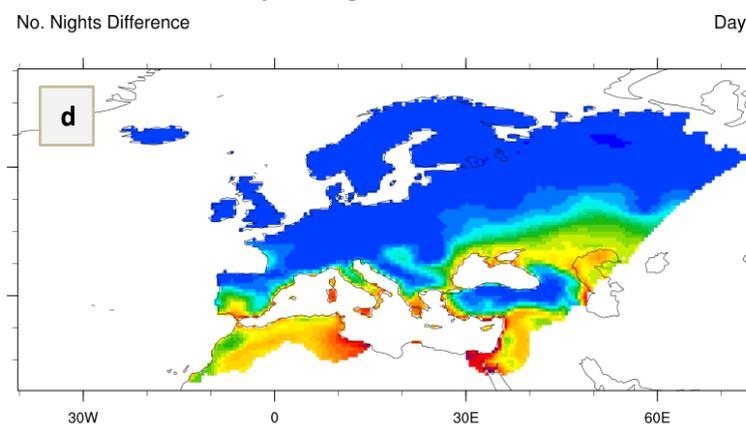
RCP8.5: Tropical Nights Difference: 2037-2067



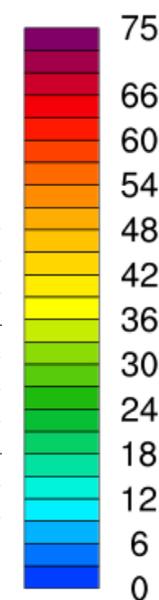
RCP8.5: Tropical Nights Difference: 2006-2036



RCP8.5: Tropical Nights Difference: 2068-2100

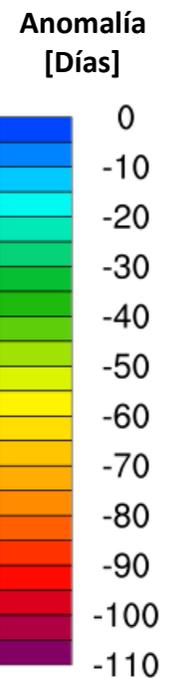
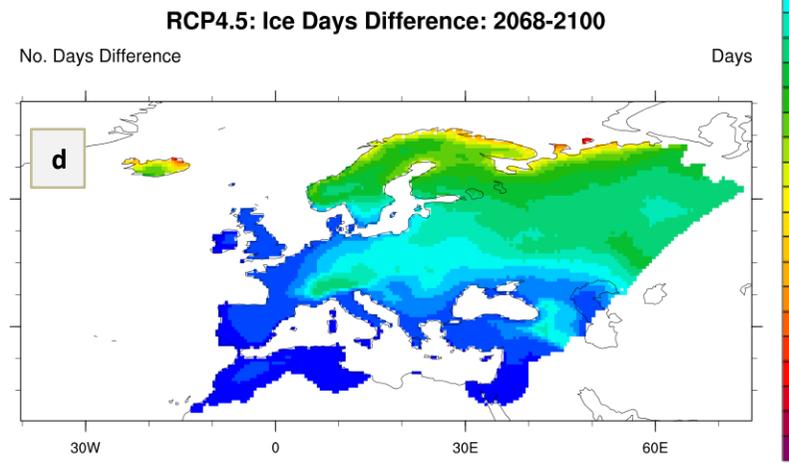
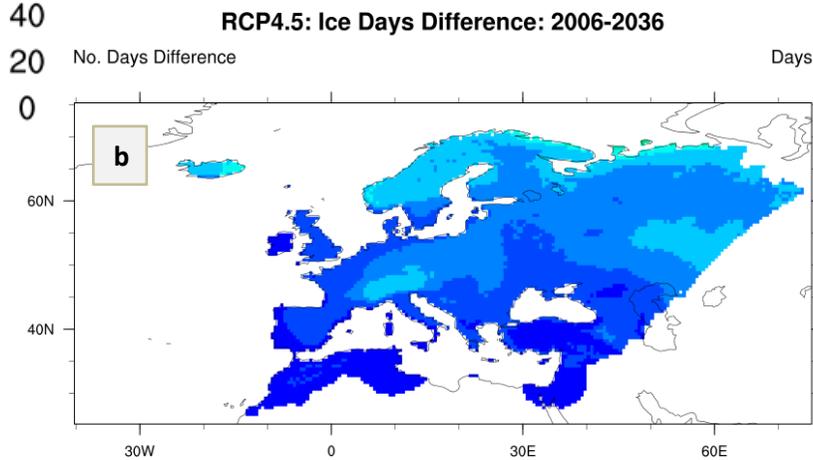
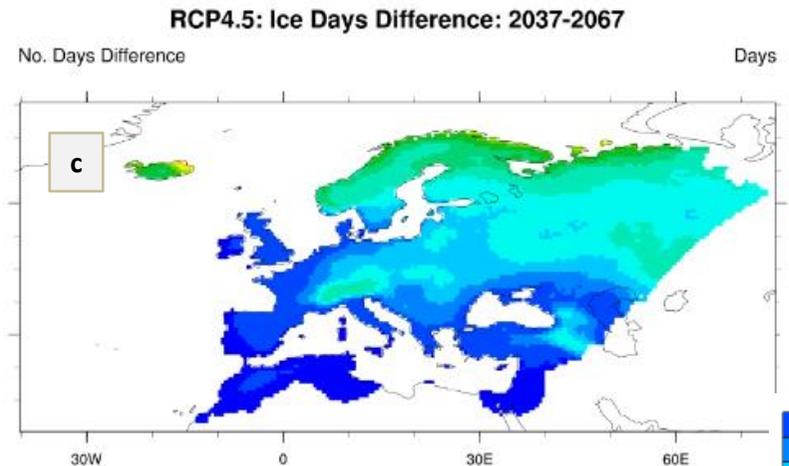
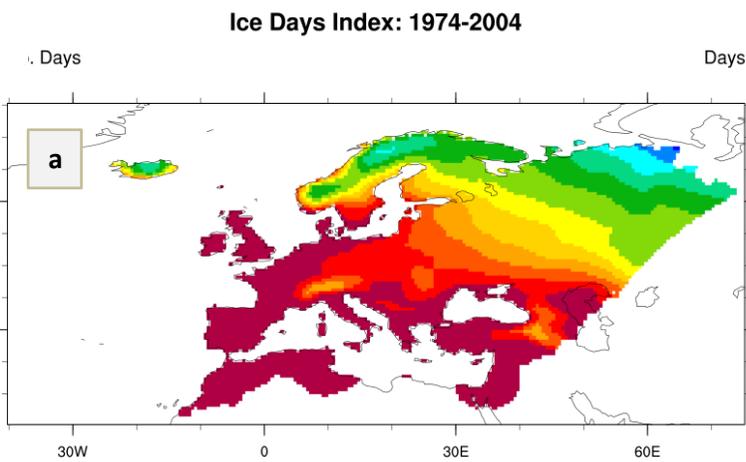
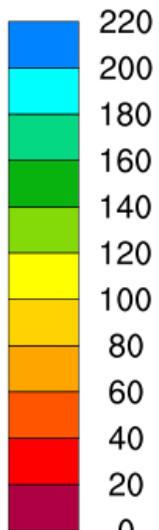


**Anomalia
[Días]**

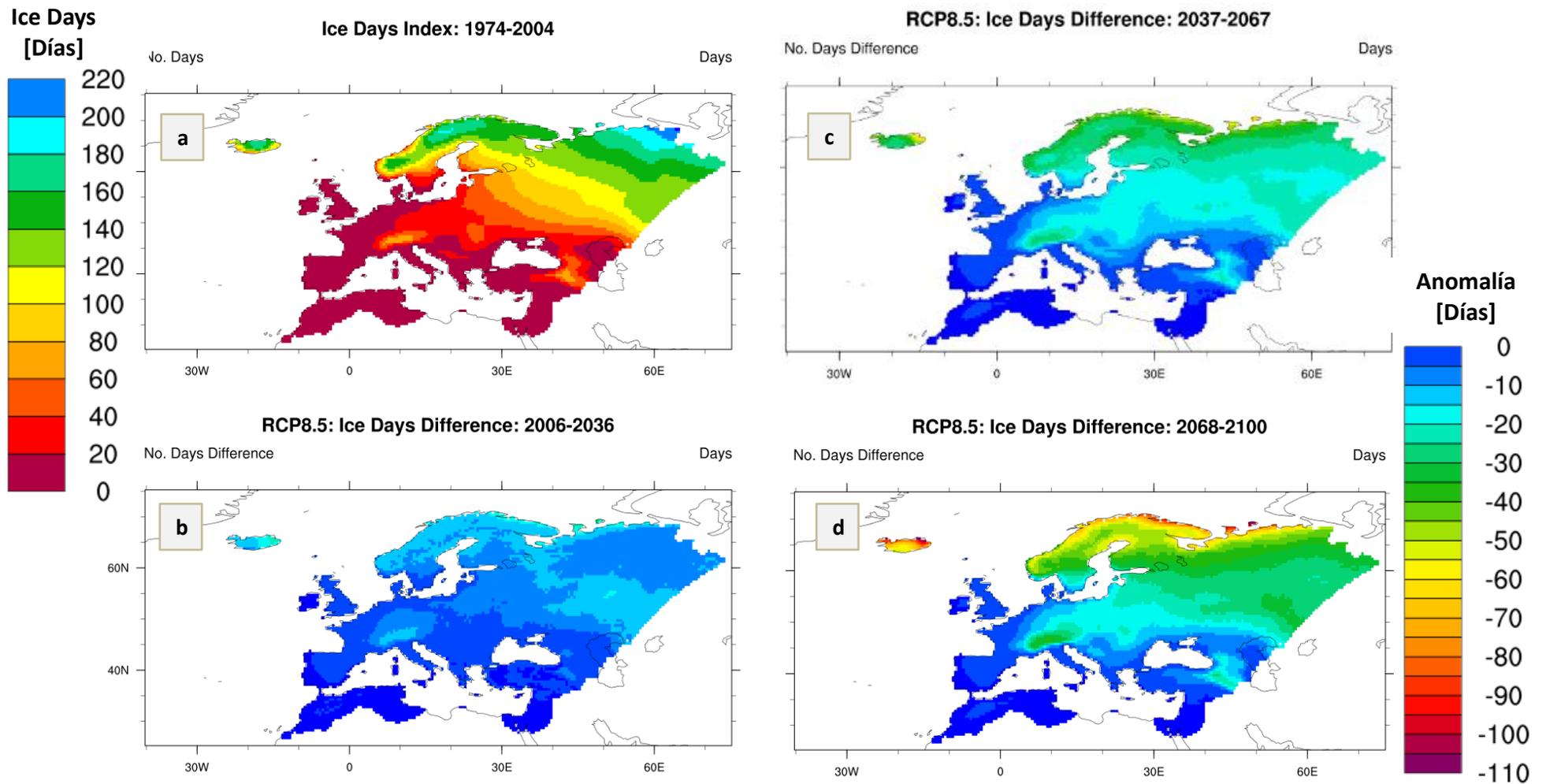


D. Figura 7: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Frecuencia**. Evolución del Tropical Nights Index (TR20) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

