



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

INFORME
TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 40-617-5-001

Madrid, mayo de 2021

Centro de Estudios Hidrográficos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

INFORME FINAL
TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 40-617-5-001

Madrid, mayo de 2021

Centro de Estudios Hidrográficos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

TÍTULO:

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

INFORME

CLIENTE:

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLAUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACIÓN CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

Fdo. Federico Estrada Lorenzo

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, mayo de 2021

LA DIRECTORA DEL CEDEX

Fdo. Áurea Perucho Martínez

SÓLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN.



ÍNDICE

MEMORIA

1. ANTECEDENTES Y OBJETO DEL ESTUDIO	1
2. INFORMACIÓN DE PARTIDA	7
2.1. Proyecciones climáticas y variables de estudio	7
2.2. Zona de estudio, regiones y estaciones	11
3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DE ESTUDIO RESPECTO A LAS OBSERVACIONES	17
3.1. Introducción	17
3.2. Metodología	17
3.3. Resultados y discusión	19
3.4. Conclusiones del análisis	30
4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS Y CAMBIOS EN LAS VARIABLES DE ESTUDIO EN LOS PERIODOS DE IMPACTO	33
4.1. Introducción	33
4.2. Metodología	33
4.2.1. Análisis de tendencias	33
4.2.2. Análisis de cambios en la mediana	34
4.2.3. Análisis de cambios en la varianza	34
4.2.4. Análisis de la significancia a nivel de región	35
4.2.5. Resumen del procedimiento para la identificación de tendencias y cambios significativos	36
4.2.6. Análisis de la estacionalidad	36
4.3. Resultados y discusión	36
4.4. Conclusiones del análisis	68
5. ESTIMACIÓN DE TASAS DE CAMBIO EN CUANTIL	71
5.1. Introducción	71
5.2. Metodología	72
5.2.1. Ajuste de la distribución SQRT-ET_{max}	72
5.2.2. Ajuste de la distribución GEV	73
5.2.3. Estimación de las tasas de cambio en cuantil	73
5.2.4. Análisis de la significancia de las tasas de cambio en cuantil	74
5.2.5. Análisis de los cambios en el factor de torrencialidad	77
5.2.6. Transformación de las tasas de cambio de rejilla rotada a rejilla regular	78
5.3. Resultados y discusión	79
5.4. Conclusiones del análisis	132



6. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LOS CUANTILES DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL ACUMULADA EN LA RED FLUVIAL	139
6.1. Introducción	139
6.2. Metodología	139
6.2.1. Elaboración de mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual futura	139
6.2.2. Elaboración de mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada	140
6.3. Resultados y discusión	141
6.4. Conclusiones del análisis	148
7. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	151
8. EQUIPO DE TRABAJO	161
REFERENCIAS	163

ANEXOS

- Anexo nº 1. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual para cada modelo climático de estudio.
- Anexo nº 2. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual observada y simulada por los modelos climáticos de estudio para el periodo de control en las regiones climáticas.
- Anexo nº 3. Mapas de tendencias, cambios en la mediana y en la varianza significativos para cada modelo climático de estudio en relación a la precipitación diaria máxima anual.
- Anexo nº 4. Contraste de la estacionalidad media de la precipitación diaria máxima anual en los periodos de impacto respecto al periodo de control en las regiones climáticas.
- Anexo nº 5. Mapas de tasas de cambio en cuantil asociadas a los modelos SQRT-R y GEV-L para cada modelo climático común en relación a la precipitación diaria máxima anual.
- Anexo nº 6. Mapas de tasas de cambio en cuantil significativas para $\alpha = 0.10$ asociadas con el modelo SQRT-R para cada modelo climático común en relación a la precipitación diaria máxima anual.
- Anexo nº 7. Mapas de tasas de cambio en cuantil medias para el modelo GEV-L indicando significancia para $\alpha = 0.33$.
- Anexo nº 8. Descripción de las capas proporcionadas en formato ASCII como resultado del estudio.
- Anexo nº 9. Descripción de los tramos fluviales con cambios en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península por demarcación hidrográfica.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. (a) Zona de estudio, indicando celdas y número de estaciones meteorológicas por celda; (b) Resumen del número de estaciones meteorológicas por celda. (“rlon” y “rlat” se refieren a longitud y latitud en rejilla rotada, respectivamente).	13
Figura 2.2. (a) División de la zona de estudio en 29 regiones climáticas; (b) Número de celdas por región; (c) Número de estaciones meteorológicas por región. (“rlon” y “rlat” se refieren a longitud y latitud en rejilla rotada, respectivamente).	15
Figura 3.1. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para los modelos climáticos: (a) “9_MOH-RCA” y (b) “15_MPI-REMO2”	22
Figura 3.2. Análisis de la media de la precipitación diaria máxima anual por regiones: sobreestimación (en rojo) o subestimación (en azul) por parte de los modelos climáticos de estudio en relación a la media observada.	25
Figura 3.3. Modelo climático de estudio con mejor resultado en cada región respecto a la precipitación diaria máxima anual. (“rlon” y “rlat” se refieren a longitud y latitud en rejilla rotada, respectivamente).	28
Figura 3.4. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones para el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en las regiones “0101” (arriba) y “0801” (abajo).	29
Figura 4.1. Número de celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en los modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual.	39
Figura 4.2. Número de celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en los modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual.	40
Figura 4.3. Número de celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en los modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual.	41
Figura 4.4. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente).	42
Figura 4.5. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).	43
Figura 4.6. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).	44
Figura 4.7. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y los escenarios RCP 4.5 (arriba) y RCP 8.5 (abajo) respecto al periodo de control en la región “0101”.	46
Figura 4.8. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y los escenarios RCP 4.5 (arriba) y RCP 8.5 (abajo) respecto al periodo de control en la región “0801”.	47
Figura 4.9. Estacionalidad proporcionada por los distintos modelos climáticos para la precipitación diaria máxima anual en el periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en las regiones “0101” (arriba) y “0801” (abajo).	48
Figura 4.10. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente).	50
Figura 4.11. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).	51
Figura 4.12. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).	52



Figura 4.13. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación horaria máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente). 54

Figura 4.14. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación horaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 55

Figura 4.15. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación horaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 56

Figura 4.16. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 3 horas máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente). 58

Figura 4.17. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 3 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 59

Figura 4.18. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 3 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 60

Figura 4.19. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 6 horas máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente). 61

Figura 4.20. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 6 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 62

Figura 4.21. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 6 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 63

Figura 4.22. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 12 horas máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente). 65

Figura 4.23. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 12 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 66

Figura 4.24. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 12 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente). 67

Figura 5.1. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5. 85

Figura 5.2. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5. 86

Figura 5.3. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5. 87

Figura 5.4. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5. 88

Figura 5.5. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5. 89

Figura 5.6. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5. 90



Figura 5.7. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5..... 91

Figura 5.8. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5..... 92

Figura 5.9. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5..... 93

Figura 5.10. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5..... 94

Figura 5.11. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5..... 95

Figura 5.12. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5..... 96

Figura 5.13. Celdas con cambios significativos en estadísticos (mediana, varianza y coeficiente de sesgo) y cuantiles ($T = 10, 100$ y 500 años) calculados con simulaciones de Monte Carlo (MC) para precipitación diaria máxima anual mediante el modelo SQRT-R para el modelo “10_ICH-RCA” en relación al periodo de impacto 2041-2070 y RCP 8.5. (“*pos*” = *positivo*; “*neg*”= *negativo*)..... 104

Figura 5.14. Celdas con cambios significativos en la mediana y varianza calculados mediante los test estadísticos de Wilcoxon y Fligner Killeen, respectivamente, para precipitación diaria máxima anual en la Península mediante el modelo SQRT-R para el modelo “10_ICH-RCA” en relación al periodo de impacto 2041-2070 y RCP 8.5. (“*pos*” = *positivo*; “*neg*”= *negativo*)..... 105

Figura 5.15. Comparación de las tasas de cambio en cuantil medias significativas en la Península y Baleares obtenidas en MITECO (2018) (GEV-L con $\alpha \approx 0.33$, con cambios significativos si al menos la mitad de los 12 primeros modelos climáticos en Tabla 2.1 identifican cambio) y en el presente estudio (GEV-L con $\alpha = 0.33$ y SQRT-R con $\alpha = 0.10$, con cambios significativos si la mayoría de modelos climáticos comunes identifican cambio) para precipitación diaria máxima anual para el periodo de impacto 2041-2070, $T = 100$ años y escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados del presente trabajo se representan una vez transformados a rejilla regular con el fin de facilitar la comparación..... 107

Figura 5.16. Transformación de rejilla rotada a rejilla regular de las tasas de cambio en cuantil medias obtenidas en base al uso de los modelos climáticos comunes para precipitación diaria máxima anual en relación al periodo de impacto 2071-2100, escenario RCP 4.5 y $T = 100$ años para el modelo SQRT-R en la Península y Baleares, y para el modelo GEV-L en toda la zona de estudio..... 112

Figura 5.17. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5. 116

Figura 5.18. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5. 117

Figura 5.19. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5. 118

Figura 5.20. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5. 119

Figura 5.21. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5. 123



Figura 5.22. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5.	124
Figura 5.23. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.	125
Figura 5.24. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.	126
Figura 5.25. Cambios relativos en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 4.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.	128
Figura 5.26. Cambios relativos en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 8.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.	129
Figura 5.27. Cambios relativos regionales en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 4.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables. <i>(El signo entre paréntesis indica que el valor con decimales es mayor “(+)” o menor “(-)” que el valor tras el redondeo; las regiones rayadas están asociadas con valores del “0%” al no existir celdas con cambios significativos para ninguna de las dos variables).</i>	131
Figura 5.28. Cambios relativos regionales en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 8.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables. <i>(El signo entre paréntesis indica que el valor con decimales es mayor “(+)” o menor “(-)” que el valor tras el redondeo).</i>	132
Figura 6.1. Ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas peninsulares.....	143
Figura 6.2. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 4.5 y $T = 10$ años.	143
Figura 6.3. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 4.5 y $T = 100$ años.	144
Figura 6.4. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 4.5 y $T = 500$ años.	145
Figura 6.5. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 8.5 y $T = 10$ años.	146
Figura 6.6. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 8.5 y $T = 100$ años.	147
Figura 6.7. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 8.5 y $T = 500$ años.	148



INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen comparativo entre MITECO (2018) y el presente estudio.	4
Tabla 2.1. Modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX utilizados en el presente estudio. (* MPI-REMO1 usa el “ensemble” “r1i1p1” y MPI-REMO2 usa “r2i1p1”).	9
Tabla 2.2. Modelos climáticos de estudio para la extracción de series máximas anuales, indicando simulaciones disponibles para el periodo de impacto completo 2011-2100. (* Disponibilidad de 89 en vez de 90 años de datos).	10
Tabla 3.1. Media de los estadísticos de las series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual en las celdas con estaciones, y signo de dichos estadísticos con respecto a los de las series observadas. (* Sobreestimación del modelo climático se indica como “+1” y subestimación como “-1”).	23
Tabla 3.2. Análisis por regiones de la ubicación del valor de los estadísticos de las series observadas de precipitación diaria máxima anual respecto al rango de los estadísticos obtenidos mediante los modelos climáticos de estudio (“SI” indica dentro del rango y “NO” indica fuera del rango).	24
Tabla 3.3. Correlación entre estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual.	26
Tabla 3.4. RRMSE entre estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual, posición en la clasificación de modelos (considerando los resultados asociados a la media, al LCV, al LCS y al maxstd) y número de regiones para los que cada modelo climático de estudio obtiene el mejor resultado.	26
Tabla 4.1. Número de modelos climáticos disponible para cada variable de estudio, así como mayoría asociada para el análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza.	37
Tabla 4.2. Número de regiones con tendencias o cambios en la mediana o en la varianza significativos para las variables de estudio. (El signo “+” indica resultados significativos positivos y el signo “-” significativos negativos).	68
Tabla 5.1. Número de modelos climáticos de estudio y comunes disponibles para las variables de estudio consideradas, así como mayoría necesaria para la estimación de tasas de cambio en cuantil medias significativas positivas o negativas.	81
Tabla 5.2. CV regional para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos de estudio para los distintos periodos analizados. (En color se identifican los valores mínimos y máximos del CV regional considerando toda la zona de estudio, la Península y Baleares, o solo la Península; * las regiones “1100”, “1300” y “1400” corresponden con las Islas Baleares, Melilla y Ceuta, respectivamente).	82
Tabla 5.3. Ajuste del modelo SQRT-R en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes para todos los periodos de estudio.	83
Tabla 5.4. Ajuste del modelo GEV-L en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes para todos los periodos de estudio.	84
Tabla 5.5. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.	98
Tabla 5.6. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.	99
Tabla 5.7. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.	100
Tabla 5.8. Valor medio sobre la Península y Baleares de las tasas de cambio en cuantil medias y asociadas a los percentiles 10 y 90 (expresadas en %), resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.	101
Tabla 5.9. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación diaria máxima anual para la mayoría de modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).	103
Tabla 5.10. Tasas de cambio en cuantil medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ (expresadas en %) resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria	



máxima anual en base a los modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).....	108
Tabla 5.11. Valor medio de las tasas de cambio en cuantil significativas (sin inconsistencias) asociadas a la media y a los percentiles 10 y 90 (expresadas en %), resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.....	109
Tabla 5.12. Número de regiones en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación diaria máxima anual para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes. (Número de regiones con cambios consistentes entre paréntesis).	110
Tabla 5.13. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) en rejilla rotada y en rejilla regular en la Península y Baleares, resultantes del ajuste del modelo SQRT-R para precipitación diaria máxima anual en base a la mayoría de modelos climáticos comunes.....	112
Tabla 5.14. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) en rejilla rotada y en rejilla regular en toda la zona de estudio, resultantes del ajuste del modelo GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a la mayoría de modelos climáticos comunes.....	113
Tabla 5.15. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación convectiva diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.....	114
Tabla 5.16. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación convectiva diaria máxima anual para la mayoría de modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).	115
Tabla 5.17. Tasas de cambio en cuantil medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ (expresadas en %) resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación convectiva diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.....	115
Tabla 5.18. Número de regiones en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación convectiva diaria máxima anual para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes. (Número de regiones con cambios consistentes entre paréntesis).	115
Tabla 5.19. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación horaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.....	121
Tabla 5.20. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación horaria máxima anual para la mayoría de modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).....	122
Tabla 5.21. Tasas de cambio en cuantil medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ (expresadas en %) resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación horaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.	122
Tabla 5.22. Número de regiones en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación horaria máxima anual para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes. (Número de regiones con cambios consistentes entre paréntesis).	122
Tabla 5.23. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.	127
Tabla 5.24. Cambios relativos en el factor de torrencialidad (expresados en %) en la Península y Baleares, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.	127
Tabla 5.25. Cambios relativos regionales en el factor de torrencialidad (expresados en %) en la Península y Baleares, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.	130
Tabla 5.26. Rango de las tasas de cambio en cuantil medias y medias significativas, del porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo positivo para los modelos SQRT-R y GEV-L, así como del	



número de regiones con cambio en cuantil significativo consistente para el modelo SQRT-R en la Península y Baleares, en base a los modelos climáticos comunes para las variables de estudio consideradas. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0. El signo “+” indica resultados significativos positivos y el signo “-” negativos)..... 133

Tabla 6.1. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas (expresadas en %) en rejilla regular tras remuestreo, asociadas al periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) en la Península. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0). 141

Tabla 6.2. Cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada y futura (expresados en mm) asociados al periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R en la Península. Los valores observados provienen de DGC (1999); los valores futuros provienen de la aplicación de las tasas de cambio en cuantil medias significativas en rejilla regular tras remuestreo (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes). 142

Tabla 6.3. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada (expresadas en %) asociadas al periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para la Península. Los valores provienen de la aplicación de las tasas de cambio en cuantil medias significativas en rejilla regular tras remuestreo (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes)..... 142



Listado de acrónimos

Acrónimo	Concepto
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEH	Centro de Estudios Hidrográficos
CS	Coeficiente de Sesgo
CV	Coeficiente de Variación
DGC	Dirección General de Carreteras
EPRI	Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación
ESMF	Marco de Modelado del Sistema Terrestre (<i>"Earth System Modeling Framework"</i>)
EURO-CORDEX	Experimento de Reducción de Escala Coordinado – Dominio Europeo (<i>"Coordinated Downscaling Experiment – European Domain"</i>)
GEV	Distribución de Valores Extremos Generalizada (<i>"Generalized Extreme Value distribution"</i>)
GEV-L	Ajuste Local de la GEV
IDF	Intensidad-Duración-Frecuencia
IPCC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (<i>"Intergovernmental Panel on Climate Change"</i>)
LCS	L-Coeficiente de Sesgo
LCV	L-Coeficiente de Variación
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica
NA-CORDEX	Experimento de Reducción de Escala Coordinado – Dominio Norteamericano (<i>"Coordinated Downscaling Experiment – North American Domain"</i>)
NCL	Lenguaje de Comando NCAR (<i>"NCAR Command Language"</i>)
PGRI	Planes de Gestión del Riesgo de Inundación
RCP	Senda o Trayectoria de Concentración Representativa (<i>"Representative Concentration Pathway"</i>)
RRMSE	Error Relativo Cuadrático Medio (<i>"Relative Root Mean Squared Error"</i>)
SDSM	Método de Reducción de Escala Estadístico (<i>"Statistical Downscaling Method"</i>)
SQRT-ET _{max}	Distribución del Máximo de la Exponencial de la Raíz Cuadrada
SQRT-R	Ajuste Regional de la SQRT-ET _{max}
UPM	Universidad Politécnica de Madrid



1. ANTECEDENTES Y OBJETO DEL ESTUDIO

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), es un Organismo Autónomo, de los previstos en el artículo 43.1.a) de la Ley 6/1997, de 14 de abril, de Organización y Funcionamiento de la Administración General del Estado, adscrito orgánicamente al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana a través de la Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, y funcionalmente a éste y al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, cuyas funciones son la de asistencia técnica, asesoramiento, colaboración y difusión de todas aquellas materias tecnológicas que tienen relación con la obra pública y el medio ambiente asociado.

De acuerdo con lo establecido en el Real Decreto 1136/2002, de 31 de octubre, por el que se aprueba el Estatuto del CEDEX (modificado sucesivamente por los reales decretos 591/2005, de 20 de mayo; 364/2009, de 20 de marzo; 638/2010, de 14 de mayo; 582/2011, de 20 de abril y 452/2012, de 5 de marzo) para el cumplimiento de sus fines el CEDEX ejerce, sin perjuicio de las competencias de los departamentos ministeriales de los que depende orgánica y funcionalmente, distintas funciones entre las que se encuentra obtener, estudiar y facilitar datos básicos de la naturaleza, e impulsar, promover, fomentar y realizar actividades de investigación científica y técnica y de innovación tecnológica, encabezando el avance del conocimiento.

El Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) es el centro perteneciente al CEDEX especializado en temas como la hidrología, la planificación y gestión hidráulica o la ingeniería de las aguas continentales, así como en aspectos relacionados con la calidad de estas. En este contexto, y en relación al objeto de este informe, en el CEH se trabaja desde hace años en la evaluación del impacto del cambio climático en distintos aspectos de las aguas continentales como el ciclo hidrológico, los sistemas de explotación, las demandas o el estado ecológico de las masas de agua. En concreto, a través de su área de hidrología, en el CEH se han realizado diversos estudios relativos al impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos y sobre los fenómenos extremos como las sequías y las crecidas.

La Directiva 2007/60/CE de Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundación, traspuesta a la normativa española por el Real Decreto 903/2010, establece en su artículo 14.4 que las posibles repercusiones del cambio climático en la incidencia de las inundaciones se tomarán en consideración en las revisiones de la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) y de los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI). De esta forma, en la revisión de los PGRI actualmente vigentes, que debe llevarse a cabo antes de finales de 2021, debe considerarse el posible efecto del cambio climático.

El objetivo de este estudio es la evaluación del impacto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas anuales, en distintos intervalos temporales, a partir de simulaciones procedentes de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX. El ámbito de estudio es el conjunto del territorio español a excepción de las Islas Canarias, ya que no se dispone de datos para este territorio en la información de partida utilizada. Este objetivo es de interés para la Dirección General del Agua, ya que los resultados del estudio pueden ser útiles para incorporar los efectos del cambio climático en los estudios relacionados con el riesgo hidrológico o el riesgo



por inundación y, en particular, para dar respuesta a lo exigido por la Directiva de Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundación en lo relativo a la consideración del cambio climático en la revisión de los PGRI. Asimismo, las conclusiones y resultados de este estudio pueden servir de base para realizar una estimación preliminar del impacto del cambio climático sobre los caudales de crecida, tanto en el contexto de los PGRI como en el de otros estudios. De esta forma, el presente estudio está incluido en el *Programa por el que se definen las líneas de trabajo que ha de desarrollar el CEDEX para la Dirección General del Agua en relación con la investigación y el desarrollo en recursos e infraestructuras hidráulicas*, suscrito por ambas partes con fecha 19 de julio de 2018.

Como antecedentes al presente informe pueden considerarse los siguientes documentos:

- 1) El informe elaborado por el CEDEX en 2010 con título “Evaluación del Impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural” ([CEDEX 2010](#)), realizado por encargo de la Dirección General del Agua. Este trabajo abordó el estudio del impacto del cambio climático en los recursos hídricos, las sequías y las precipitaciones máximas. La parte correspondiente al impacto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas fue ampliada posteriormente y publicada mediante el artículo [Barranco et al. \(2017\)](#). Mediante este trabajo se llevó a cabo el análisis de tendencias y cambios en la precipitación diaria máxima anual y la estimación de tasas de cambio en cuantil mediante el ajuste de la distribución SQRT-ET_{max} de forma local en estaciones meteorológicas, promediando dichos cuantiles en base a regiones climáticas ([Ferrer 1996](#)). Para ello se utilizaron proyecciones climáticas proporcionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ([AEMET 2008](#)), obtenidas mediante regionalización de los resultados de los modelos climáticos globales incluidos en el 3º Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC).
- 2) El Informe publicado por el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) en 2018, denominado “Incorporación del Cambio Climático en la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) en el Segundo Ciclo de Aplicación de la Directiva de Inundaciones (2007/60/CE)” ([MITECO 2018](#)). Dicho trabajo fue realizado por Tragsatec, bajo la supervisión y a partir de las directrices y la metodología establecida por el CEDEX, partiendo de resultados previamente obtenidos por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). En dicho informe se llevó a cabo la estimación de tasas de cambio en cuantil para precipitación diaria máxima anual mediante el ajuste de la distribución GEV de forma local en celdas con una resolución de 0.11 grados (aprox. 12.5 km), analizando la significancia estadística de los cambios y analizando los tramos de la red fluvial que previsiblemente podrían sufrir un mayor impacto del cambio climático en los caudales de crecida a través de la cuantificación de los cambios en la precipitación diaria máxima anual acumulada. Para ello se utilizaron proyecciones climáticas proporcionadas por EURO-CORDEX.

El estudio realizado por el CEDEX que se presenta en este informe puede considerarse una continuación de [MITECO \(2018\)](#). En este caso no se ha partido de los resultados previos obtenidos por la UPM, sino que se ha realizado directamente el análisis de las proyecciones climáticas regionalizadas de los 15 modelos EURO-CORDEX disponibles, como se expondrá más adelante, lo que ha permitido ampliar y profundizar en el estudio del impacto del cambio



climático en las precipitaciones máximas respecto a lo realizado en [MITECO \(2018\)](#). Se ha ampliado el número de variables analizadas, incluyendo las precipitaciones máximas en intervalos inferiores al día, se han estudiado tres periodos de impacto con objeto de valorar la evolución del impacto a lo largo de todo el siglo XXI y se han analizado tres periodos de retorno (10, 100 y 500 años) lo que ha permitido valorar el impacto en el conjunto de la ley de frecuencia. Asimismo, se han incluido en el estudio distintos aspectos como el contraste de las simulaciones climáticas con los datos observados en el periodo de control y el análisis de los cambios en los principales estadísticos de las series de precipitaciones máximas anuales, incorporando elementos empleados en [CEDEX \(2010\)](#) y [Barranco et al. \(2017\)](#), así como la estimación de los cuantiles mediante el ajuste regional de la distribución SQRT-ET_{max}, de forma que la metodología empleada para la estimación de tasas de cambio en cuantil se conecta con la utilizada en el estudio vigente sobre precipitaciones máximas a escala nacional (“Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” ([DGC 1999](#))) realizado por el CEDEX para la Dirección General de Carreteras (DGC). De este modo, se han valorado los cambios tanto a nivel de celda como mediante el uso de regiones climáticas. No obstante, la estimación de cuantiles también se ha realizado mediante el ajuste de la distribución GEV de manera local, modelo estadístico empleado en el trabajo realizado por la UPM del que se partió en [MITECO \(2018\)](#), posibilitando la comparación de resultados con los obtenidos en [MITECO \(2018\)](#), y permitiendo extraer conclusiones sobre la influencia del modelo estadístico en los resultados sobre las tasas de cambio en cuantil.

El resumen de diferencias relevantes en relación a la información utilizada o a los análisis llevados a cabo en este estudio respecto a [MITECO \(2018\)](#) se muestra en la [Tabla 1.1](#). Destaca, en la línea de lo indicado anteriormente, el análisis del comportamiento de seis variables de precipitación máxima anual asociadas a diferentes intervalos temporales, tanto a nivel de celda como a nivel de región, así como el uso de un mayor número de modelos climáticos, periodos de impacto, modelos estadísticos, periodos de retorno y valores representativos de las tasas de cambio resultantes del conjunto de modelos climáticos.



CEDEX

Tabla 1.1. Resumen comparativo entre MITECO (2018) y el presente estudio.

Características del estudio	MITECO 2018	Presente estudio
Análisis realizados	(i) N/A (ii) N/A (iii) Estimación de tasas de cambio en cuantil (iv) Análisis de cambios en precipitación acumulada en la red fluvial (v) Análisis cualitativo de cambios en caudales	(i) Contraste respecto a observaciones en el periodo de control (ii) Análisis de tendencias y cambios en los principales estadísticos (iii) Estimación de tasas de cambio en cuantil (iv) Análisis de cambios en precipitación acumulada en la red fluvial (v) N/A
Escala territorial	Celdas (0.11 grados, aprox. 12.5 km)	Celdas (0.11 grados, aprox. 12.5 km) Regiones climáticas
Variables de estudio	Precipitación diaria máxima anual	Precipitación diaria máxima anual Precipitación convectiva diaria máxima anual Precipitación horaria máxima anual Precipitación acumulada en 3 horas máxima anual Precipitación acumulada en 6 horas máxima anual Precipitación acumulada en 12 horas máxima anual
Nº de modelos climáticos de estudio	12 modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX	15 modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX
Periodo de control	1951-2005 o 1971-2005 (según el modelo climático)	1971-2000
Periodos de impacto	2041-2070	2011-2040 2041-2070 2071-2100
Escenarios	RCP 4.5 RCP 8.5	RCP 4.5 RCP 8.5
Modelos estadísticos	GEV – ajuste local	GEV – ajuste local SQRT-ET _{max} – ajuste regional
Periodos de retorno	100 años	10 años 100 años 500 años
Estimación de tasas de cambio	Medias	Medias Asociadas al percentil 10 Asociadas al percentil 90

El trabajo realizado consta de cuatro fases principales:

- (i) Análisis del comportamiento de las series de precipitación diaria máxima anual procedentes de modelos climáticos regionales en el periodo de control respecto a las series de precipitación diaria máxima anual observadas. El objetivo es evaluar si los modelos climáticos proporcionan series representativas y, por lo tanto, los resultados obtenidos a través de su análisis pueden considerarse realistas. Este análisis se incluye en la [sección 3](#).
- (ii) Análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza, así como en la estacionalidad, de las series de precipitación máxima anual procedentes de modelos climáticos regionales en los periodos de impacto. El objetivo es identificar posibles tendencias, cambios en las poblaciones estadísticas y cambios en la estacionalidad correspondientes a las variables de estudio debido al efecto del cambio climático. Este análisis se incluye en la [sección 4](#).
- (iii) Estimación de las tasas de cambio en cuantil medias, y asociadas a los percentiles 10 y 90 para valorar su incertidumbre, de las series de precipitación máxima anual diaria y horaria procedentes de modelos climáticos regionales, evaluación de la significancia estadística de las tasas de cambio en cuantil medias a través de la estimación de los intervalos de confianza asociados a los cuantiles del periodo de control, mediante la



realización de simulaciones de Monte Carlo, y de su posterior comparación con los cuantiles para los periodos de impacto y escenarios, siguiendo la metodología propuesta por el CEDEX y que ya fue empleada en MITECO (2018), así como estimación de los cambios en el factor de torrencialidad (relación entre la intensidad de precipitación horaria y diaria). El objetivo es proporcionar mapas de tasas de cambio en cuantil medias, identificando aquellas con significancia estadística para la evaluación del impacto del cambio climático sobre las leyes de frecuencia de precipitación máxima y su posible utilización en la evaluación del efecto del cambio climático en los caudales de crecida, así como proporcionar mapas de cambios en el factor de torrencialidad, para una primera aproximación a los posibles cambios en la estructura temporal de la precipitación y las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) bajo el efecto del cambio climático. Este análisis se incluye en la **sección 5**. Las capas resultantes se proporcionan en formato ASCII.