**Ice Days
[Días]**

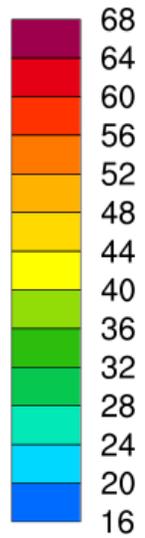


D. Figura 8: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Frecuencia**. Evolución del Ice Days Index (ID0) [días] con el **RCP4.5**. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

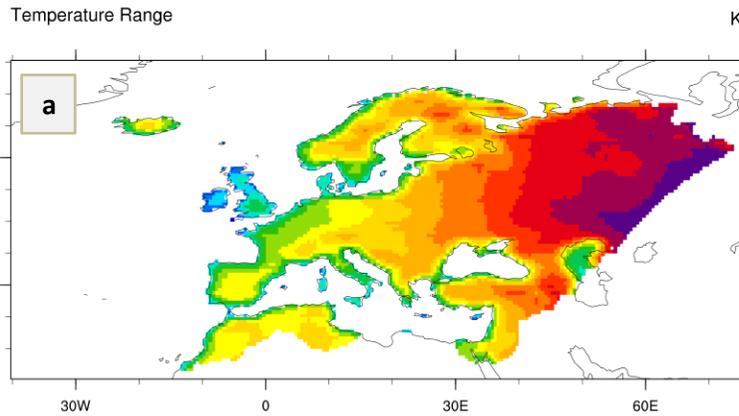


D. Figura 9: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Frecuencia**. Evolución del Ice Days Index (IDO) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

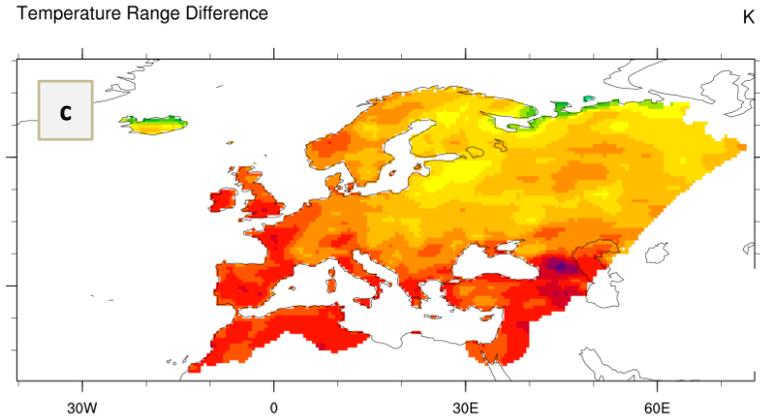
**Diurnal Temperature
Range [Celsius]**



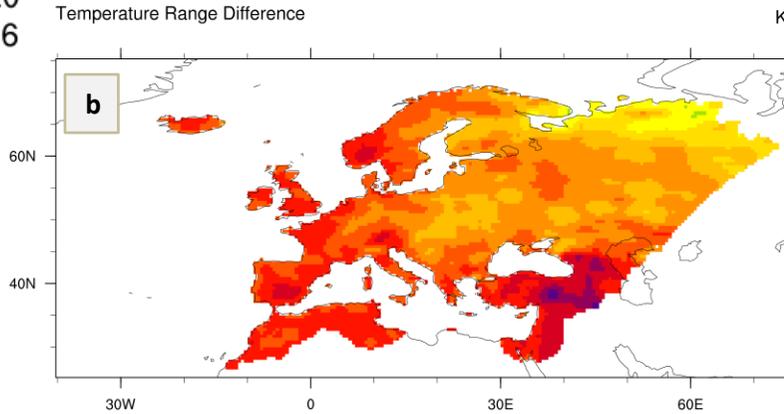
Diurnal Temperature Range Index: 1974-2004



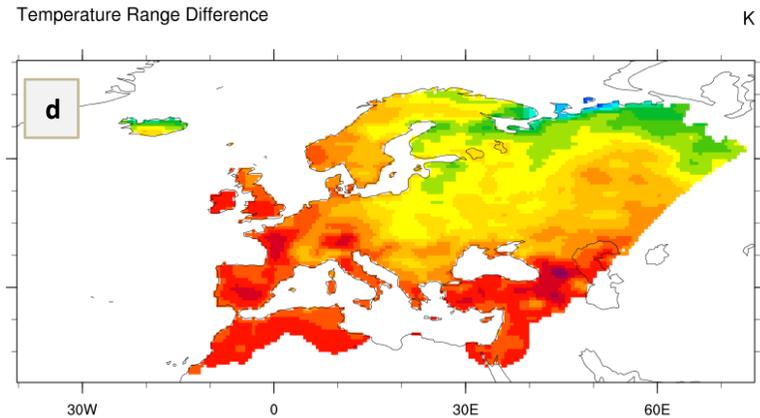
RCP4.5: Diurnal Temperature Range Difference: 2037-2067



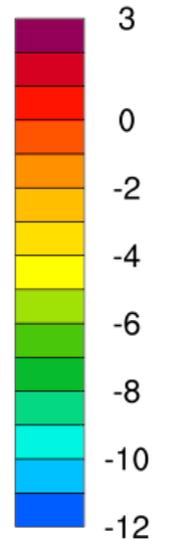
RCP4.5: Diurnal Temperature Range Difference: 2006-2036



RCP4.5: Diurnal Temperature Range Difference: 2068-2100



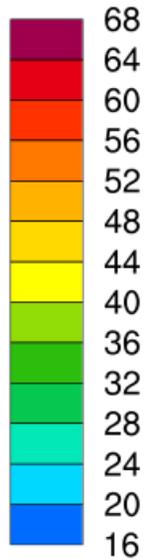
**Anomalía
[Celsius]**



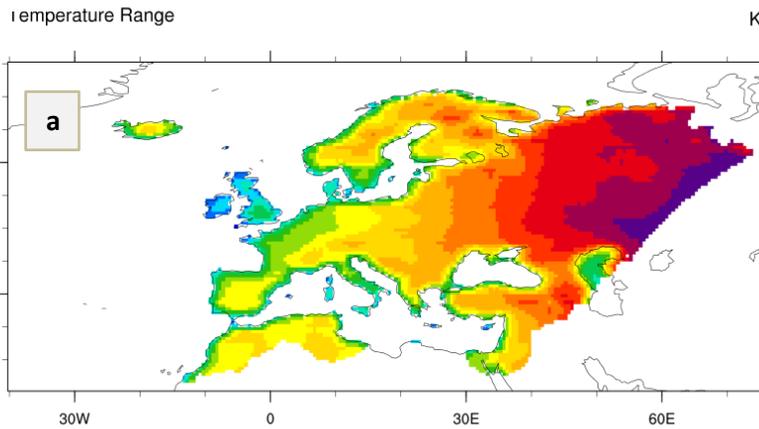
D. Figura 10: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Amplitud**. Evolución del Diurnal Temperature Range Index (DTR) [Celsius] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

Diurnal Temperature

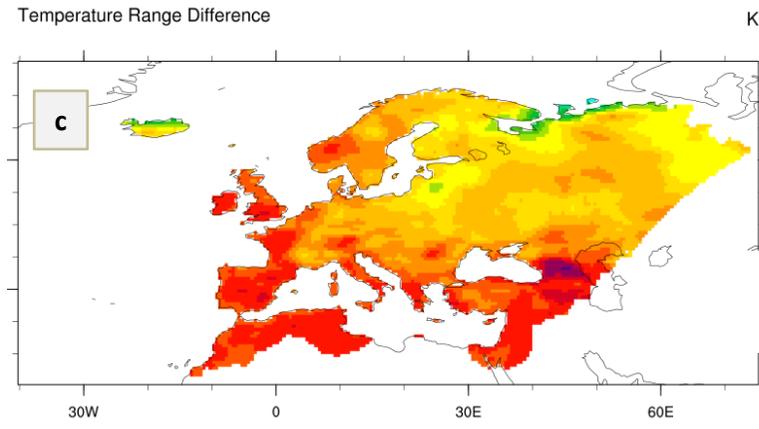
Range [Celsius]



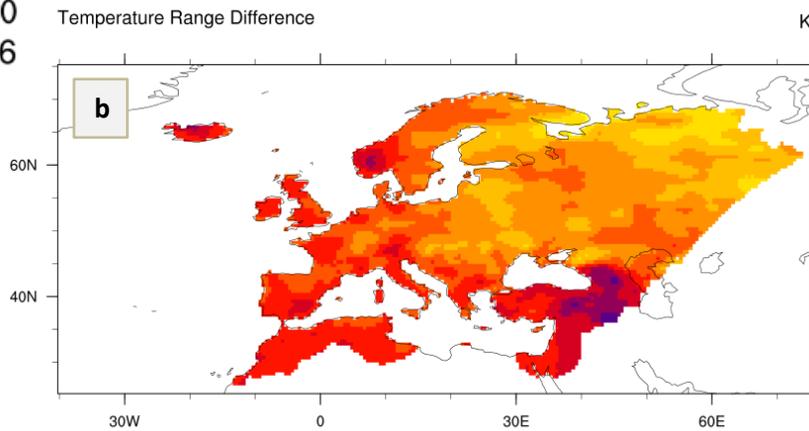
Diurnal Temperature Range Index: 1974-2004



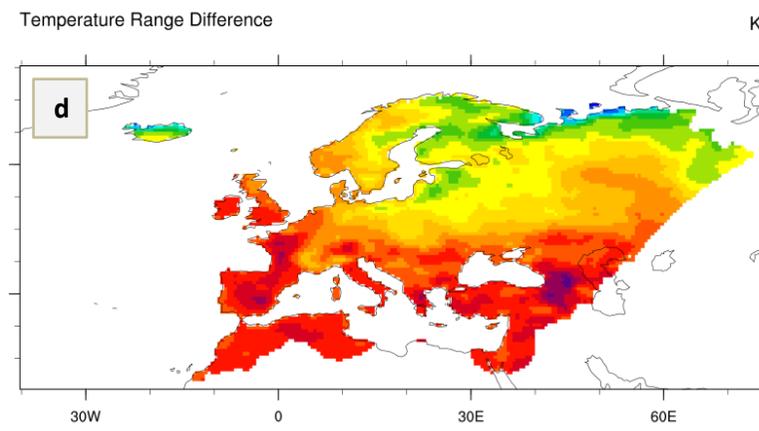
RCP8.5: Diurnal Temperature Range Difference: 2037-2067