- (iv) Análisis de los cambios en los cuantiles de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial. El objetivo es la elaboración de mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada debido al efecto del cambio climático para facilitar la identificación de tramos de la red fluvial donde podrían darse los cambios más relevantes en los caudales de crecida. Este análisis se incluye en la **sección 6**. Las capas resultantes se proporcionan en formato ASCII. Los resultados de este último análisis deberían complementarse con un estudio más detallado del efecto del cambio climático en los caudales máximos anuales mediante el uso de modelos hidrológicos, lo que se prevé llevar a cabo en estudios futuros.



CEDEX



2. INFORMACIÓN DE PARTIDA

2.1. Proyecciones climáticas y variables de estudio

Los modelos climáticos globales proporcionan simulaciones de variables climáticas con una resolución que no es suficiente para su análisis a nivel regional o local, por lo que su escala debe ser reducida. Dicha reducción de escala (“*downscaling*”), también llamada regionalización, puede llevarse a cabo a través de técnicas dinámicas, como, por ejemplo, mediante el uso de modelos climáticos regionales, o a través de técnicas estadísticas. En España, proyecciones climáticas de referencia son las proporcionadas por EURO-CORDEX (<https://www.euro-cordex.net>) y por AEMET (2016). Su descripción se incluye a continuación.

EURO-CORDEX (“*Coordinated Downscaling Experiment – European Domain*”) es la rama Europea de la iniciativa internacional CORDEX, un programa patrocinado por el “*World Climate Research Program*” cuyo objetivo es la organización de una infraestructura coordinada internacionalmente para la producción de proyecciones regionales de cambio climático a escala mundial. Las simulaciones proporcionadas por EURO-CORDEX son el resultado del uso de diversos modelos climáticos globales que son regionalizados mediante distintos modelos climáticos regionales. Estas simulaciones están disponibles para diferentes variables, así como resoluciones espaciales y temporales, aumentando su disponibilidad a medida que son generadas por las instituciones pertenecientes al programa. Las proyecciones están basadas en los escenarios de emisión utilizados en el 5º Informe de Evaluación del IPCC, denominados sendas o trayectorias de concentración representativas (RCPs, por sus siglas en inglés: “*Representative Concentration Pathways*”), que son los escenarios que se utilizan actualmente en estudios de cambio climático. El valor numérico asociado a las siglas RCP indica el forzamiento radiativo total en Wm^{-2} para el año 2100. Por ejemplo, el escenario RCP 4.5 se puede considerar como un escenario intermedio, como resultado de esfuerzos en la mitigación del efecto del cambio climático, mientras que el escenario RCP 8.5 representa un escenario con un nivel muy alto de emisiones. Las simulaciones de EURO-CORDEX están disponibles para todo el territorio español, exceptuando las Islas Canarias, estando estas últimas incluidas en el dominio de CORDEX África. Simulaciones procedentes de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX para la Península y Baleares fueron utilizadas en MITECO (2018).

AEMET ha llevado a cabo una regionalización para España de escenarios climáticos para el RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 del IPCC mediante dos técnicas: Análogos y SDSM (AEMET 2016). El método de análogos consiste en trasladar los valores alcanzados en situaciones análogas registradas históricamente a los valores locales (Wilby et al. 2004; AEMET 2008). A partir de unos predictores (el patrón atmosférico previsto por el modelo climático global), se obtiene un modelo local para el predictando deseado (por ejemplo, la precipitación local en un observatorio concreto), utilizando para ello la relación entre predictando y predictores proporcionada por aquellas situaciones atmosféricas análogas registradas. El método estadístico SDSM (“*Statistical DownScaling Method*”) consiste en establecer ecuaciones de regresión múltiple entre los predictandos o valores observados de la variable en cada estación meteorológica (temperaturas extremas, precipitación, etc.) y los predictores o valores estimados en el escenario climático en su correspondiente celda del modelo climático global (Wilby et al. 2002). Con ambos métodos,



cada proyección proporciona, entre otras variables, valores estimados diarios de precipitación proyectados sobre un conjunto de puntos de observación. Estos puntos corresponden a 2321 estaciones pluviométricas que cubren el territorio de la España peninsular, Baleares y Canarias (AEMET 2016). Los valores cubren los periodos 1-1-1961 a 31-12-2000 y 1-1-2006 a 31-12-2100. Doce de estas proyecciones fueron utilizadas recientemente para la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y las sequías (CEDEX 2017). Otras 10 proyecciones procedentes de un trabajo similar realizado por AEMET en base a los resultados del 3º Informe de Evaluación del IPCC (AEMET 2008) fueron utilizadas en CEDEX (2010) y Barranco et al. (2017).

En lo que se refiere a los objetivos perseguidos en este trabajo, el uso de simulaciones procedentes de EURO-CORDEX puede presentar ventajas respecto al uso de las simulaciones procedentes de AEMET, principalmente en lo referente a la disponibilidad de datos de precipitación en intervalos temporales inferiores al día, información que es de un gran interés para el análisis de los cambios en la estructura temporal de las precipitaciones máximas y su consiguiente efecto en los caudales de crecida. Por otra parte, según algunos trabajos, las simulaciones de EURO-CORDEX podrían presentar un mejor comportamiento en relación al análisis de la precipitación extrema frente a las simulaciones procedentes de AEMET (e.g., Garijo et al. 2018). Por estos motivos, las proyecciones climáticas que se ha decidido utilizar en el presente estudio son las procedentes de los modelos climáticos regionales pertenecientes a EURO-CORDEX. Cuando se inició el estudio, 15 proyecciones climáticas resultantes del uso de cinco modelos climáticos globales y seis modelos climáticos regionales presentaban simulaciones de precipitación diaria para una resolución de celda de 0.11 grados en rejilla rotada latitud-longitud nativa (EUR-11, aprox. 12.5 km). La nomenclatura y procedencia de estos modelos climáticos de estudio se muestra en la [Tabla 2.1](#). El análisis del comportamiento de dichas proyecciones en relación a la precipitación extrema observada se lleva a cabo en la [sección 3](#).



Tabla 2.1. Modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX utilizados en el presente estudio. (* MPI-REMO1 usa el “ensemble” “r1i1p1” y MPI-REMO2 usa “r2i1p1”).

Nº	Acrónimo	Modelo Climático Global (“driver”)	Modelo Climático Regional	Instituciones
1	ICH-CCL	ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM4-8-17	<i>Irish Centre for High-End Computing / CLMcom CLM Community with contributions</i>
2	MPI-CCL	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17	<i>Max Planck Institute for Meteorology / CLMcom CLM Community with contributions</i>
3	MOH-RAC	MOHC-HadGEM2-ES	KNMI-RACMO22E	<i>Met Office Hadley Centre / Royal Netherlands Meteorological Institute</i>
4	CNR-CCL	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom-CCLM4-8-17	<i>Météo-France / CLMcom CLM Community with contributions</i>
5	ICH-RAC	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	<i>Irish Centre for High-End Computing / Royal Netherlands Meteorological Institute</i>
6	MOH-CCL	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17	<i>Met Office Hadley Centre / CLMcom CLM Community with contributions</i>
7	IPS-WRF	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-WRF381P	<i>Institut Pierre Simon Laplace</i>
8	IPS-RCA	IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	<i>Institut Pierre Simon Laplace / Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
9	MOH-RCA	MOHC-HadGEM2-ES	SMHI-RCA4	<i>Met Office Hadley Centre / Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
10	ICH-RCA	ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	<i>Irish Centre for High-End Computing / Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
11	CNR-RCA	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI-RCA4	<i>Météo-France / Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
12	MPI-RCA	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	<i>Max Planck Institute for Meteorology / Swedish Meteorological and Hydrological Institute</i>
13	ICH-HIRH	ICHEC-EC-EARTH	DMI-HIRHAM5	<i>Irish Centre for High-End Computing / Danish Meteorological Institute</i>
14	MPI-REMO1	MPI-M-MPI-ESM-LR *	MPI-CSC-REMO2009	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>
15	MPI-REMO2	MPI-M-MPI-ESM-LR *	MPI-CSC-REMO2009	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>

Como se ha indicado anteriormente, además de simulaciones de precipitación diaria, EURO-CORDEX proporciona simulaciones de otras variables de interés, como son la precipitación convectiva diaria, la precipitación horaria máxima diaria y la precipitación acumulada en intervalos de 3 horas. Sin embargo, no todos los modelos climáticos disponen de simulaciones para estas variables. En particular, 14 de los modelos climáticos de estudio presentan simulaciones de precipitación convectiva diaria, 12 presentan simulaciones de precipitación horaria máxima diaria, y seis presentan simulaciones de precipitación acumulada en intervalos de 3 horas (Tabla 2.2).



Tabla 2.2. Modelos climáticos de estudio para la extracción de series máximas anuales, indicando simulaciones disponibles para el periodo de impacto completo 2011-2100. (* Disponibilidad de 89 en vez de 90 años de datos).

Nº	Modelo climático	Precipitación diaria	Precipitación convectiva diaria	Precipitación horaria máxima diaria	Precipitación acumulada en 3 horas
1	ICH-CCL	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	N/A
2	MPI-CCL	2011 - 2100	N/A	2011 - 2100	N/A
3	MOH-RAC *	2011 - 2099	2011 - 2099	2011 - 2099	N/A
4	CNR-CCL	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	N/A
5	ICH-RAC	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	N/A
6	MOH-CCL *	2011 - 2099	2011 - 2099	2011 - 2099	N/A
7	IPS-WRF	2011 - 2100	2011 - 2100	N/A	N/A
8	IPS-RCA	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100
9	MOH-RCA *	2011 - 2099	2011 - 2099	2011 - 2099	2011 - 2099
10	ICH-RCA	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100
11	CNR-RCA	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100
12	MPI-RCA	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100
13	ICH-HIRH	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100	2011 - 2100
14	MPI-REMO1	2011 - 2100	2011 - 2100	N/A	N/A
15	MPI-REMO2	2011 - 2100	2011 - 2100	N/A	N/A

Este estudio se centra en el análisis de seis variables máximas anuales de referencia, expresadas en mm, y extraídas a través de las simulaciones asociadas a las variables previamente mencionadas. A estas seis variables se les denomina variables de estudio:

- Precipitación diaria máxima anual.
- Precipitación convectiva diaria máxima anual.
- Precipitación horaria máxima anual.
- Precipitación acumulada en 3 horas máxima anual.
- Precipitación acumulada en 6 horas máxima anual.
- Precipitación acumulada en 12 horas máxima anual.

La precipitación diaria máxima anual es una variable de referencia que se emplea como base en todos los estudios de crecidas al ser la variable para la que se cuenta con una mayor información, puesto que es la que se mide desde hace más tiempo y en un mayor número de estaciones, y, por lo tanto, es la de mayor utilidad para la aplicación práctica de los resultados. Las precipitaciones máximas horaria y en intervalos de 3, 6 y 12 horas permiten estudiar los cambios en la estructura temporal de la precipitación, así como las intensidades en intervalos temporales inferiores al día cuya importancia es crucial en la generación de las crecidas. Por último, la precipitación convectiva diaria máxima anual es una variable auxiliar que puede proporcionar información sobre el origen de los cambios en la precipitación, indicando si éstos están relacionados con un incremento de los fenómenos de carácter convectivo, principalmente en las zonas del este y sureste peninsular o en zonas montañosas, donde este tipo de fenómenos son más frecuentes.



La precipitación acumulada en 3, 6 y 12 horas máxima anual se extrae de las simulaciones de precipitación acumulada en intervalos de 3 horas, por lo que estas tres variables de estudio están únicamente disponibles para los seis modelos climáticos que proporcionan dicha precipitación acumulada.

Todas las variables se extraen para cuatro periodos de estudio:

- Periodo de control (1971-2000).
- Periodo de impacto 2011-2040 (llamado horizonte 2020 en la literatura).
- Periodo de impacto 2041-2070 (llamado horizonte 2050 en la literatura).
- Periodo de impacto 2071-2100 (llamado horizonte 2080 en la literatura).

Todos los periodos de estudio tienen una longitud de 30 años, salvo el periodo de impacto 2071-2100 que presenta una longitud de 29 años para tres de los modelos climáticos, debido a que dichos modelos proporcionan simulaciones hasta el año 2099 en vez de hasta el año 2100 ([Tabla 2.2](#)). Dicho periodo de impacto (2071-2100) está constituido por los años hidrológicos 2070/2071 a 2099/2100 (salvo para los tres modelos climáticos de estudio mencionados para los que el último año disponible es 2098/2099), con inicio el 1 de octubre y fin el 30 de septiembre. Esta misma definición de los intervalos temporales, utilizada para un mayor aprovechamiento de simulaciones disponibles, se ha aplicado a todos los periodos de estudio.

La extracción de las variables de estudio para los periodos de impacto se realiza para dos escenarios de emisión: RCP 4.5 y RCP 8.5. De este modo, en este estudio se analizan seis combinaciones escenario – periodo de impacto: “RCP 4.5: 2011-2040”, “RCP 4.5: 2041-2070”, “RCP 4.5: 2071-2100”, “RCP 8.5: 2011-2040”, “RCP 8.5: 2041-2070” y “RCP 8.5: 2071-2100”.

Es importante subrayar que todos los análisis realizados en base a los modelos climáticos de estudio se llevan a cabo en la rejilla rotada (latitud-longitud) nativa de EURO-CORDEX; esto aplica a las [secciones 3 a 5](#). Una vez obtenidas las tasas de cambio en cuantil medias en rejilla rotada con una resolución de celda de 0.11°, éstas se transforman a rejilla regular (latitud-longitud) con una resolución de 0.125° (al final de la [sección 5](#)) para facilitar su aplicación en la práctica ([sección 6](#)). La decisión de (i) primero realizar los análisis en la rejilla rotada nativa y después transformar los resultados a la rejilla regular, en vez de (ii) primero transformar los datos a rejilla regular y después realizar los análisis para directamente obtener los resultados en base a dicha rejilla, se ha tomado debido a que la rejilla nativa de los 15 modelos climáticos de estudio es la rotada y a que la secuencia utilizada produce menor distorsión en los resultados ([Diaconescu et al. 2015](#)); esto es especialmente relevante cuando se analiza precipitación extrema.

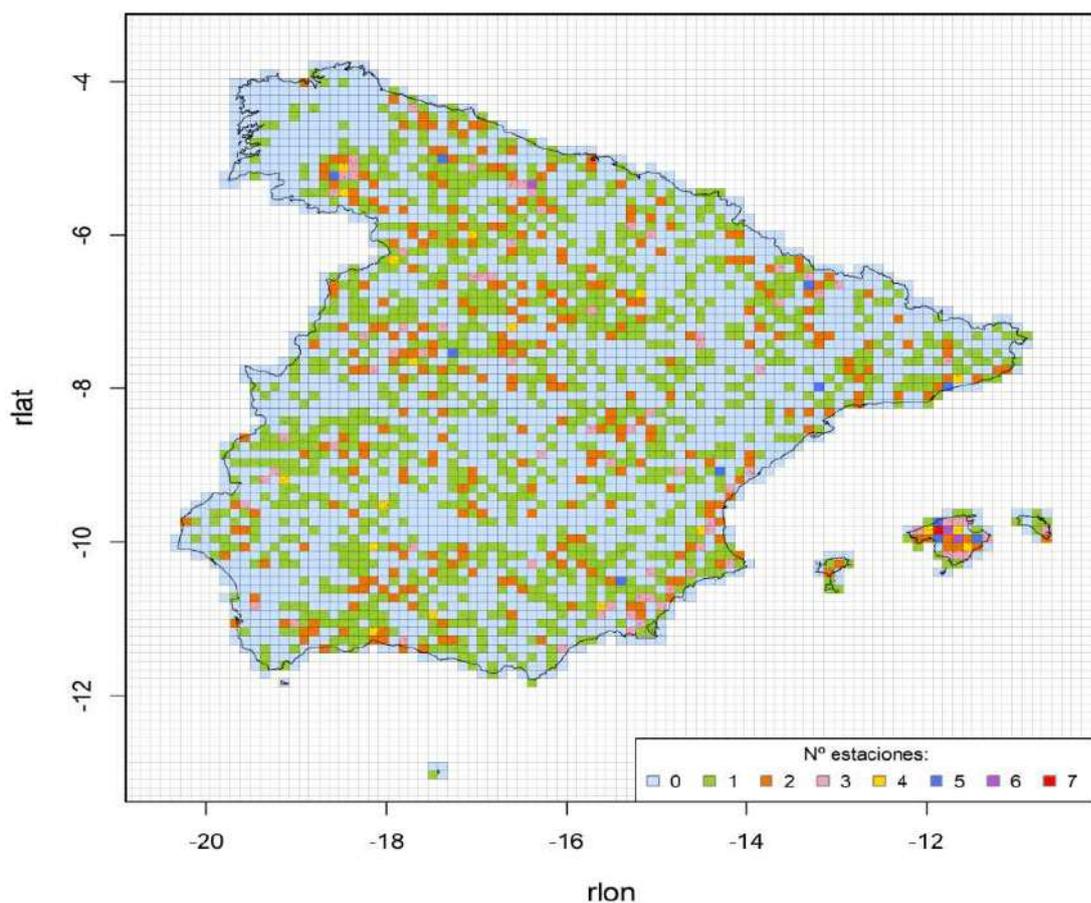
2.2. Zona de estudio, regiones y estaciones

La zona de estudio está compuesta por todo el territorio español, exceptuando las Islas Canarias, ya que éstas últimas no están incluidas en el ámbito territorial de EURO-CORDEX. La ampliación del estudio a las Islas Canarias requeriría la utilización de los resultados de los modelos climáticos regionales de CORDEX África, distintos a los de EURO-CORDEX.

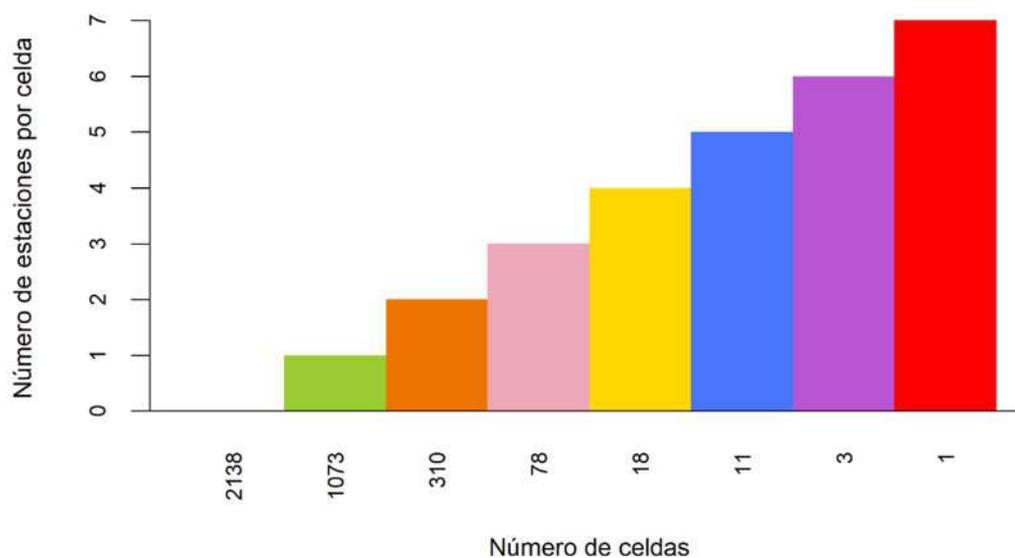


La zona de estudio está formada por 3632 celdas de 0.11 grados en rejilla rotada ([Figura 2.1a](#)) y se encuentra dividida en 29 regiones climáticas ([Figura 2.2a](#)). Estas regiones están compuestas por las 26 regiones climáticas peninsulares empleadas para la elaboración del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” ([Ferrer 1996](#); [DGC 1999](#)), cuya obtención está basada en criterios meteorológicos, topográficos y estadísticos, considerando este último la homogeneidad del coeficiente de variación (CV) en las series de precipitación diaria máxima anual, así como por tres regiones adicionales para las Islas Baleares, Ceuta y Melilla. El número de celdas por región se muestra en la [Figura 2.2b](#). La región con un mayor número de celdas es la región “0101” (en el noroeste de la Península), que presenta 279 celdas, mientras que la región con un menor número de celdas es la región “1400” (asociada a Ceuta) que presenta sólo una celda.

El estudio utiliza observaciones pertenecientes a 2079 estaciones meteorológicas procedentes de la red de AEMET con datos de precipitación diaria, que han sido seleccionadas teniendo en cuenta la longitud de la serie de datos disponible en el periodo de control y la densidad espacial de estaciones en la zona de estudio. Las estaciones seleccionadas cuentan al menos con 22 años de datos observados en el periodo de control, y dan lugar a la cobertura de algo más del 41% de las celdas de estudio (i.e., 1494 celdas cuentan al menos con una estación). El número de estaciones por celda y su distribución en el territorio se muestra en la [Figura 2.1](#). El máximo número de estaciones por celda es de siete y el mínimo es de cero. El número de estaciones por región se muestra en la [Figura 2.2c](#). La región con un mayor número de estaciones es la región “0801” (en el sureste de la Península), que contiene 198 estaciones, mientras que la región con un menor número de estaciones es la región “1400” (asociada a Ceuta), que no cuenta con ninguna estación seleccionable.



(a)



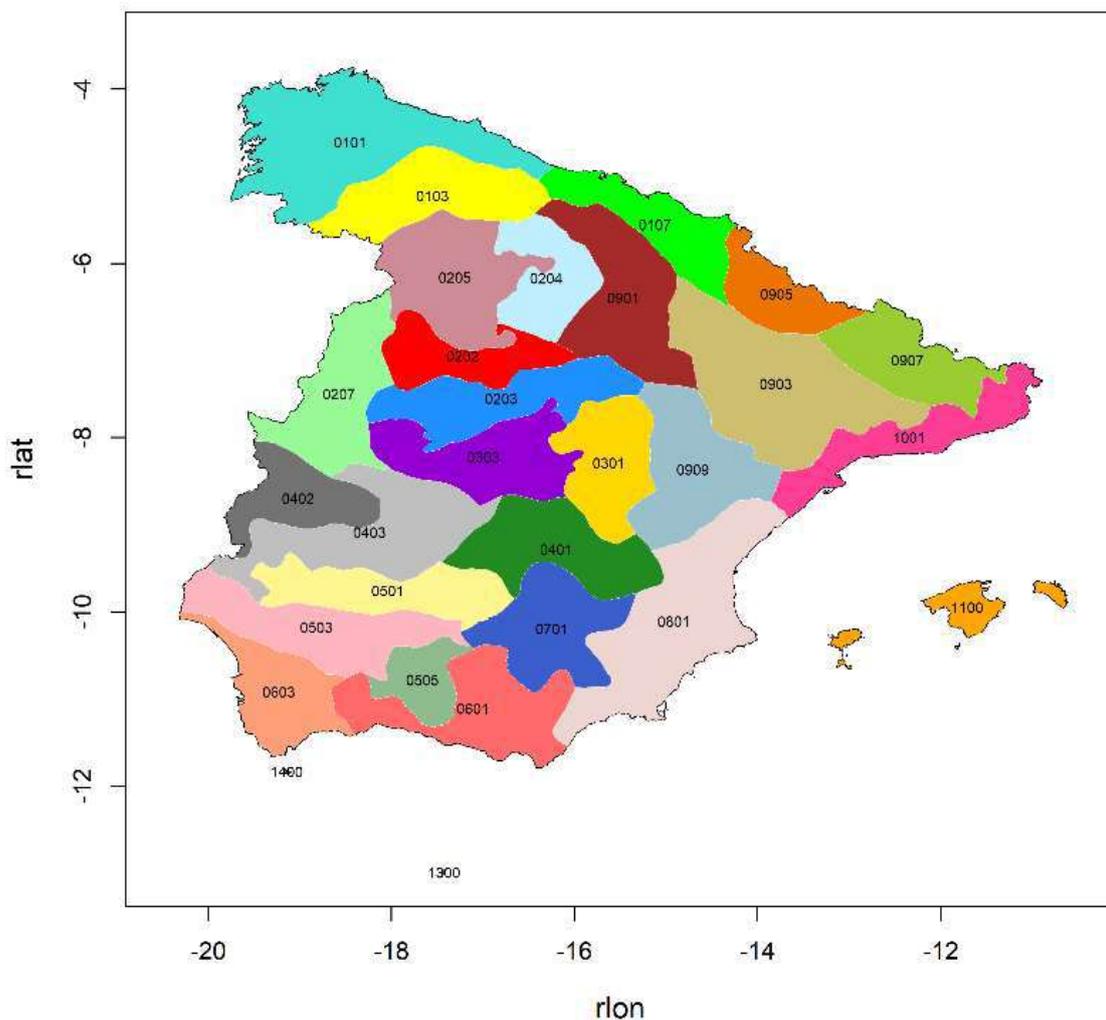
(b)

Figura 2.1. (a) Zona de estudio, indicando celdas y número de estaciones meteorológicas por celda; (b) Resumen del número de estaciones meteorológicas por celda. (“r lon” y “r lat” se refieren a longitud y latitud en rejilla rotada, respectivamente).

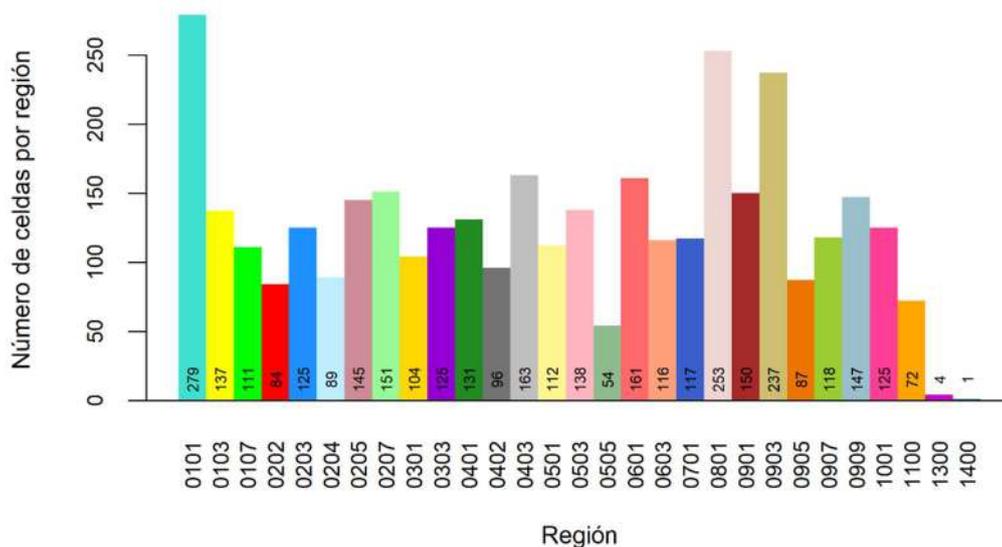


CEDEX

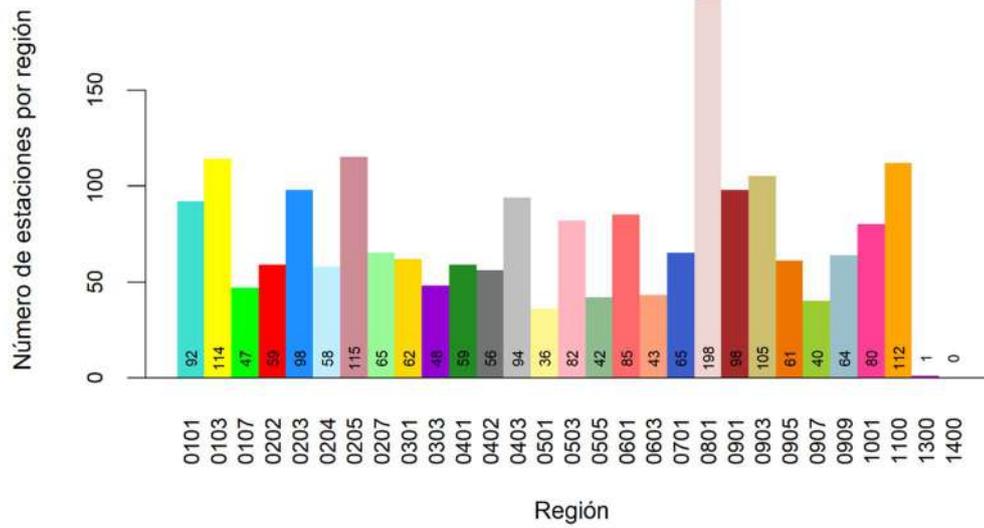
IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA



(a)



(b)



(c)

Figura 2.2. (a) División de la zona de estudio en 29 regiones climáticas; (b) Número de celdas por región; (c) Número de estaciones meteorológicas por región. (“rlon” y “rlat” se refieren a longitud y latitud en rejilla rotada, respectivamente).