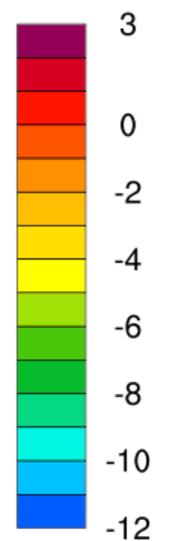
RCP8.5: Diurnal Temperature Range Difference: 2006-2036



RCP8.5: Diurnal Temperature Range Difference: 2068-2100

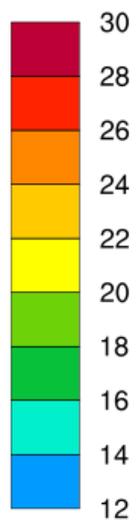


Anomalia [Celsius]

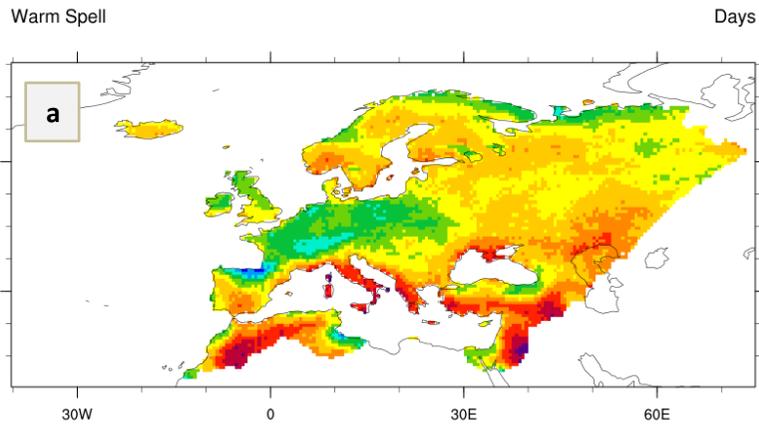


D. Figura 11: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Amplitud**. Evolución del Diurnal Temperature Range Index (DTR) [Celsius] con el **RCP8.5**. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

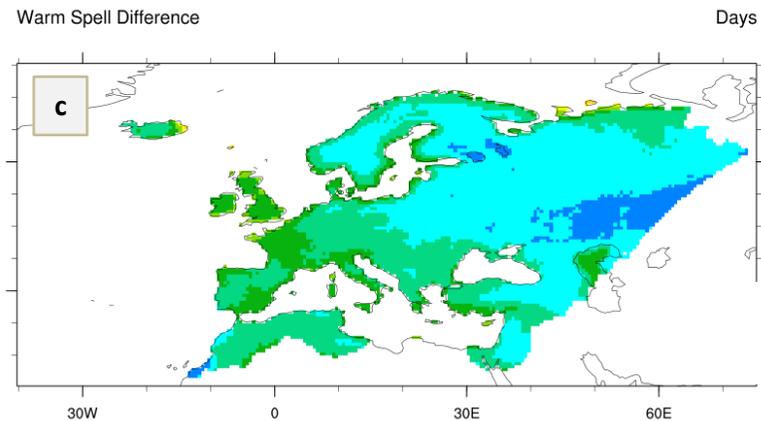
**Warm Spell
Duration [Días]**



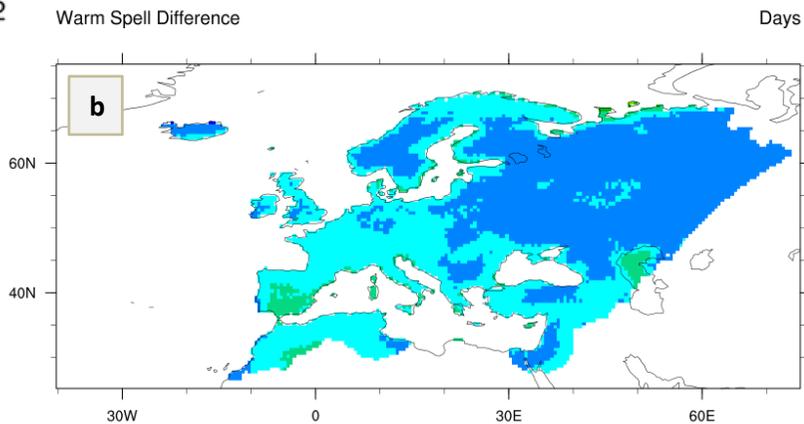
Warm Spell Duration Index: 1974-2004



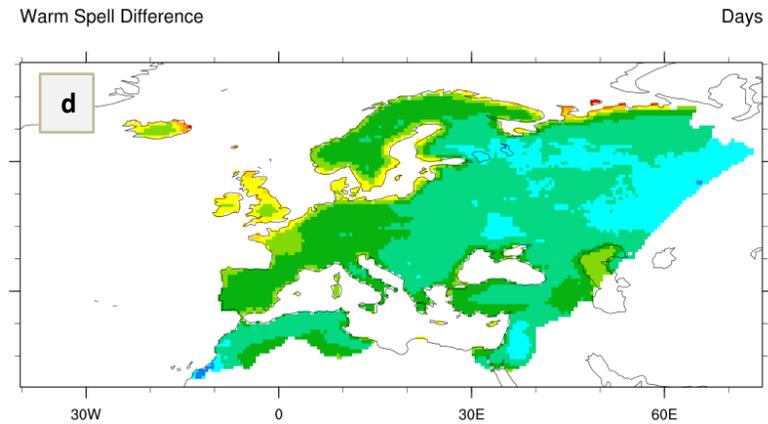
RCP4.5: Warm Spell Duration Difference: 2037-2067



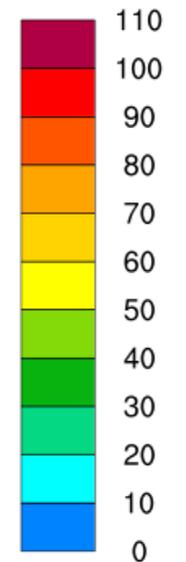
RCP4.5: Warm Spell Duration Difference: 2006-2036



RCP4.5: Warm Spell Duration Difference: 2068-2100

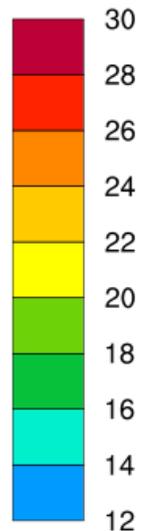


**Anomalía
[Días]**

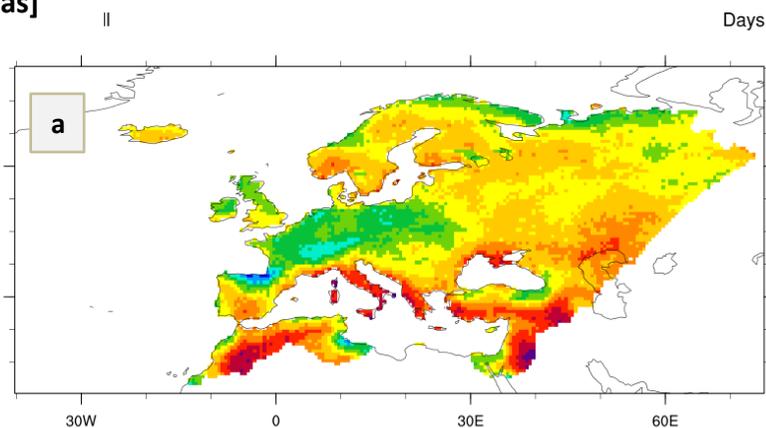


D. Figura 12: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Persistencia**. Evolución del Warm Spell Duration Index (WSDI) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

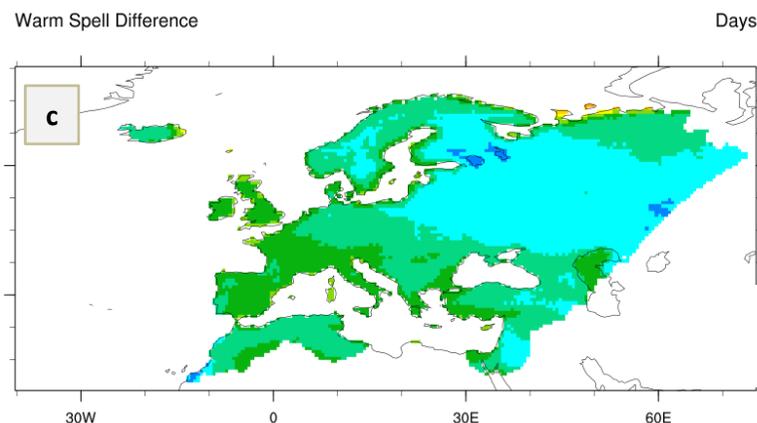
Warm Spell Duration [Días]



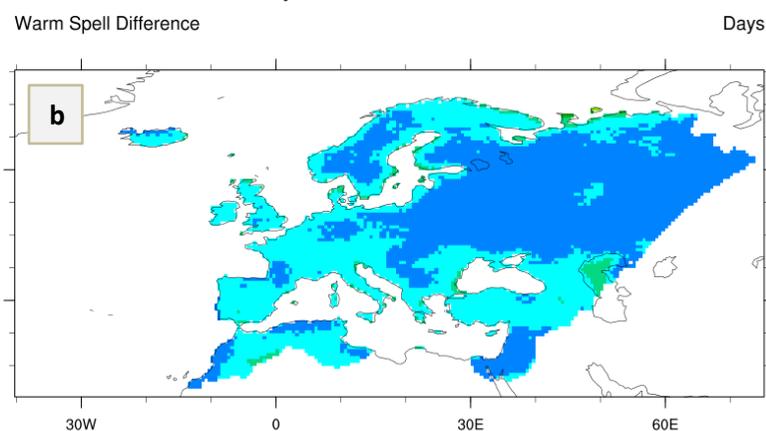
Warm Spell Duration Index: 1974-2004



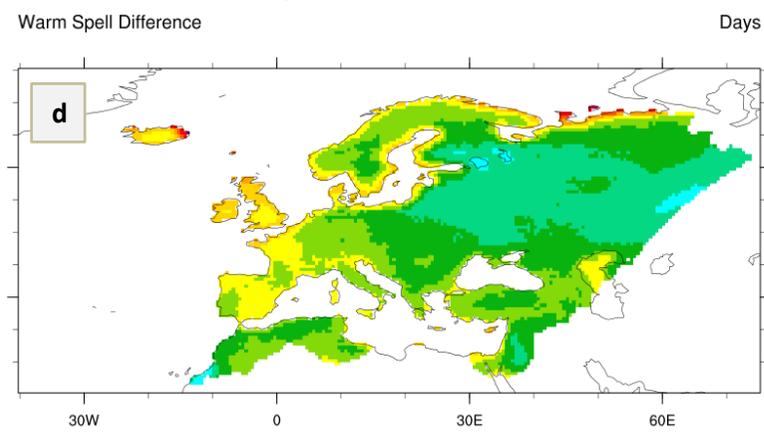
RCP8.5: Warm Spell Duration Difference: 2037-2067