CEDEX



3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES DE ESTUDIO RESPECTO A LAS OBSERVACIONES

3.1. Introducción

En esta sección se lleva a cabo el análisis del comportamiento de las series de precipitación máxima anual procedentes de los modelos climáticos de estudio respecto a las series de precipitación máxima anual observadas. Por lo tanto, el periodo de control (1971-2000) es el periodo de estudio considerado. Este análisis se ha realizado únicamente para la precipitación diaria máxima anual, no siendo posible llevarlo a cabo para el resto de variables de estudio (i.e., precipitación convectiva diaria máxima anual, precipitación horaria máxima anual, así como precipitación acumulada en 3, 6 y 12 horas máxima anual) debido a la no disponibilidad de datos observados de precipitación convectiva, así como al reducido número de estaciones meteorológicas con datos observados de precipitación para intervalos temporales inferiores al día en la red de AEMET, que se ve incluso más limitado ante la necesidad de que dichos registros se encuentren disponibles en el periodo de control.

Las series de precipitación diaria máxima anual observadas utilizadas en este análisis fueron obtenidas en el marco de los trabajos de actualización del mapa de precipitaciones máximas diarias que actualmente se están llevando a cabo en el CEDEX a partir de la información facilitada por AEMET. De entre el conjunto de estaciones utilizadas en dicho trabajo fueron seleccionadas las 2079 estaciones presentadas en la [sección 2.2](#). Lógicamente, las series observadas utilizadas están asociadas al periodo histórico 1971-2000, correspondiente al periodo de control. Se recuerda que las estaciones seleccionadas cuentan con un mínimo de 22 años de datos de precipitación diaria máxima anual en dicho periodo.

Los datos de las simulaciones suministradas por EURO-CORDEX representan valores medios en las celdas, por ello, la comparación entre simulaciones y observaciones se realiza mediante el cálculo de las series máximas anuales observadas en dichas celdas. Este valor se obtiene como media de la precipitación máxima anual observada en las estaciones localizadas en cada celda, para cada año.

El análisis se realiza a nivel local en cada una de las celdas que forman la zona de estudio, evaluándose el comportamiento de cada modelo climático de estudio tanto a nivel global (i.e., para todo el territorio español salvo las Islas Canarias), como a nivel regional mediante el uso de las regiones climáticas.

3.2. Metodología

La comparación entre las series máximas anuales simuladas y observadas se realiza mediante el contraste de estadísticos representativos de sus propiedades en las celdas donde existen observaciones. Estos estadísticos son la media, el L-coeficiente de variación (LCV), el L-coeficiente de sesgo (LCS), el CV, el coeficiente de sesgo (CS), y el valor máximo estandarizado (maxstd). Este último calculado como el máximo de la serie menos la media, dividido por la



desviación típica. La mayor parte de estos estadísticos se usan en la estimación de parámetros necesarios para el ajuste de funciones de distribución.

El contraste de los estadísticos de las simulaciones climáticas respecto a los de los datos observados en el periodo de control se ha utilizado para realizar una primera clasificación del conjunto de modelos climáticos disponible de tal forma que, junto con otros criterios, pueda servir de base en el futuro, si fuese necesario, para seleccionar un subconjunto de modelos con los que abordar otros estudios futuros más exigentes desde el punto de vista computacional, como podría ser el caso de la utilización de modelos hidrológicos para obtener series de caudal a partir de los datos de precipitación, y que, por lo tanto, no puedan llevarse a cabo para todo el conjunto de modelos climáticos disponible.

La comparación de los valores medios en la zona de estudio de los estadísticos obtenidos a través de las series máximas anuales observadas y simuladas proporciona una idea general de la subestimación o sobreestimación de los modelos climáticos. Sin embargo, varios modelos climáticos podrían dar lugar a valores medios de los estadísticos similares, pero tener asociada una dispersión distinta. Por este motivo es necesario realizar una clasificación objetiva de los modelos climáticos basada en el uso de medidas más representativas, como, por ejemplo, el error relativo cuadrático medio (RRMSE):

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left(\frac{\text{sim}_i - \text{obs}_i}{\text{obs}_i} \right)^2}, \quad (3.1)$$

donde sim_i es el valor del estadístico estimado a partir de las series máximas anuales procedentes de simulaciones en la celda i , obs_i es el valor del estadístico estimado a partir de series máximas anuales procedentes de observaciones en la celda i , y K es el número de celdas con estaciones (i.e., $K = 1494$ para el análisis global). El mejor modelo climático es aquel con menor RRMSE, cuyo mínimo valor posible es cero.

La clasificación se realiza asignando al mejor modelo climático la primera posición (i.e., "1"), y al peor la última posición (i.e., "15", ya que la precipitación diaria máxima anual dispone de 15 modelos climáticos). Esto se lleva a cabo de forma separada para la media, el LCV, el LCS y el maxstd; los estadísticos CV y CS no se han utilizado en la clasificación para evitar redundancias respecto a la información proporcionada por el LCV y el LCS, respectivamente. Con el fin de obtener una puntuación final adecuada, se asigna diferente peso a la posición obtenida por cada estadístico. Esto es debido a que la correlación entre valores observados y simulados podría ser baja para todos los modelos climáticos en relación a algunos estadísticos (por ejemplo, para estadísticos de mayor orden que tienen asociada una mayor incertidumbre), y, por lo tanto, la discriminación de modelos climáticos en base a su valor podría ser menos representativa. Los pesos se establecen en base al rango de valores del coeficiente de correlación asociado a los modelos climáticos para cada estadístico (i.e., a mayor amplitud del rango mayor peso), asegurando que la suma de pesos es la unidad. El mejor modelo climático se identifica como aquel con una menor puntuación final. Este proceso se realiza de forma global para la zona de estudio y de forma individual para cada una de las regiones climáticas.

Por último, se analiza la capacidad de los modelos climáticos para simular la estacionalidad de las series máximas anuales en el periodo de control. Para ello, en cada celda se computa el número de veces que el máximo anual es obtenido en un determinado mes y se divide por el número de años de datos disponibles (i.e., 30 años en el caso de series asociadas a simulaciones procedentes de modelos climáticos). El valor para una región, al que se denomina “número estandarizado medio de ocurrencias del máximo”, se obtiene como el valor medio sobre las celdas con estaciones en la región. Esto se realiza para cada modelo climático de estudio, obteniéndose a su vez el valor medio asociado para facilitar el análisis del comportamiento del conjunto de modelos climáticos. La comparación con la estacionalidad observada se lleva a cabo mediante la estimación de dicha variable en base a la información disponible para las estaciones localizadas en la región. Es decir, en cada estación se computa el número de veces que el máximo anual es obtenido en un determinado mes y se divide por el número de años disponibles (entre 22 y 30 años según la estación). El valor observado para una celda se obtiene como media del valor de las estaciones presentes en la celda y, a continuación, el valor observado para una región se obtiene como el valor medio sobre las celdas con estaciones en la región.

3.3. Resultados y discusión

La comparación de forma visual de los estadísticos de las series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual se muestra, a modo de ejemplo, para los modelos climáticos “9_MOH-RCA” y “15_MPI-REMO2” en la [Figura 3.1](#). En la figura puede verse la media, el LCV, el LCS, el CV y el CS. Este análisis (parte izquierda de las [Figuras 3.1a y b](#)) muestra un mejor ajuste para la media (mayor correlación, con valores cerca de la diagonal), y un peor ajuste para el LCS y el CS (menor correlación, con valores dispersos). Este resultado es lógico ya que la estimación de los estadísticos de mayor orden está sujeta a una mayor incertidumbre, por lo que es esperable una mayor dispersión de los valores del CV frente a los de la media y de los del CS frente a los del CV. Junto a la dispersión de los datos, es importante analizar también si la estimación del modelo climático se encuentra sesgada, es decir, si el conjunto de datos se encuentra en mayor medida por encima o por debajo de la línea a 45°, lo que indicará una tendencia del modelo climático a sobrestimar o subestimar de forma sistemática el estadístico. Por ejemplo, en la [Figura 3.1](#) se aprecia que la estimación de la media por el modelo “9_MOH-RCA” se ajusta mejor, con una menor dispersión, a los valores observados que en el caso del modelo “15_MPI-REMO2”, aunque en el caso del modelo “9_MOH-RCA” la estimación se encuentra más sesgada con tendencia a subestimar el estadístico. En el [Anexo nº 1](#) se incluye el conjunto de gráficas para los 15 modelos climáticos de estudio.

Los mismos resultados, pero con celdas clasificadas por colores según el número de estaciones por celda, se muestran en la parte derecha de las [Figuras 3.1a y b](#). En general, las celdas con menor número de estaciones presentan una mayor diferencia entre el valor observado y simulado (mayor dispersión), lo que puede atribuirse en parte a una más deficiente estimación del valor medio observado en la celda en aquellos casos en los que se cuenta con un menor número de estaciones ubicadas en la misma. Diferencias entre valores observados y simulados en celdas con un mayor número de estaciones podría deberse en parte a una distribución de estaciones en la celda poco representativa, o a la falta de valores anuales en algunas estaciones.



El gran número de modelos climáticos y de estadísticos considerados en el estudio hace necesario el análisis de resultados mediante el uso de medidas como la media, el coeficiente de correlación y el RRMSE. El análisis de la media muestra que los estadísticos de las series observadas de precipitación diaria máxima anual se encuentran dentro del rango de los estadísticos obtenidos mediante los modelos climáticos de estudio (Tabla 3.1). Esto indica una buena representatividad general de los modelos climáticos y apoya su uso conjunto en el análisis del efecto del cambio climático. El análisis individualizado de los modelos climáticos indica que un mayor número de ellos sobreestima el LCV, el CV y el maxstd, y subestima la media.

A su vez, el análisis por regiones refleja que los estadísticos de las series observadas de precipitación diaria máxima anual se encuentran dentro del rango de los estadísticos obtenidos mediante los modelos climáticos de estudio en la mayor parte de las regiones, con excepciones en el este de la Península y la zona del Mediterráneo (Tabla 3.2). La región "0903", al noreste de la Península, presenta sobreestimación del LCS, CV, CS, y maxstd por parte de todos los modelos climáticos. Las regiones "0801" (costa sureste), "1001" (costa noreste) y "1100" (Islas Baleares), asociadas al Mediterráneo, presentan una subestimación de la media por parte de todos los modelos climáticos de estudio. Esto puede ser debido a la conocida limitación de los modelos climáticos regionales para representar correctamente la precipitación convectiva (Westra et al. 2014; Berg et al. 2019), ya que los procesos convectivos que dan lugar a lluvia extrema se producen a una escala mucho menor que la resolución espacial de los modelos climáticos (siendo ésta última mayor de 10 km). Esta diferencia de escala imposibilita la representación explícita de la convección en las celdas, y hace necesario el uso de esquemas de parametrización de la convección para calcular su efecto medio en ellas. Sin embargo, los esquemas de parametrización no están diseñados para la generación local de cantidades de lluvia realistas. De modo que no son capaces de representar lluvia de tormentas que se regeneran en el mismo lugar de forma continua, como resultado de la dinámica de las tormentas, o tormentas que se producen de forma local debido al efecto de la topografía. Resultados de investigaciones asociadas al uso de modelos climáticos con resoluciones espaciales menores a 4 km, de forma que permiten la representación de la convección en las celdas ("*convection-permitting models*"), son prometedores pero aún existen cuestiones a resolver para su uso en la práctica.

El sesgo en los estadísticos de las series máximas anuales simuladas podría conducir a la estimación del efecto del cambio climático de manera menos fiable en esas regiones. La región "1400" no presenta resultados ya que, como se indicó anteriormente, no dispone de celdas con estaciones. Como ilustración, la sobreestimación/subestimación de los modelos climáticos se muestra por regiones para la media en la Figura 3.2.

El análisis de la correlación entre los estadísticos de las series observadas y simuladas de precipitación máxima anual muestra que los valores más elevados están asociados con la media, seguida del LCV y CV, mientras que el resto de estadísticos presenta valores cercanos a cero (Tabla 3.3). Estos resultados están en consonancia con lo observado en la Figura 3.1 y relacionados con la mayor incertidumbre asociada a la estimación de los estadísticos de mayor orden que conduce a una mayor dispersión de los resultados. La clasificación de modelos climáticos, basada en el RRMSE (Tabla 3.4), utiliza, como se expuso anteriormente, pesos proporcionales a la amplitud del rango de correlación de los modelos climáticos para la media, el



LCV, el LCS y el maxstd (fila inferior de la [Tabla 3.3](#)). Estos pesos son 0.53 para la media, 0.23 para el LCV, 0.14 para el LCS y 0.10 para el maxstd. El modelo climático ubicado en primera posición, con estadísticos más próximos a los de las series máximas anuales observadas, es el modelo “9_MOH-RCA”, y el modelo climático ubicado en última posición es el modelo “15_MPI-REMO2” ([Tabla 3.4](#)). Mencionar que los altos valores del RRMSE obtenidos para el LCS y el CS son debidos en parte a la existencia de valores de estadísticos próximos a cero (ver denominador en [ecuación 3.1](#)).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

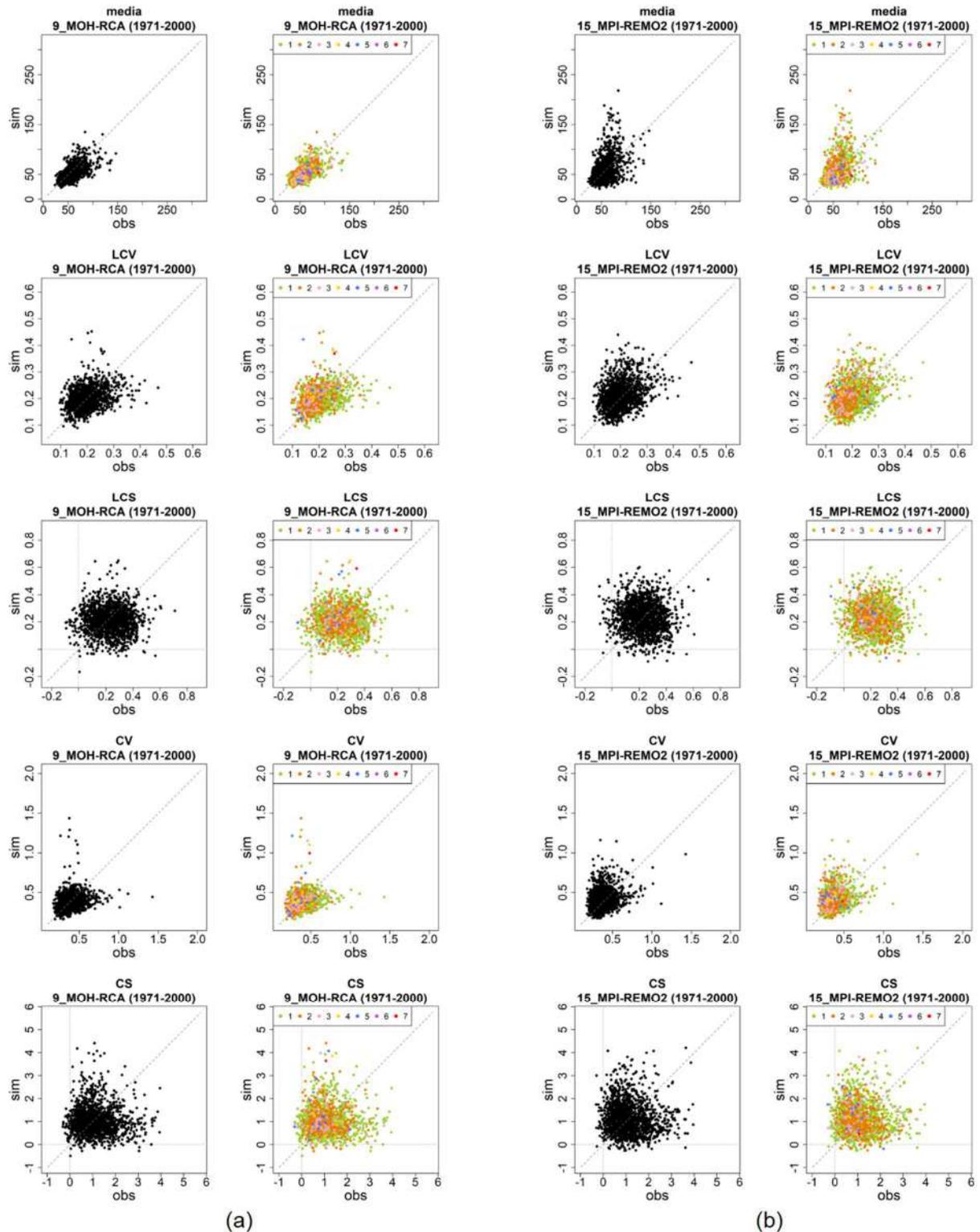


Figura 3.1. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para los modelos climáticos: (a) “9_MOH-RCA” y (b) “15_MPI-REMO2”.



Tabla 3.1. Media de los estadísticos de las series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual en las celdas con estaciones, y signo de dichos estadísticos con respecto a los de las series observadas.
 (* Sobreestimación del modelo climático se indica como "+1" y subestimación como "-1").

Modelo climático	Media						Signo *					
	media	LCV	LCS	CV	CS	maxstd	media	LCV	LCS	CV	CS	maxstd
1_ICH-CCL	41.96	0.20	0.21	0.38	1.07	2.84	-1	1	-1	1	-1	1
2_MPI-CCL	52.33	0.19	0.22	0.37	1.09	2.88	1	-1	-1	-1	-1	1
3_MOH-RAC	43.84	0.21	0.23	0.39	1.16	2.92	-1	1	1	1	1	1
4_CNR-CCL	47.27	0.21	0.25	0.41	1.28	3.01	-1	1	1	1	1	1
5_ICH-RAC	41.21	0.20	0.22	0.37	1.03	2.81	-1	1	-1	-1	-1	-1
6_MOH-CCL	43.89	0.22	0.25	0.42	1.28	3.00	-1	1	1	1	1	1
7_IPS-WRF	41.99	0.18	0.21	0.33	1.03	2.82	-1	-1	-1	-1	-1	1
8_IPS-RCA	40.91	0.24	0.25	0.46	1.30	3.04	-1	1	1	1	1	1
9_MOH-RCA	48.43	0.20	0.21	0.37	1.03	2.82	-1	1	-1	-1	-1	1
10_ICH-RCA	46.75	0.21	0.22	0.39	1.10	2.88	-1	1	-1	1	-1	1
11_CNR-RCA	52.57	0.21	0.24	0.39	1.20	2.94	1	1	1	1	1	1
12_MPI-RCA	56.54	0.20	0.21	0.37	1.08	2.87	1	-1	-1	-1	-1	1
13_ICH-HIRH	51.83	0.22	0.25	0.42	1.26	3.01	-1	1	1	1	1	1
14_MPI-REMO1	55.09	0.20	0.22	0.38	1.06	2.84	1	1	-1	1	-1	1
15_MPI-REMO2	54.04	0.21	0.23	0.40	1.14	2.89	1	1	1	1	1	1
Mín (modelos)	40.91	0.18	0.21	0.33	1.03	2.81	-					
Observaciones	51.86	0.20	0.23	0.38	1.11	2.82	-					
Máx (modelos)	56.54	0.24	0.25	0.46	1.30	3.04	-					
En rango:	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	-					
Nº modelos subestimación	-						10	3	8	5	8	1
Nº modelos sobreestimación	-						5	12	7	10	7	14



CEDEX

Tabla 3.2. Análisis por regiones de la ubicación del valor de los estadísticos de las series observadas de precipitación diaria máxima anual respecto al rango de los estadísticos obtenidos mediante los modelos climáticos de estudio ("SI" indica dentro del rango y "NO" indica fuera del rango).

Nº	Región	media	LCV	LCS	CV	CS	maxstd
1	0101	SI	SI	SI	SI	SI	SI
2	0103	SI	SI	SI	SI	SI	SI
3	0107	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4	0202	SI	SI	SI	SI	SI	SI
5	0203	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6	0204	SI	SI	SI	SI	SI	SI
7	0205	SI	SI	SI	SI	SI	SI
8	0207	SI	SI	SI	SI	SI	SI
9	0301	SI	SI	SI	SI	SI	SI
10	0303	SI	SI	SI	SI	SI	SI
11	0401	SI	SI	SI	SI	SI	SI
12	0402	SI	SI	SI	SI	SI	SI
13	0403	SI	SI	SI	SI	SI	SI
14	0501	SI	SI	SI	SI	SI	SI
15	0503	SI	SI	SI	SI	SI	SI
16	0505	SI	SI	SI	SI	SI	SI
17	0601	SI	SI	SI	SI	SI	SI
18	0603	SI	SI	SI	SI	SI	SI
19	0701	SI	SI	SI	SI	SI	SI
20	0801	NO	SI	SI	SI	SI	SI
21	0901	SI	SI	SI	SI	SI	SI
22	0903	SI	SI	NO	NO	NO	NO
23	0905	SI	SI	SI	SI	SI	SI
24	0907	SI	SI	SI	SI	SI	SI
25	0909	SI	SI	SI	SI	SI	SI
26	1001	NO	SI	SI	SI	SI	SI
27	1100	NO	SI	SI	SI	SI	SI
28	1300	SI	SI	SI	SI	SI	SI
29	1400	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

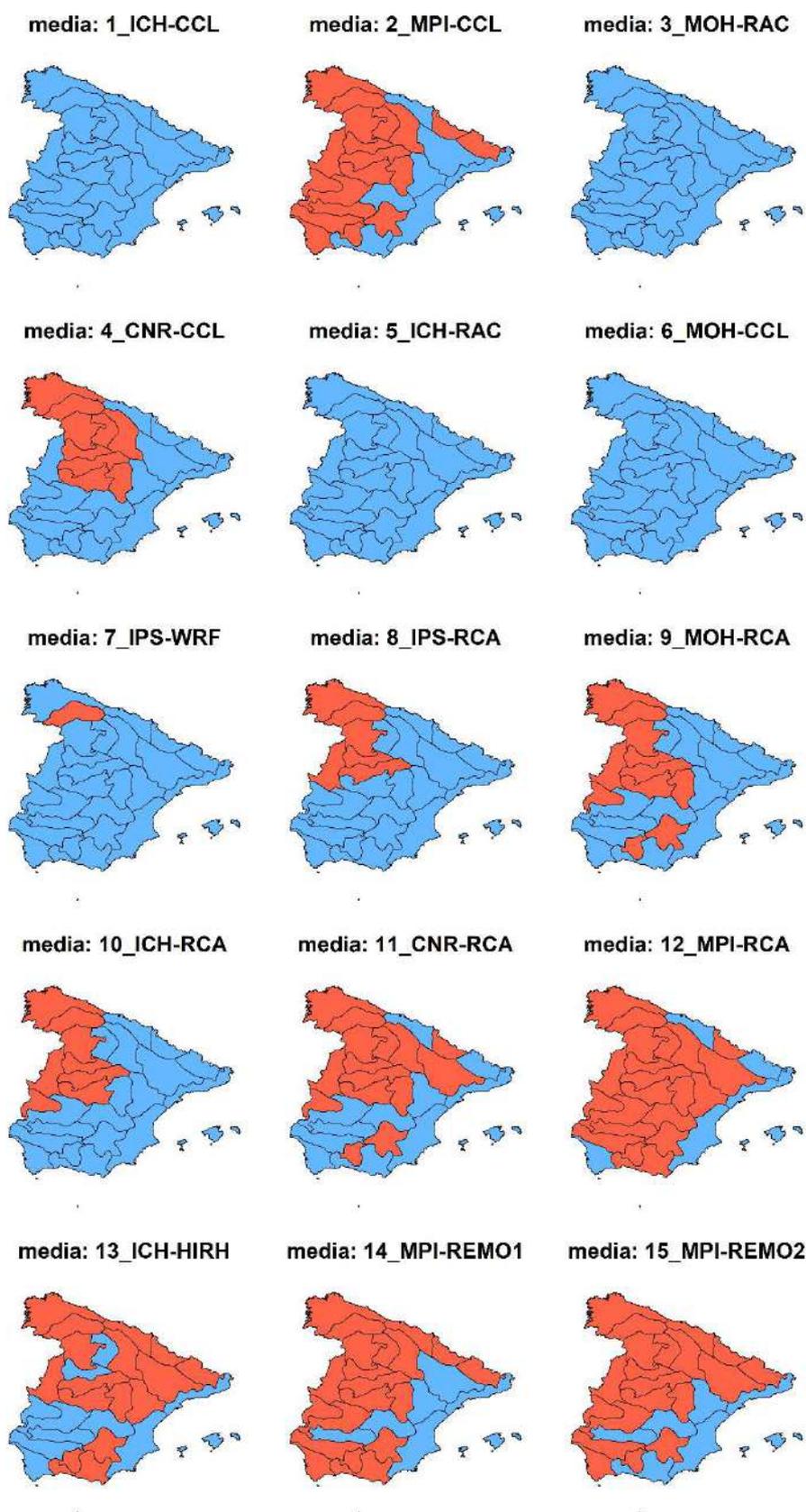


Figura 3.2. Análisis de la media de la precipitación diaria máxima anual por regiones: sobreestimación (en rojo) o subestimación (en azul) por parte de los modelos climáticos de estudio en relación a la media observada.



Tabla 3.3. Correlación entre estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual.

Modelo climático	media	LCV	LCS	CV	CS	maxstd
1_ICH-CCL	0.80	0.43	0.03	0.33	0.02	0.02
2_MPI-CCL	0.72	0.49	0.00	0.38	0.00	0.00
3_MOH-RAC	0.78	0.41	0.04	0.34	0.01	-0.03
4_CNR-CCL	0.70	0.41	0.02	0.28	0.00	-0.02
5_ICH-RAC	0.80	0.42	0.01	0.33	0.04	0.02
6_MOH-CCL	0.79	0.44	0.04	0.32	0.05	0.04
7_IPS-WRF	0.59	0.46	0.00	0.36	-0.01	-0.01
8_IPS-RCA	0.41	0.48	0.01	0.37	-0.03	-0.02
9_MOH-RCA	0.72	0.34	0.00	0.24	-0.02	-0.01
10_ICH-RCA	0.68	0.36	-0.01	0.27	0.00	0.00
11_CNR-RCA	0.60	0.36	-0.03	0.25	-0.04	-0.04
12_MPI-RCA	0.57	0.35	-0.06	0.21	-0.03	0.01
13_ICH-HIRH	0.67	0.43	0.03	0.33	0.03	0.02
14_MPI-REMO1	0.49	0.37	0.02	0.30	0.04	0.03
15_MPI-REMO2	0.51	0.33	-0.05	0.27	-0.03	-0.04
Mín:	0.41	0.33	-0.06	0.21	-0.04	-0.04
Máx:	0.80	0.49	0.04	0.38	0.05	0.04
Amplitud del rango:	0.39	0.17	0.10	0.17	0.09	0.08
Peso:	0.53	0.23	0.14	-	-	0.10

Tabla 3.4. RRMSE entre estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual, posición en la clasificación de modelos (considerando los resultados asociados a la media, al LCV, al LCS y al maxstd) y número de regiones para los que cada modelo climático de estudio obtiene el mejor resultado.

Modelo climático	media	LCV	LCS	CV	CS	maxstd	Posición	Nº regiones
1_ICH-CCL	0.22	0.26	7.35	0.35	7.23	0.37	7	3
2_MPI-CCL	0.22	0.25	6.62	0.33	8.92	0.36	2	4
3_MOH-RAC	0.21	0.28	7.91	0.36	9.95	0.37	6	2
4_CNR-CCL	0.21	0.29	6.76	0.40	14.78	0.40	3	1
5_ICH-RAC	0.24	0.25	7.68	0.31	16.88	0.33	4	2
6_MOH-CCL	0.21	0.31	8.77	0.44	8.01	0.39	8	1
7_IPS-WRF	0.26	0.25	5.58	0.33	13.17	0.36	5	2
8_IPS-RCA	0.33	0.39	7.49	0.50	11.44	0.41	13	1
9_MOH-RCA	0.20	0.27	4.69	0.35	7.33	0.33	1	8
10_ICH-RCA	0.22	0.29	8.08	0.35	7.55	0.35	9	1
11_CNR-RCA	0.27	0.29	7.51	0.39	21.56	0.37	11	0
12_MPI-RCA	0.31	0.26	7.62	0.33	6.68	0.36	10	2
13_ICH-HIRH	0.28	0.32	7.44	0.43	14.97	0.38	12	1
14_MPI-REMO1	0.41	0.31	8.26	0.39	19.23	0.34	14	0
15_MPI-REMO2	0.37	0.33	8.19	0.43	15.89	0.37	15	0
Mín:	0.20	0.25	4.69	0.31	6.68	0.33	1	0
Máx:	0.41	0.39	8.77	0.50	21.56	0.41	15	8



El análisis por regiones muestra que el modelo climático ubicado en primera posición obtiene el mejor resultado en ocho de las regiones, y que los siete primeros modelos climáticos obtienen los mejores resultados en más de dos tercios de las regiones (22 de las 29 regiones) (Tabla 3.4). El modelo climático que obtiene el mejor resultado en cada región se muestra en la Figura 3.3, donde no se aprecia un marcado patrón espacial. La región “1400” no presenta resultados ya que no dispone de celdas con estaciones. Mencionar que los resultados de la clasificación global y de la que puede obtenerse como media de los resultados por región no es necesariamente equivalente. En este caso, el orden de los modelos climáticos coincide para los dos primeros modelos climáticos clasificados y para los cuatro últimos.