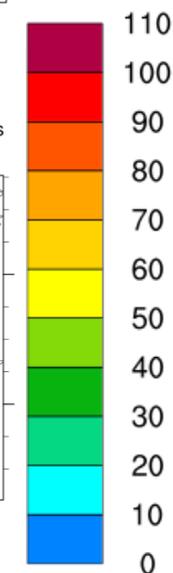
RCP8.5: Warm Spell Duration Difference: 2006-2036



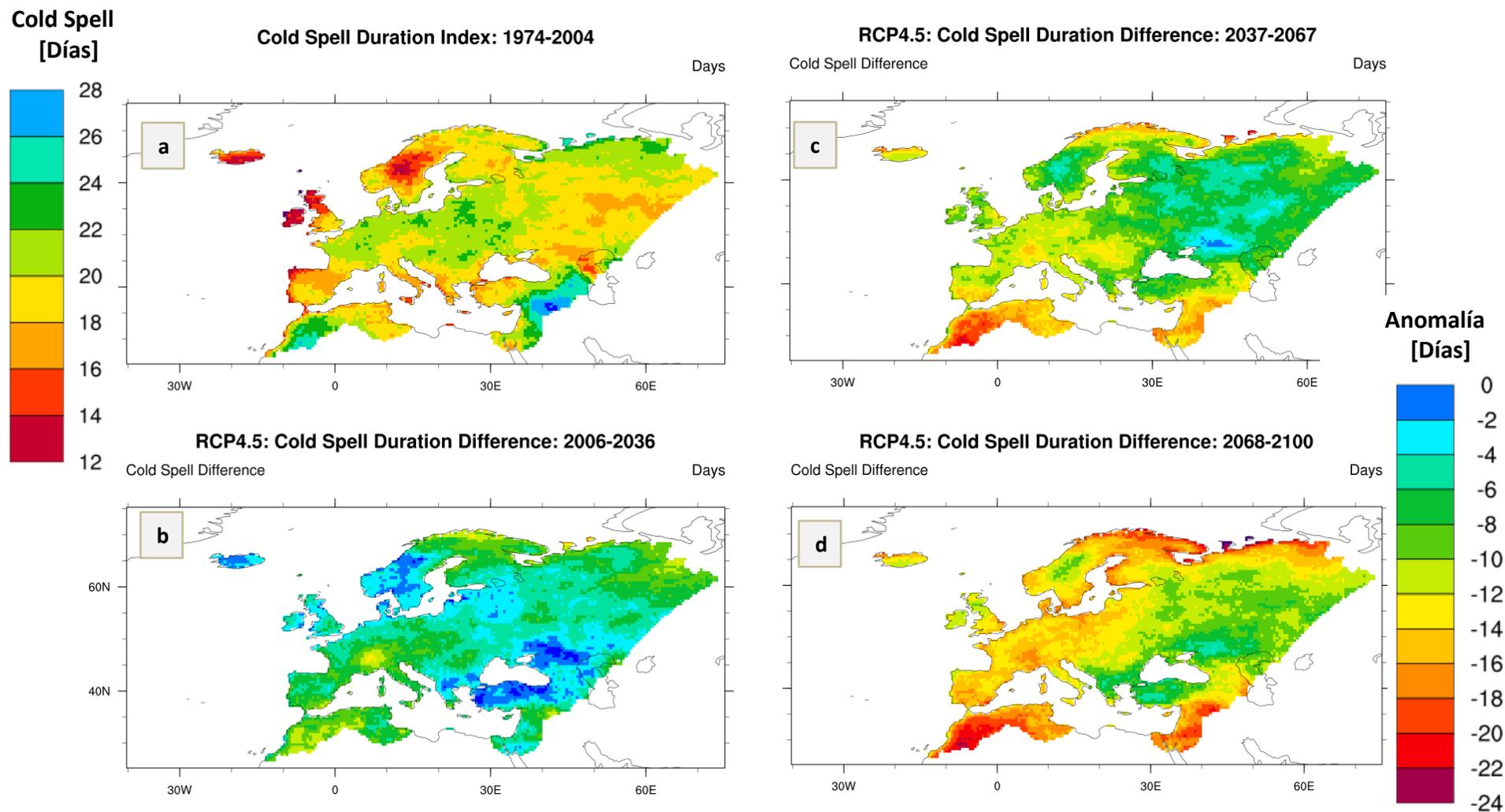
RCP8.5: Warm Spell Duration Difference: 2068-2100



Anomalia [Días]

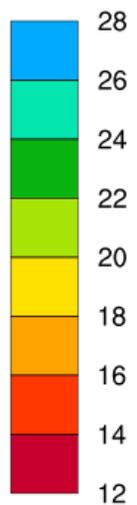


D. Figura 13: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Persistencia**. Evolución del Warm Spell Duration Index (WSDI) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

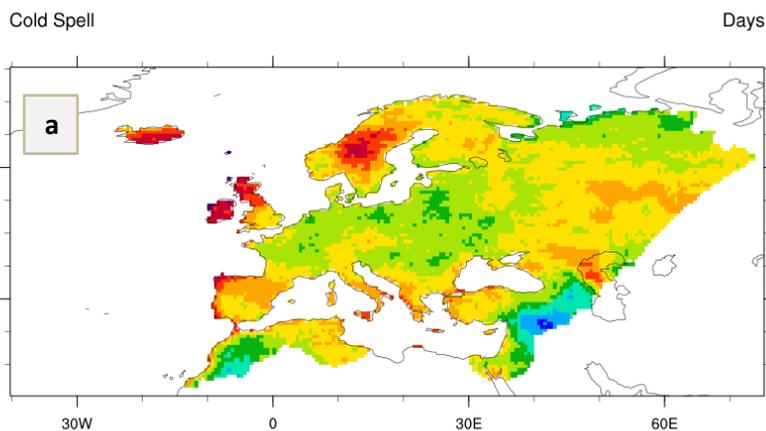


D. Figura 14: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Persistencia**. Evolución del Cold Spell Duration Index (CSDI) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

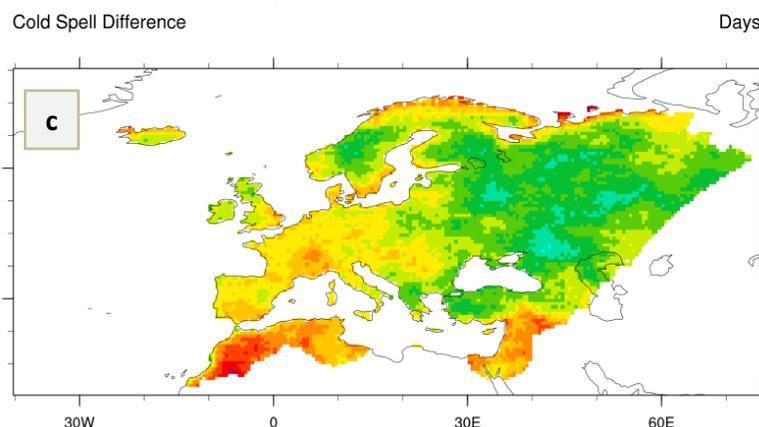
**Cold Spell
[Días]**



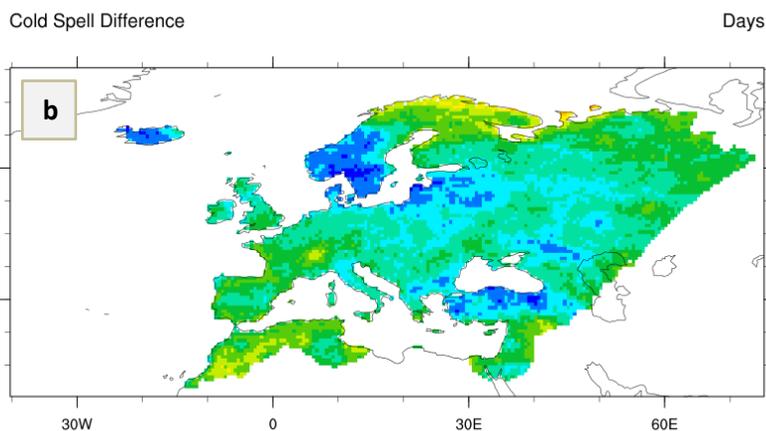
Cold Spell Duration Index: 1974-2004



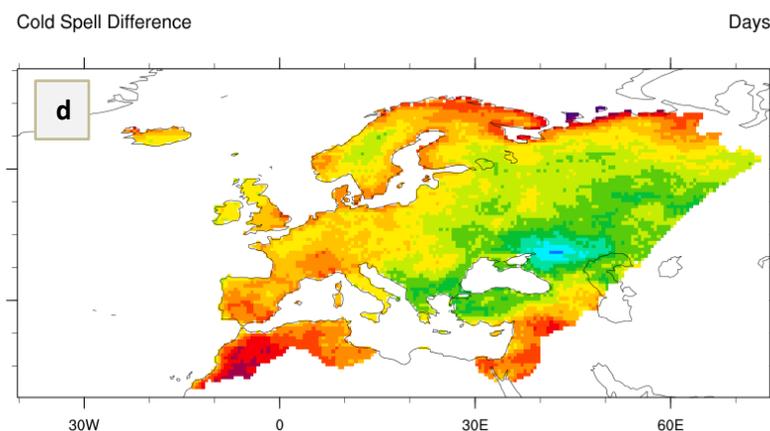
RCP8.5: Cold Spell Duration Difference: 2037-2067



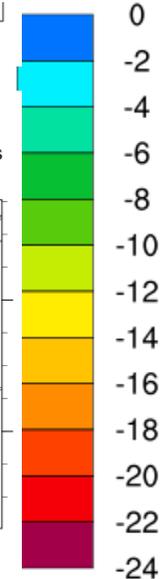
RCP8.5: Cold Spell Duration Difference: 2006-2036