En cuanto a la estacionalidad de las series simuladas de precipitación diaria máxima anual con respecto a la estacionalidad observada, los modelos climáticos muestran una buena representatividad general del ciclo estacional en las diferentes regiones. Como excepción, el modelo “7_IPS-WRF” proporciona valores claramente más altos que los reales del número estandarizado medio de ocurrencias del máximo para la mayor parte de las regiones especialmente en verano, con mayor impacto en la mitad este de la Península y Baleares, así como al final del otoño y principios del invierno en algunas de las regiones situadas en la zona noroccidental. Asimismo, de una forma menos marcada, otros modelos presentan desviaciones sistemáticas de cierta relevancia, como sería el caso del modelo “8_IPS-RCA” que presenta valores altos en invierno para la mayor parte de las regiones de la mitad occidental de la Península, y del modelo “12_MPI-RCA” que también presenta valores altos en algunos meses de otoño o invierno en determinadas regiones de la zona central y suroccidental de la Península.

No obstante, dentro de esta buena representatividad general, se observa una cierta tendencia en las regiones climáticas situadas en las cuencas atlánticas y en la cabecera de la cuenca del Ebro, aunque con ciertas diferencias según la zona concreta, a subestimar el número de ocurrencias en los meses de verano y a sobrestimarlo principalmente en los de invierno y, en el caso de algunas de las regiones situadas en el noroeste de la Península, también en otoño. Asimismo, dentro de la vertiente atlántica, se produce una subestimación en los meses de primavera para la mayor parte de las regiones de la mitad oeste y centro peninsular. Por su parte, en las regiones climáticas situadas en el sureste, así como en las Islas Baleares, los modelos climáticos tienden a sobrestimar la ocurrencia de máximos en primavera junto a una subestimación principalmente en los meses de otoño y/o invierno. Dentro de la vertiente mediterránea, las regiones climáticas situadas en el noreste de la península muestran una subestimación en la ocurrencia de máximos en verano frente a una sobrestimación en primavera. Asimismo, se aprecia una cierta subestimación en los meses de otoño en las regiones situadas en el Cantábrico oriental y en Pirineos. Los resultados para las regiones “0101” (en el noroeste de la Península) y “0801” (en el sureste de la Península) se muestran a modo de ejemplo en la Figura 3.4. En el Anexo nº 2 se incluyen las figuras para todas las regiones climáticas con excepción de la región “1400”, ya que, como ya se ha indicado, en esta región no se dispone de ninguna estación para realizar el contraste.

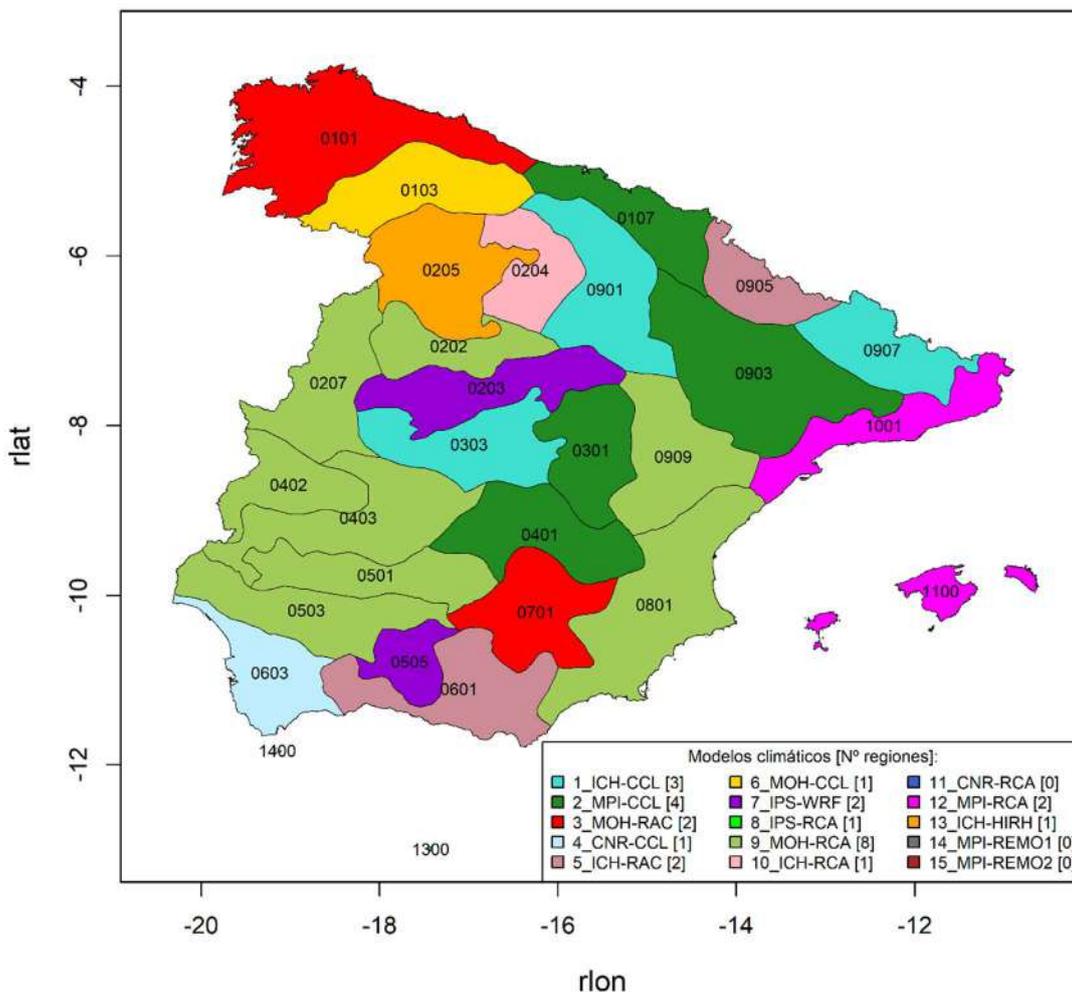
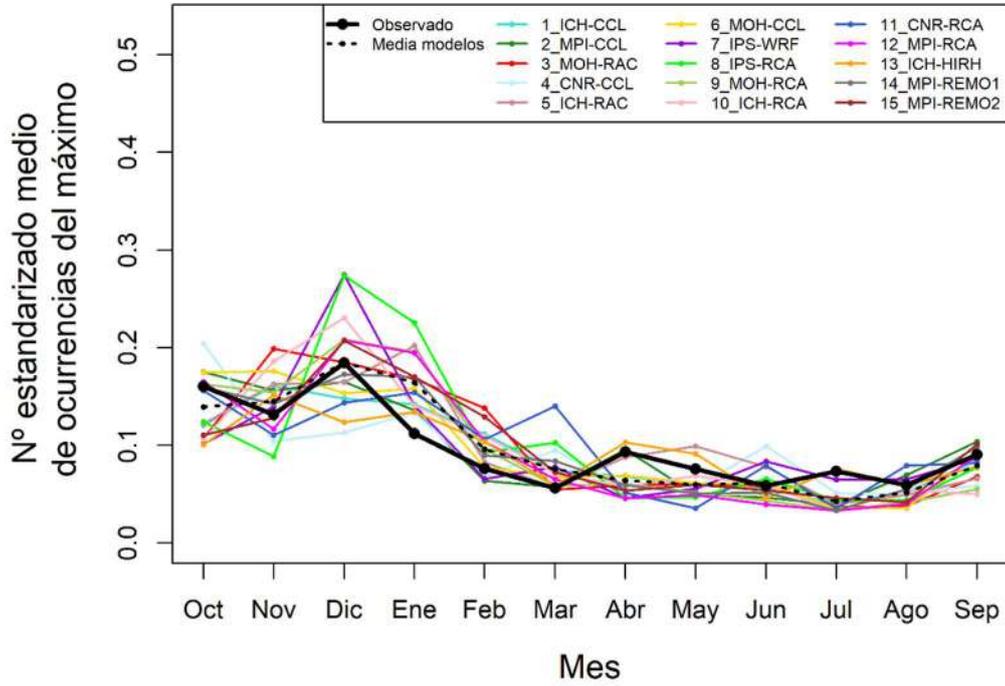


Figura 3.3. Modelo climático de estudio con mejor resultado en cada región respecto a la precipitación diaria máxima anual. ("r lon" y "r lat" se refieren a longitud y latitud en rejilla rotada, respectivamente).



Región 0101



Región 0801

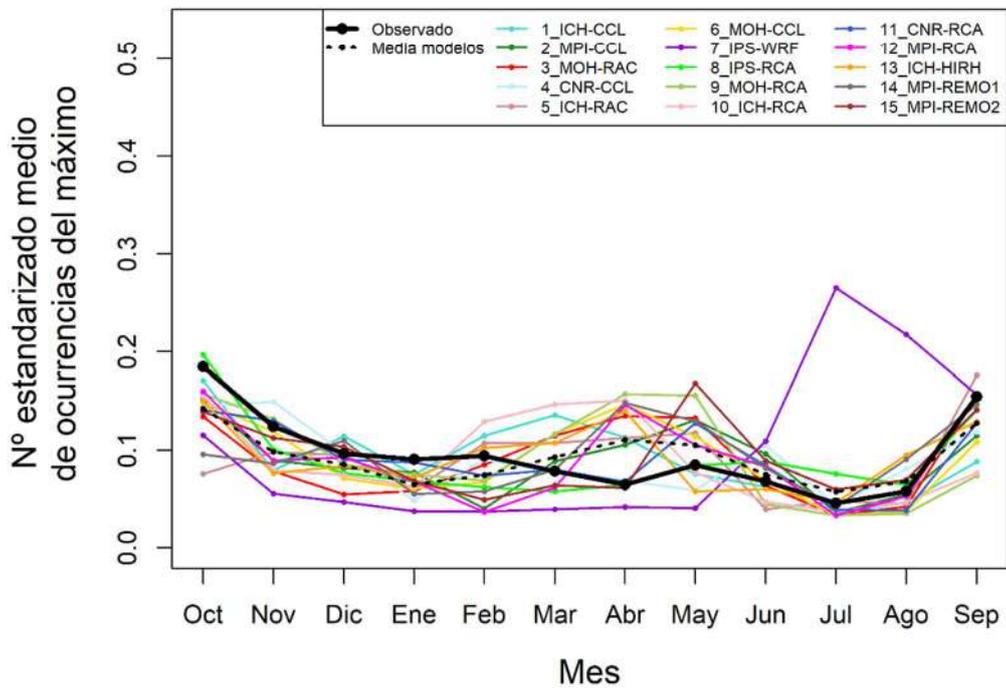


Figura 3.4. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones para el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en las regiones “0101” (arriba) y “0801” (abajo).



3.4. Conclusiones del análisis

Como resultado del análisis llevado a cabo en esta sección, puede concluirse que el comportamiento general del conjunto de modelos climáticos de estudio en relación a la precipitación diaria máxima anual puede considerarse adecuado en el periodo de control, lo que apoya su utilización en el análisis del efecto del cambio climático. Sin embargo, se ha detectado una subestimación generalizada de la precipitación máxima diaria en algunas regiones del este y sureste peninsular, así como en las Islas Baleares, que podría estar relacionada con una mayor limitación de los modelos climáticos para representar correctamente la precipitación convectiva típica de estas zonas, y que podría suponer que los resultados que se obtengan sobre los efectos del cambio climático en esas regiones sean menos fiables. Asimismo, existe sobrestimación del LCS, CV, CS y mxstd por parte de todos los modelos en la región situada en el valle del Ebro.

En cuanto a la estacionalidad de las series simuladas de precipitación diaria máxima anual con respecto a la estacionalidad observada, los modelos climáticos (con la excepción del modelo “7_IPS-WRF” principalmente en las regiones del este peninsular y Baleares, y, en menor medida, otros como el “8_IPS-RCA” y el “12_MPI-RCA”) muestran una buena representatividad general del ciclo estacional en las diferentes regiones, aunque con algunas diferencias dependiendo de la región climática de que se trate.

El contraste de los estadísticos de las simulaciones climáticas respecto a los de los datos observados en el periodo de control se ha utilizado para realizar una primera clasificación del conjunto de modelos climáticos disponible. No obstante, es importante subrayar que el buen comportamiento de un modelo climático en el periodo de control no está necesariamente ligado al buen comportamiento de dicho modelo en los periodos de impacto, por lo que la evaluación del efecto del cambio climático debe estar basada en el mayor número de modelos climáticos posible que permita conocer todo el rango de tendencias de evolución del clima que proporcionan los modelos disponibles. Dicha clasificación de modelos climáticos puede sin embargo ser útil, como se indicó anteriormente, junto con otros criterios, para seleccionar un subconjunto de modelos con los que abordar otros estudios futuros que requieran, por ejemplo, la utilización de modelos hidrológicos para obtener series temporales de caudales, y en los que puede ser necesario reducir el número de modelos climáticos a utilizar debido a limitaciones en la capacidad computacional.