RCP8.5: Cold Spell Duration Difference: 2068-2100

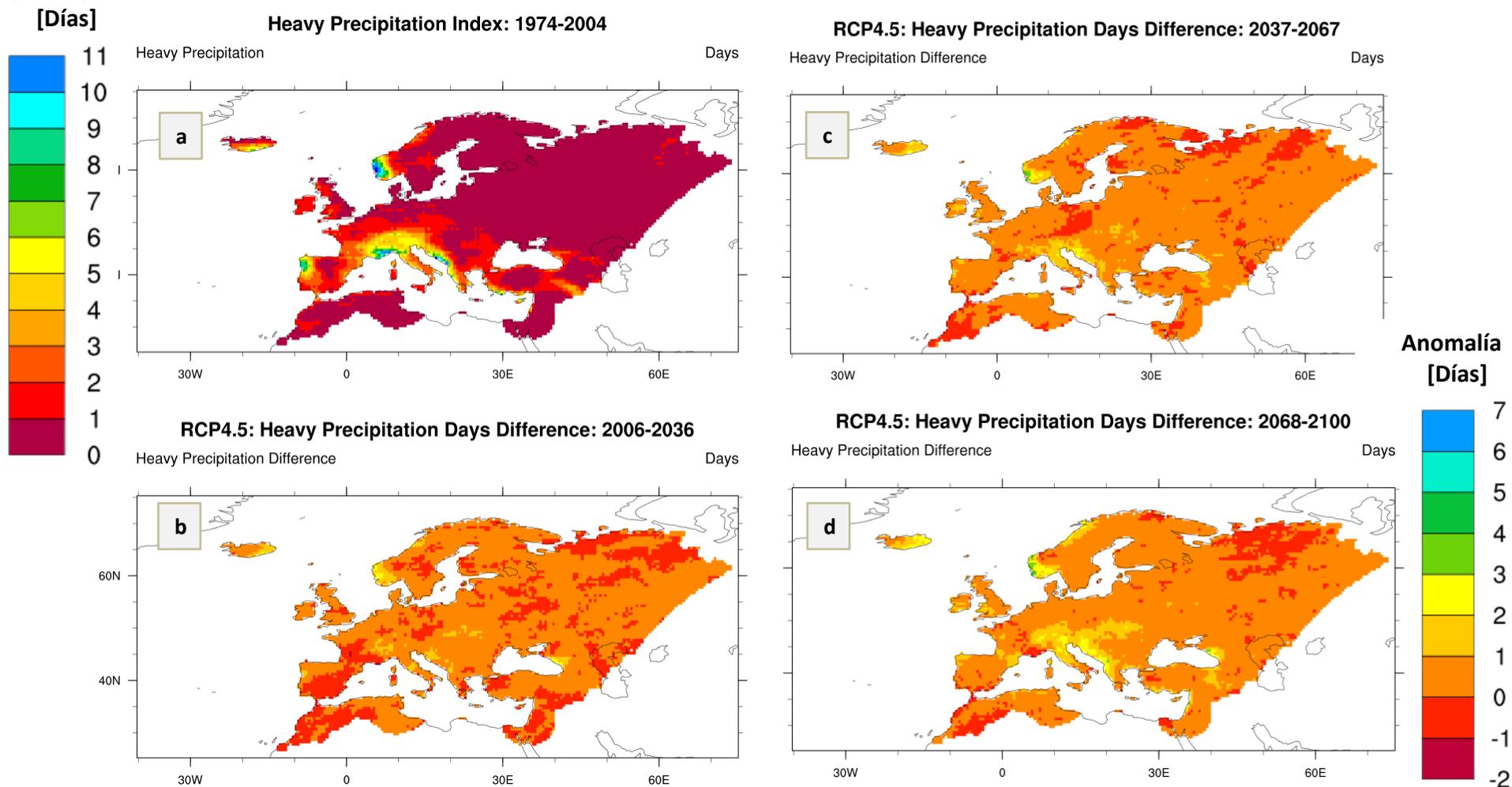


**Anomalía
[Días]**



D. Figura 15: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Temperatura Superficial del Aire (2m): **Persistencia**. Evolución del Cold Spell Duration Index (CSDI) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

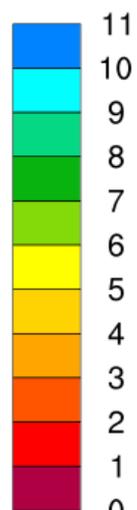
Heavy Precipitation



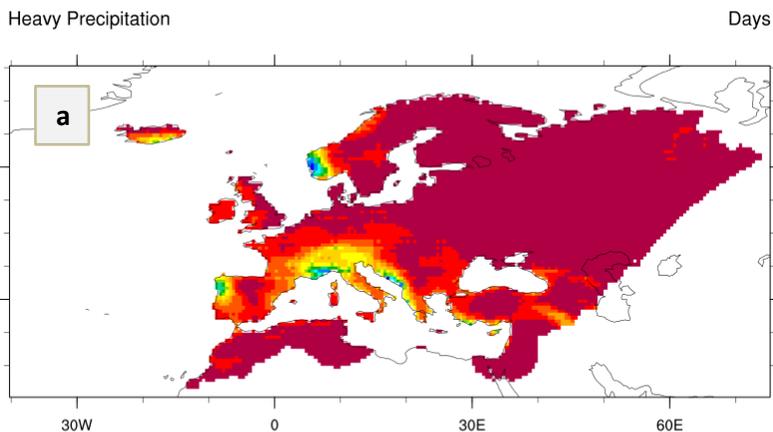
D. Figura 16: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Frecuencia**. Evolución del Heavy Precipitation Index (**R20**) [días] con el **RCP4.5**. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

Heavy Precipitation

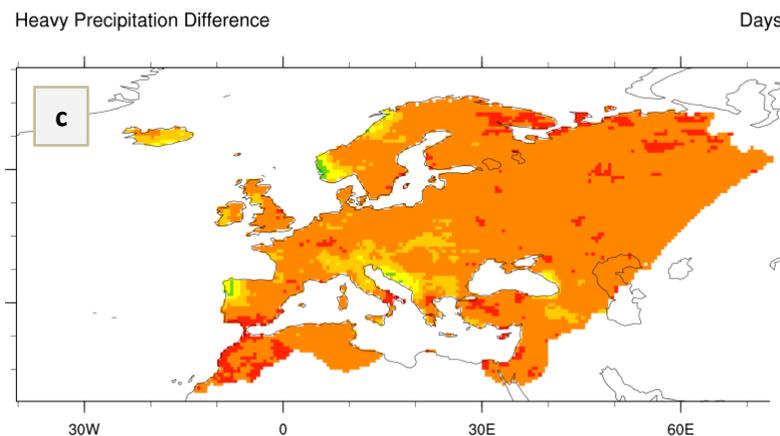
[Días]



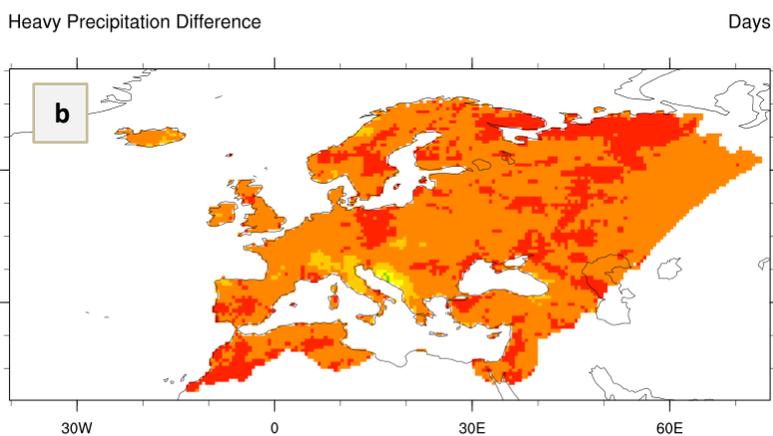
Heavy Precipitation Index: 1974-2004



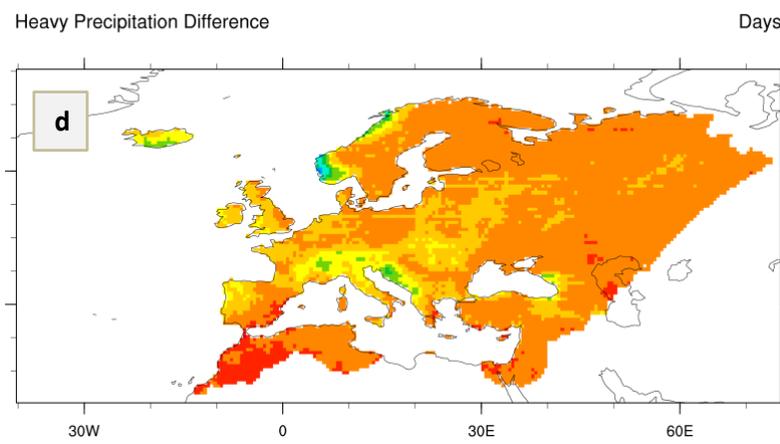
RCP8.5: Heavy Precipitation Days Difference: 2037-2067



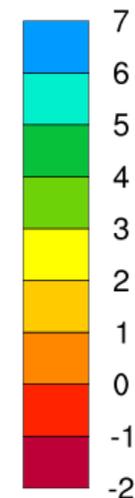
RCP8.5: Heavy Precipitation Days Difference: 2006-2036



RCP8.5: Heavy Precipitation Days Difference: 2068-2100

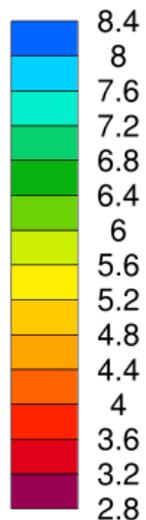


Anomalía [Días]

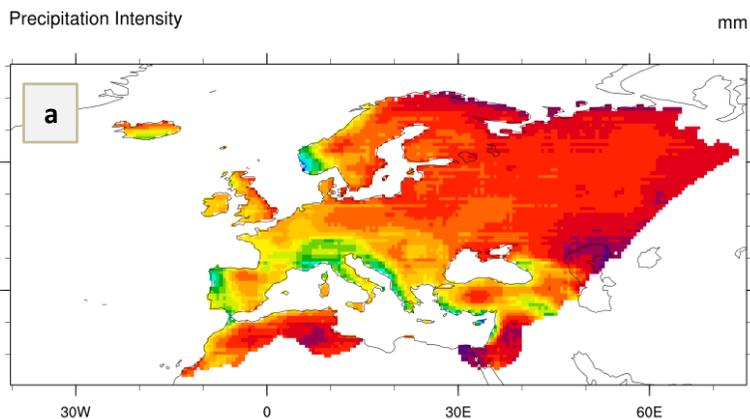


D. Figura 17: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Frecuencia**. Evolución del Heavy Precipitation Index (**R20**) [días] con el **RCP8.5**. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

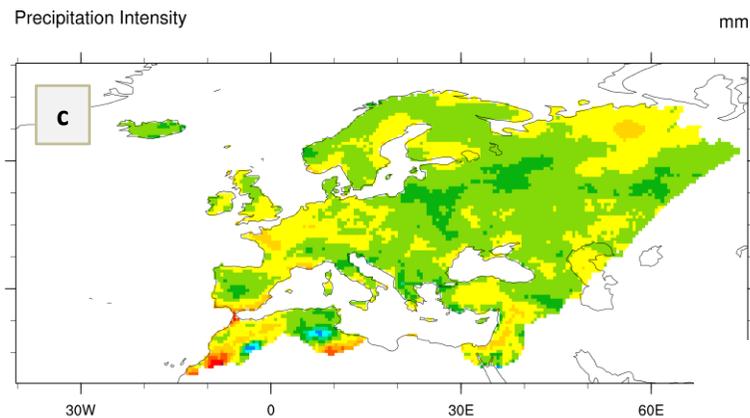
**Daily Intensity
[mm/día]**



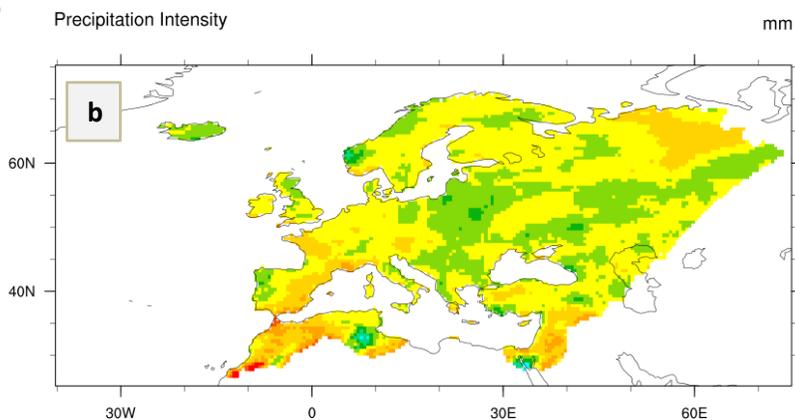
Simple Daily Intensity Index: 1974-2004



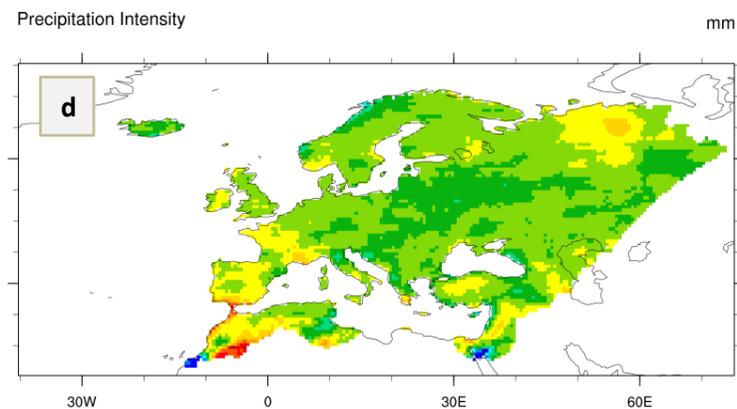
RCP4.5: Precipitation Intensity Difference: 2037-2067



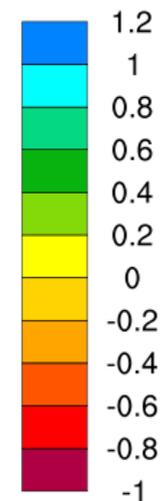
RCP4.5: Precipitation Intensity Difference: 2006-2036



RCP4.5: Precipitation Intensity Difference: 2068-2100

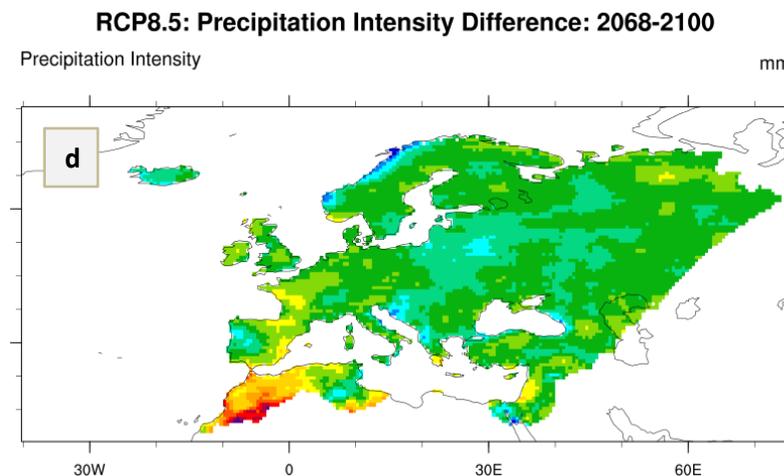
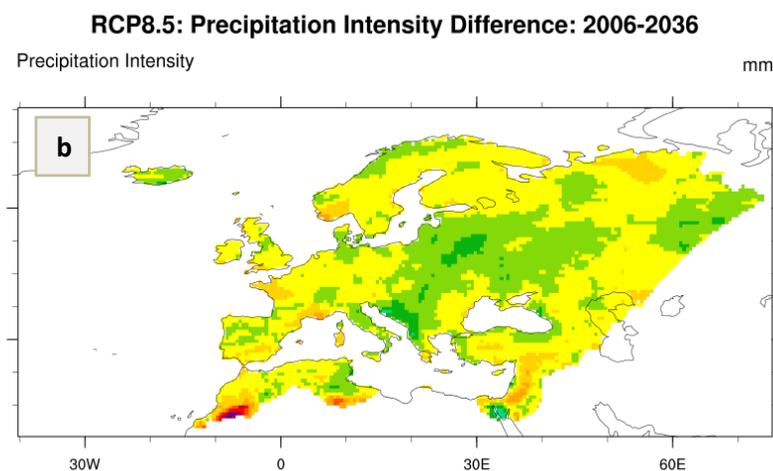
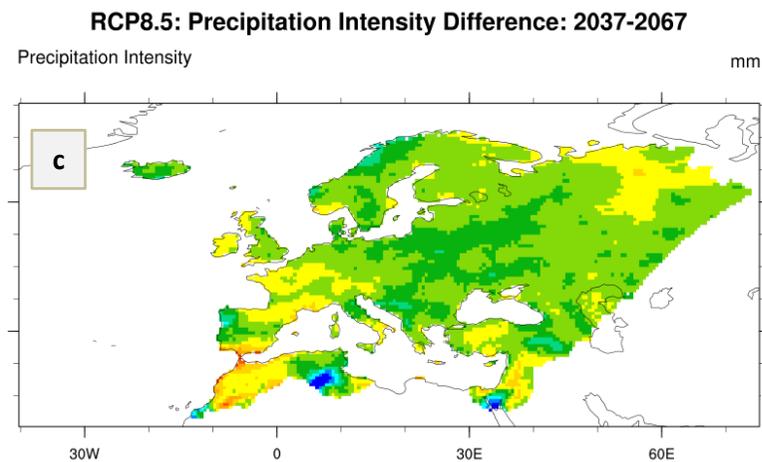
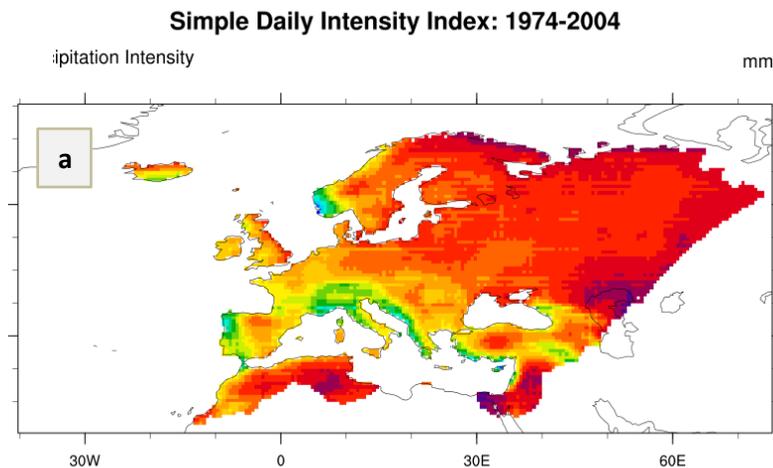
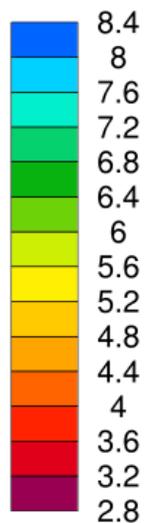


**Anomalía
[mm/día]**

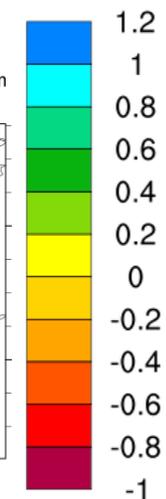


D. Figura 18: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Intensidad**. Evolución del Simple Daily Intensity Index (SDII) [mm/día] con el **RCP4.5**. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

Daily Intensity
[mm/día]

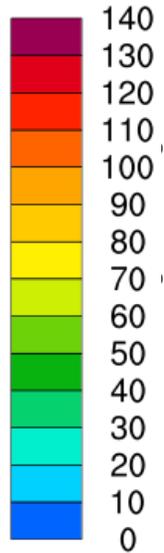


Anomalía
[mm/día]

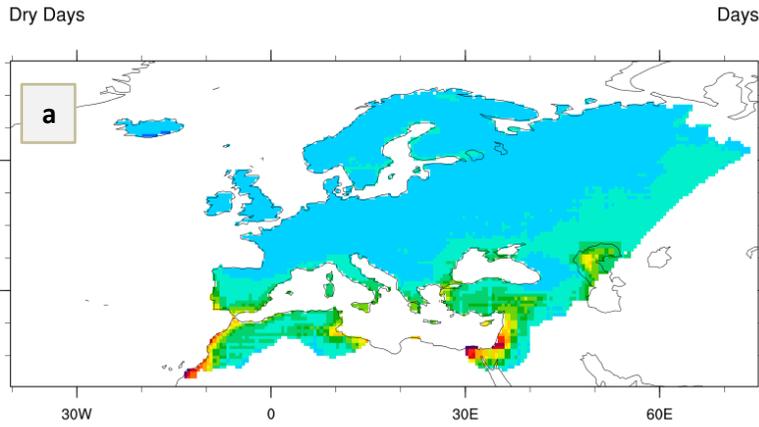


D. Figura 19: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Intensidad**. Evolución del Simple Daily Intensity Index (**SDII**) [mm/día] con el **RCP8.5**. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

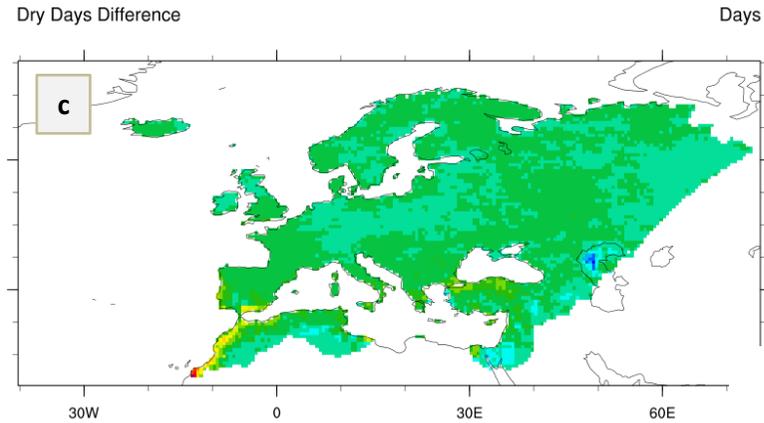
**Dry Spell
[Días]**



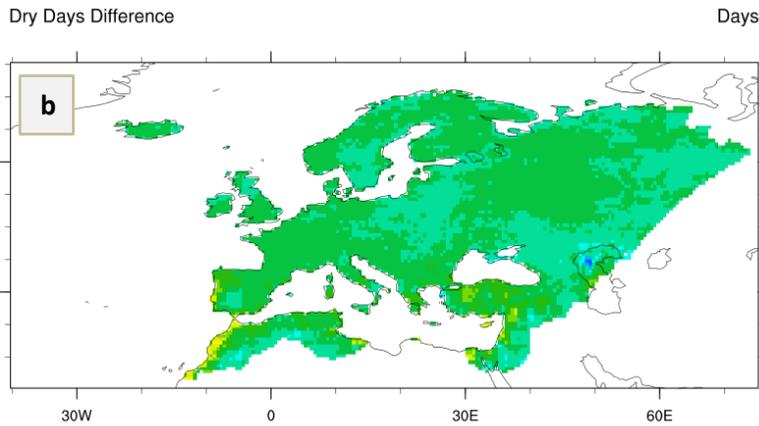
Consecutive Dry Days Index: 1974-2004



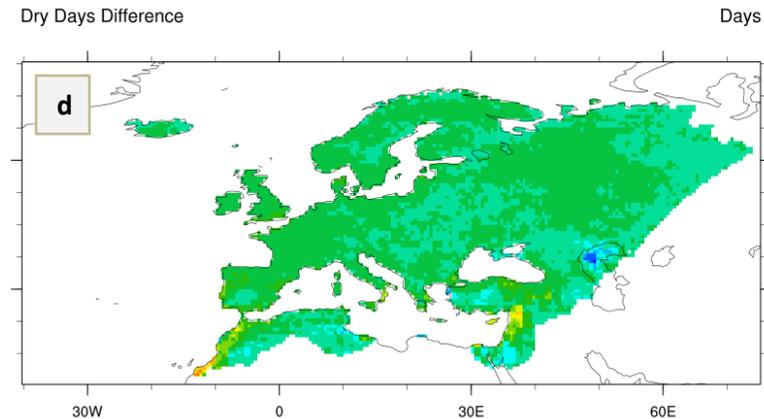
RCP4.5: Consecutive Dry Days Difference: 2037-2067



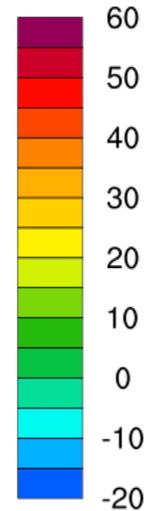
RCP4.5: Consecutive Dry Days Difference: 2006-2036



RCP4.5: Consecutive Dry Days Difference: 2068-2100

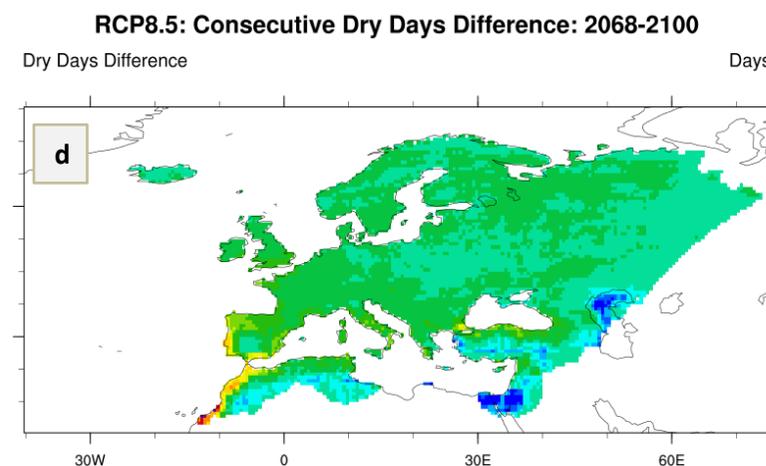
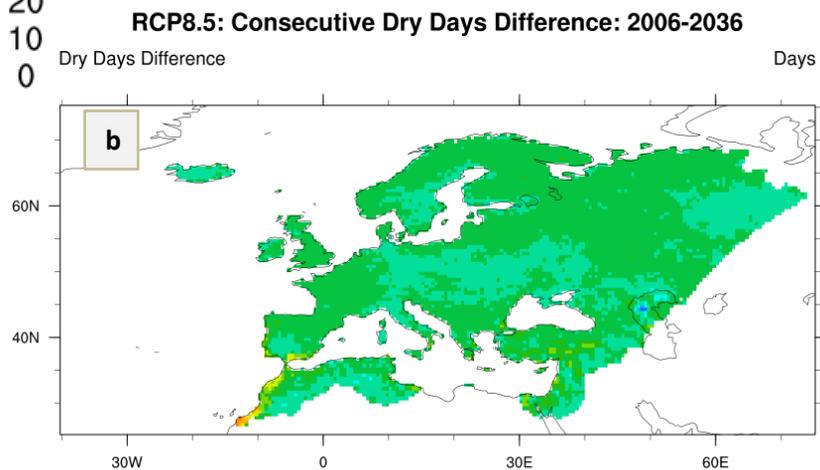
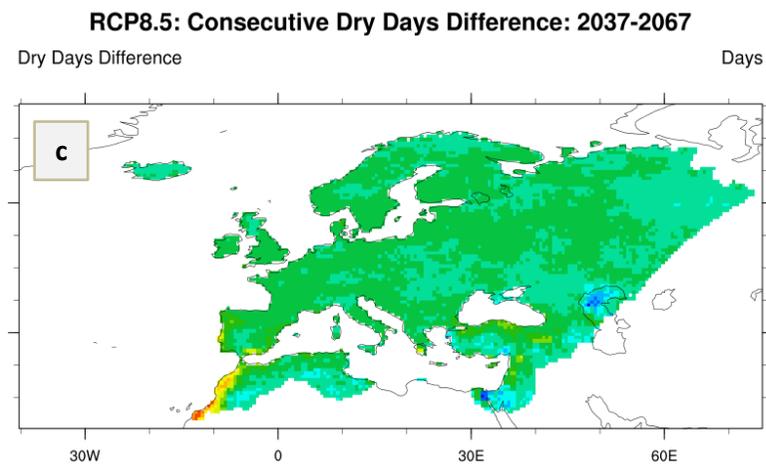
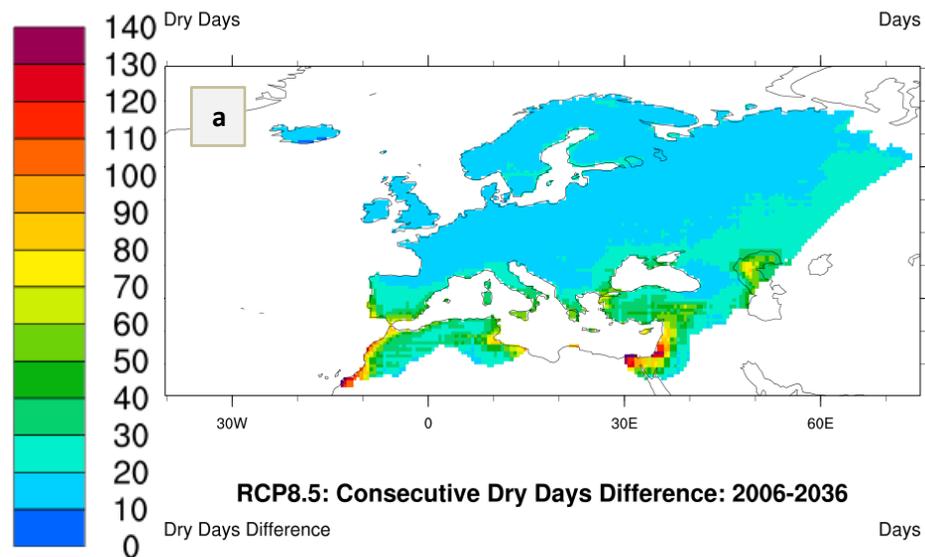


**Anomalía
[Días]**

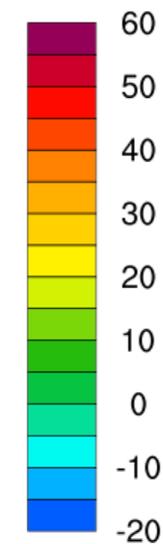


D. Figura 20: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Persistencia**. Evolución del Consecutive Dry Days Index (CDD) [días] con el **RCP4.5**. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

**Dry Spell
[Días]**

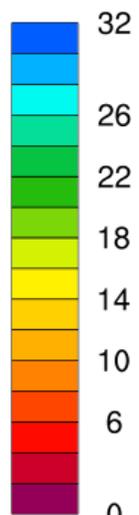


**Anomalía
[Días]**

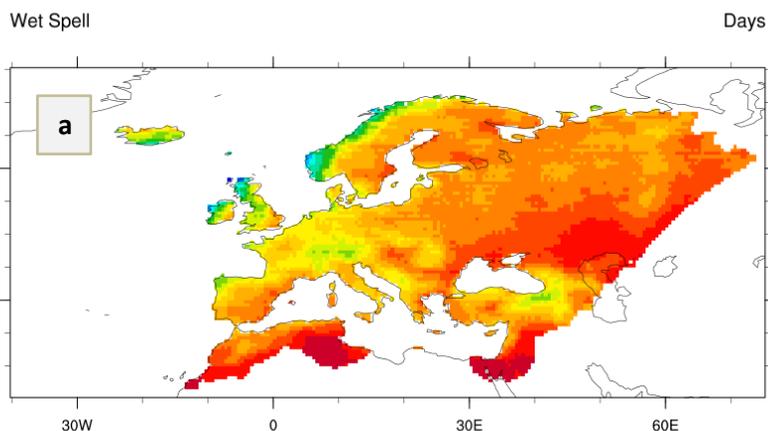


D. Figura 21: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Persistencia**. Evolución del Consecutive Dry Days Index (CDD) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

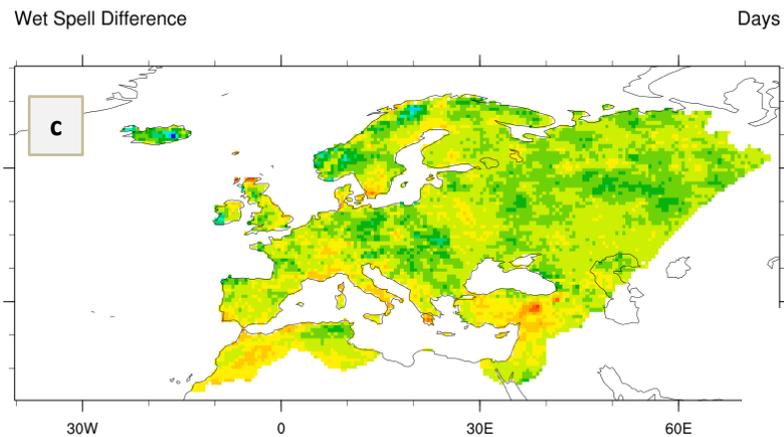
**Wet Spell
[Días]**



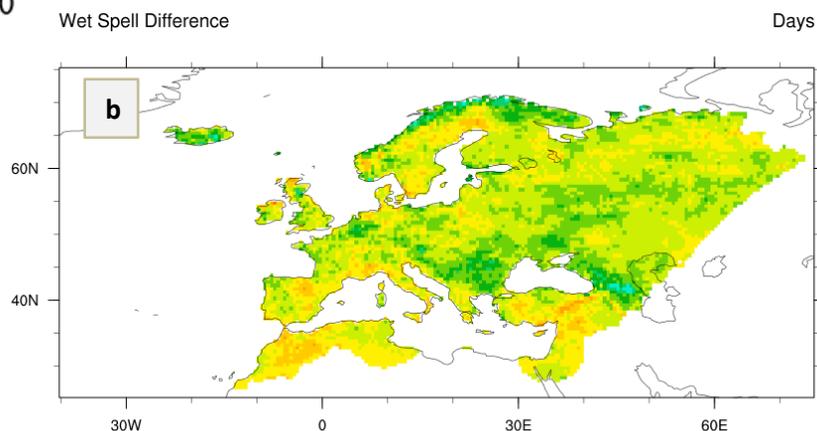
Wet Spell Duration Index: 1974-2004



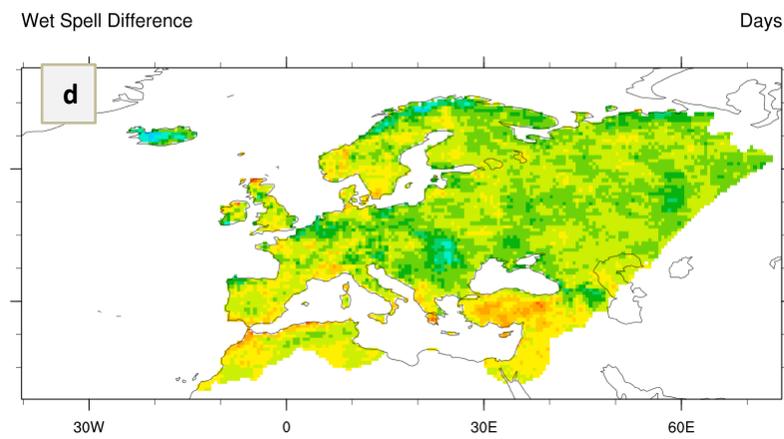
RCP4.5: Wet Spell Difference: 2037-2067



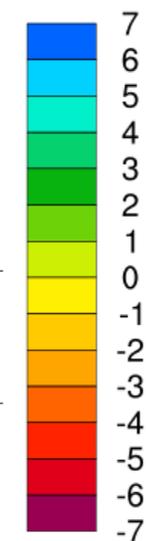
RCP4.5: Wet Spell Difference: 2006-2036



RCP4.5: Wet Spell Difference: 2068-2100

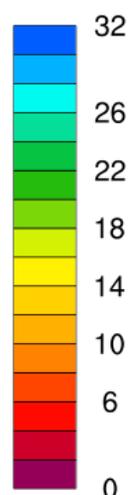


**Anomalia
[Días]**

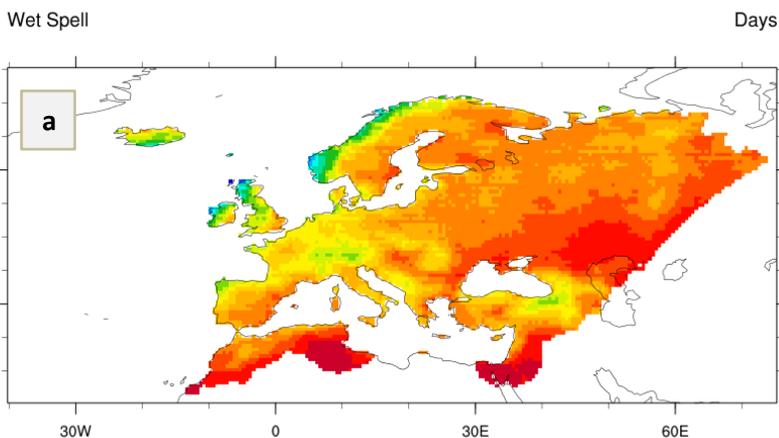


D. Figura 22: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Persistencia**. Evolución del Wet Spell Duration Index (CWD) [días] con el RCP4.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.

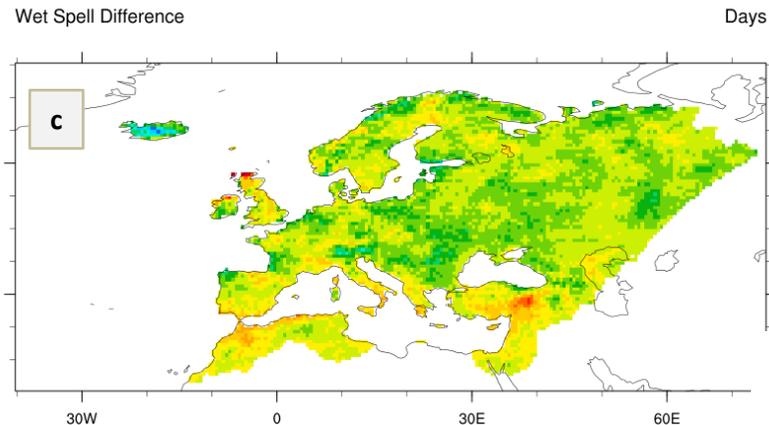
**Wet Spell
[Días]**



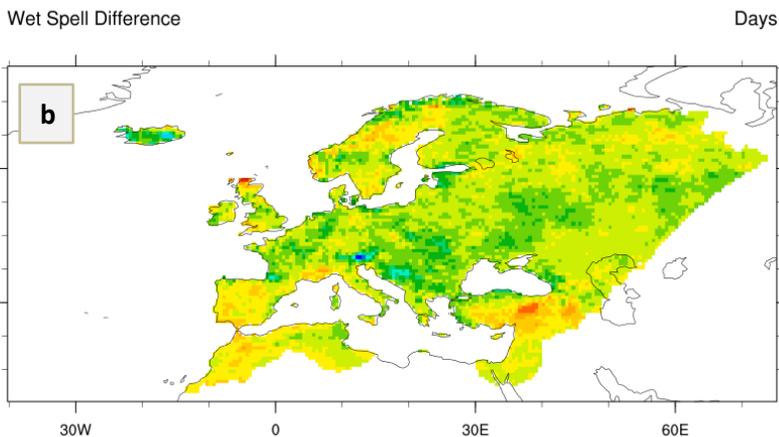
Wet Spell Duration Index: 1974-2004



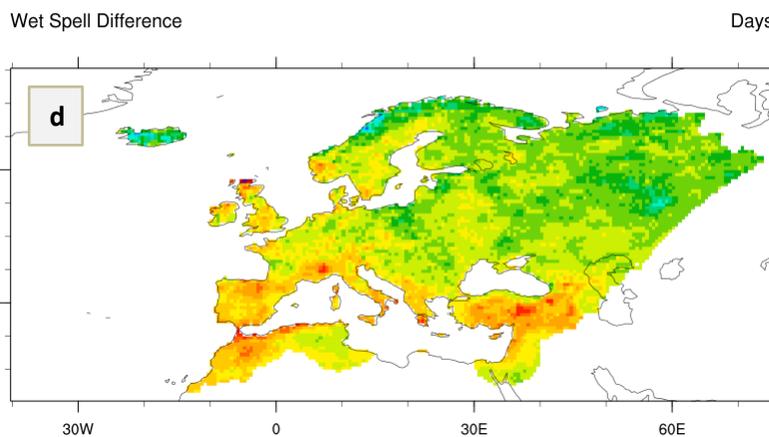
RCP8.5: Wet Spell Difference: 2037-2067



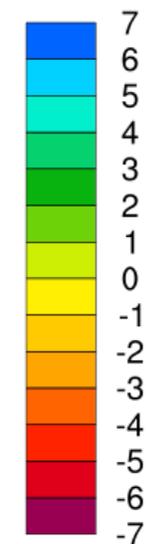
RCP8.5: Wet Spell Difference: 2006-2036



RCP8.5: Wet Spell Difference: 2068-2100



**Anomalia
[Días]**



8

D. Figura 23: Evaluación Zonal de las Proyecciones de los Índices de Precipitación Diaria: **Persistencia**. Evolución del Wet Spell Duration Index (CWD) [días] con el RCP8.5. Figura a: Promedio zonal del índice para el periodo histórico 1974-2004. Figuras b, c y d: Evolución zonal del índice para el siglo XXI.