No ha sido posible llevar a cabo el análisis del comportamiento general del conjunto de modelos climáticos en relación al resto de variables de estudio debido a la ausencia o reducida disponibilidad de datos observados para su contraste. A este respecto, es relevante mencionar la dificultad generalizada que existe para llevar a cabo dicho análisis sobre series de precipitación subdiaria de forma adecuada, debido a limitaciones asociadas con la baja disponibilidad de observaciones y simulaciones procedentes de modelos climáticos para intervalos temporales inferiores al día (e.g., [Berg et al. 2019](#)). Destaca el estudio realizado por [Berg et al. \(2019\)](#), en el que se utilizaron observaciones procedentes de cinco países europeos para analizar de forma cualitativa el comportamiento del cuantil de periodo de retorno de 10 años para series de precipitación máxima asociadas a duraciones de lluvia de 1 a 12 horas con respecto a simulaciones de modelos climáticos procedentes de EURO-CORDEX. Dicho análisis mostró una subestimación generalizada, así como dificultades para la representación del patrón espacial de



dicho cuantil para duraciones de lluvia cortas por parte de EURO-CORDEX, presentando mejores resultados para duraciones mayores. En base a dichos resultados, y teniendo en cuenta la imposibilidad de analizar el comportamiento de las variables de precipitación para intervalos temporales inferiores al día en el presente estudio, los resultados obtenidos en relación a dichas variables subdiarias deben ser utilizados con cautela.



CEDEX

4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS Y CAMBIOS EN LAS VARIABLES DE ESTUDIO EN LOS PERIODOS DE IMPACTO

4.1. Introducción

En esta sección se lleva a cabo el análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza, así como en la estacionalidad, de las series de precipitación máxima anual procedentes de los modelos climáticos de estudio a lo largo del siglo XXI. El análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza se realiza para las seis variables de estudio indicadas anteriormente: precipitación diaria máxima anual, precipitación convectiva diaria máxima anual, precipitación horaria máxima anual, así como precipitación acumulada en 3, 6 y 12 horas máxima anual. El análisis de la estacionalidad se lleva a cabo únicamente para la precipitación diaria máxima anual debido a la necesidad de series observadas para su posterior contraste e interpretación.

El análisis utiliza los cuatro periodos de estudio (i.e., periodo de control 1971-2000, periodo de impacto 2011-2040, periodo de impacto 2041-2070 y periodo de impacto 2071-2100), así como el periodo 2011-2100, formado por la concatenación de los tres periodos de impacto. El análisis de tendencias se realiza sobre el periodo completo 2011-2100 para cada escenario (RCP 4.5 y RCP 8.5), mientras que el análisis de cambios en la mediana y en la varianza, así como en la estacionalidad, se realiza sobre cada uno de los tres periodos de impacto, para cada uno de los dos escenarios, comparando éstos con el periodo de control.

El análisis de tendencias, así como de cambios en la mediana y en la varianza, se lleva a cabo a nivel local en cada una de las celdas que forman la zona de estudio, evaluándose la significancia regional de los cambios en base al uso de las regiones climáticas. El análisis de la estacionalidad se lleva a cabo para cada una de las regiones climáticas.

4.2. Metodología

4.2.1. Análisis de tendencias

El análisis de tendencias se realiza mediante el test de Mann Kendall ([Mann 1945](#); [Kendall 1970](#); [Barranco et al. 2017](#); [Pohlert 2020](#)). El test de Mann Kendall es un test no paramétrico que evalúa la existencia de tendencia monótona en una serie temporal en base al rango de correlación de los valores de la serie con el tiempo. La hipótesis nula (H_0) del test postula que la muestra procede de una población con observaciones independientes e idénticamente distribuidas. La hipótesis alternativa (H_1) para el test de dos colas establece que los datos siguen una tendencia monótona, mientras que para el test de una cola H_1 establece que: (i) los datos siguen una tendencia monótona positiva, o (ii) los datos siguen una tendencia monótona negativa. El presente análisis utiliza el test de Mann Kendall de una cola, de modo que: (i) H_0 se rechaza, es decir, se puede considerar que la tendencia es significativa positiva, o (ii) H_0 se rechaza, es decir, se puede considerar que la tendencia es significativa negativa, si el p-valor resultante del test es menor o igual al nivel de significancia establecido.



El test de Mann Kendall se aplica en cada celda de la zona de estudio, considerando un nivel de significancia (local) a cada lado igual a 0.05. Esto se lleva a cabo para: “RCP 4.5: 2011-2100” y “RCP 8.5: 2011-2100”.

4.2.2. Análisis de cambios en la mediana

El análisis de cambios en la mediana se realiza mediante el test de Wilcoxon, también denominado test de suma de rangos de Wilcoxon o test de Mann Whitney (Hipel y McLeod 1994; Barranco et al. 2017; R Core Team 2019 – `wilcox.test`). El test de Wilcoxon es un test no paramétrico que evalúa si dos muestras provienen de distribuciones de población idénticas, y suele emplearse para comparar medianas. De acuerdo con esto, H_0 postula que la diferencia de las distribuciones de dos muestras en relación a la mediana es cero. H_1 para el test de dos colas establece que dicha diferencia es distinta de cero, mientras que para el test de una cola H_1 establece que: (i) la diferencia es positiva, o (ii) la diferencia es negativa. El presente análisis utiliza el test de Wilcoxon de una cola, de modo que: (i) H_0 se rechaza, es decir, se puede considerar que hay un cambio en la mediana significativo positivo, o (ii) H_0 se rechaza, es decir, se puede considerar que hay un cambio en la mediana significativo negativo, si el p-valor resultante del test es menor o igual al nivel de significancia establecido.

El test de Wilcoxon se aplica para determinar si existe cambio significativo en la mediana entre la serie asociada a un determinado periodo de impacto y escenario y la serie asociada al periodo de control, de modo que un cambio positivo indica mayor mediana en el futuro, mientras que un cambio negativo indica lo contrario. El test de Wilcoxon se aplica en cada celda de la zona de estudio, considerando un nivel de significancia (local) a cada lado igual a 0.05. Esto se lleva a cabo para cada uno de los tres periodos de impacto para cada escenario, en comparación con el periodo de control, es decir, para: “RCP 4.5: 2011-2040”, “RCP 4.5: 2041-2070”, “RCP 4.5: 2071-2100”, “RCP 8.5: 2011-2040”, “RCP 8.5: 2041-2070” y “RCP 8.5: 2071-2100”.

4.2.3. Análisis de cambios en la varianza

El análisis de cambios en la varianza se realiza mediante el test de Fligner Killeen, también denominado test de homogeneidad de varianzas de Fligner Killeen (Conover et al. 1981; Barranco et al. 2017; R Core Team 2019 – `fligner.test`). El test de Fligner Killeen es un test no paramétrico que evalúa si la varianza de múltiples muestras es idéntica. H_0 postula que la varianza es la misma para todas las muestras, mientras que H_1 establece que la varianza es distinta para al menos dos de las muestras. H_0 se rechaza, es decir, se puede considerar que hay un cambio en la varianza, si el p-valor resultante del test es menor o igual al nivel de significancia establecido. El test de Fligner Killeen está definido como test de dos colas, ya que está pensado para analizar múltiples muestras.

En este estudio el test de Fligner Killeen se aplica para determinar si existe cambio en la varianza entre dos series: la serie asociada a un determinado periodo de impacto y escenario y la serie asociada al periodo de control. El signo de dicho cambio puede establecerse en base al signo de la diferencia de varianzas entre series, siendo un cambio positivo indicador de mayor varianza en el futuro, y un cambio negativo indicador de lo contrario. En este caso, los p-valores asociados al test de Fligner Killeen para un nivel de significancia local a cada lado igual a 0.05 (i.e., para

$\alpha_{loc}^{1cola} = 0.05$), necesarios para analizar la significancia regional de los cambios tal como se expondrá más adelante, pueden obtenerse a través de los resultados obtenidos mediante la aplicación del test de Fligner Killeen de dos colas en cada celda de la zona de estudio para un nivel de significancia local a dos lados igual a 0.10 (i.e., para $\alpha_{loc}^{2colas} = 0.10$):

- Si una celda presenta diferencia de varianzas positiva: el test de una cola para evaluar diferencias positivas tiene asociado un p-valor $\{\alpha_{loc}^{1cola} = 0.05\} = \text{p-valor}\{\alpha_{loc}^{2colas} = 0.10\} / 2$, mientras que el test de una cola para evaluar diferencias negativas tiene asociado un p-valor $\{\alpha_{loc}^{1cola-} = 0.05\} = 1 - \text{p-valor}\{\alpha_{loc}^{2colas} = 0.10\} / 2$.
- Si una celda presenta diferencia de varianza negativa: el test de una cola para evaluar diferencias negativas tiene asociado un p-valor $\{\alpha_{loc}^{1cola-} = 0.05\} = \text{p-valor}\{\alpha_{loc}^{2colas} = 0.10\} / 2$, mientras que el test de una cola para evaluar diferencias positivas tiene asociado un p-valor $\{\alpha_{loc}^{1cola+} = 0.05\} = 1 - \text{p-valor}\{\alpha_{loc}^{2colas} = 0.10\} / 2$.

Esto se lleva a cabo para cada uno de los tres periodos de impacto para cada escenario, en comparación con el periodo de control, es decir, para: “RCP 4.5: 2011-2040”, “RCP 4.5: 2041-2070”, “RCP 4.5: 2071-2100”, “RCP 8.5: 2011-2040”, “RCP 8.5: 2041-2070” y “RCP 8.5: 2071-2100”.

4.2.4. Análisis de la significancia a nivel de región

La evaluación de la significancia a nivel regional de los cambios identificados mediante los tres test locales (i.e., del test de Mann Kendall, Wilcoxon y Fligner Killeen) se realiza mediante el método de la tasa de falso descubrimiento (“*False Discovery Rate*”, [Benjamini y Hochberg 1995](#)). La utilización del método de la tasa de falso descubrimiento se recomienda, entre otras razones, debido a que sus resultados no están afectados por la correlación espacial que existe entre celdas como resultado de la marcada naturaleza espacial de la precipitación, y que, por ejemplo, sí afecta a los resultados del tradicional test binomial pudiendo provocar la identificación de un mayor número de regiones como significativas ([Wilks 2006](#); [Khaliq et al. 2009](#)). Asimismo, este método tiene en cuenta no solo el número de celdas dentro de una región con cambios significativos en el estadístico sino también la magnitud del p-valor local.

El método de la tasa de falso descubrimiento está basado en la identificación de test locales significativos mediante el control de la “tasa de falso descubrimiento”, definida como la proporción esperada de H_0 locales que son rechazadas siendo verdaderas. En este contexto, una tendencia (o cambio) se considera significativa a nivel regional si al menos una H_0 local es rechazada, siendo H_0 local rechazada si el p-valor obtenido a través del test local (en la celda) es menor o igual que un umbral. Dicho umbral se obtiene como el máximo de los p-valores locales, considerando sólo aquellos menores o iguales al valor de la significancia regional multiplicada por la posición del p-valor (ordenado de menor a mayor) y dividida entre el número de p-valores (i.e., celdas en la región).

El método de la tasa de falso descubrimiento se aplica sobre los p-valores asociados a los test de una cola para cada uno de los test locales; es decir, de forma separada para evaluar si las



tendencias (o cambios) positivas o negativas en las celdas pueden ser consideradas significativas a nivel regional. Para ello se considera un nivel de significancia regional a cada lado igual a 0.05. Puede ocurrir que en una determinada región y para un determinado modelo climático se identifiquen tendencias (o cambios) tanto significativas positivas como significativas negativas. En ese caso se considera que dicha tendencia (o cambio) es inconsistente para la región.

El análisis de la significancia regional se lleva a cabo para los dos casos evaluados en el test de Mann Kendall y para los seis casos evaluados en los test de Wilcoxon y Fligner Killeen.

4.2.5. Resumen del procedimiento para la identificación de tendencias y cambios significativos

Antes de aplicar los test locales en cada celda, es conveniente analizar la autocorrelación en las series máximas anuales, ya que su existencia puede afectar a los resultados de dichos test. A continuación, se procede a aplicar cada test local en cada celda para cada modelo climático de estudio, identificando aquellas celdas en las que la mayoría de modelos climáticos (e.g., al menos ocho de los 15 modelos climáticos para precipitación diaria máxima anual) coincide en la identificación de una tendencia, cambio en la mediana o cambio en la varianza significativo positivo o negativo. Posteriormente, se procede a la evaluación de la significancia regional mediante la aplicación del método de la tasa de falso descubrimiento en cada región para cada modelo climático de estudio, identificando aquellas regiones para las que la mayoría de modelos climáticos coincide en la identificación de una tendencia, cambio en la mediana o cambio en la varianza significativo positivo o negativo. Puede ocurrir que en determinadas regiones, donde la tendencia (o cambio) haya sido identificada como inconsistente por determinados modelos climáticos, dicha tendencia (o cambio) también sea identificada como “inconsistente” al considerar el resultado de la mayoría de los modelos climáticos de estudio.

4.2.6. Análisis de la estacionalidad

El análisis de la estacionalidad de las series de precipitación diaria máxima anual en las regiones climáticas para los diferentes periodos de impacto y escenarios se lleva a cabo de forma análoga al análisis realizado para su contraste en el periodo de control (ver [sección 3.2](#)), comparándose en este caso el valor medio del número estandarizado medio de ocurrencias del máximo obtenido a través de los modelos climáticos de estudio para cada periodo de impacto y escenario con respecto al valor medio obtenido para el periodo de control, y utilizándose los resultados asociados a las observaciones de forma adicional para su contraste e interpretación.

4.3. Resultados y discusión

A continuación se especifica el número de modelos climáticos disponibles para cada variable de estudio, ya expuesto anteriormente (ver [sección 2.1](#)), con el consiguiente número de modelos climáticos necesarios para alcanzar mayoría en la identificación de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos positivos o negativos ([Tabla 4.1](#)).

Se ha decidido llevar a cabo el análisis de cada variable utilizando todos los modelos climáticos disponibles para cada una de ellas. La utilización únicamente del conjunto de modelos climáticos comunes a todas las variables (i.e., los seis modelos climáticos que ofrecen información sobre precipitación acumulada cada tres horas; ver [Tabla 2.2](#)) supondría ignorar gran parte de la información disponible para la variable principal de análisis, la precipitación diaria máxima anual, y, en menor medida, para la precipitación horaria máxima anual, la variable más representativa del comportamiento de las intensidades de precipitación en intervalos temporales inferiores al día. Aunque esta aproximación implica que los resultados obtenidos para cada variable no sean estrictamente comparables, ya que los resultados cambiarán en cierta medida según el número de modelos climáticos que se utilice, se considera suficiente para obtener una valoración cualitativa del posible comportamiento futuro de cada variable, así como del comportamiento relativo de las distintas variables entre sí.

Tabla 4.1. Número de modelos climáticos disponible para cada variable de estudio, así como mayoría asociada para el análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza.

Variable de estudio	Modelos climáticos de estudio	
	Nº de modelos climáticos	Nº de modelos climáticos para mayoría
Precipitación diaria máxima anual	15	8
Precipitación convectiva diaria máxima anual	14	8
Precipitación horaria máxima anual	12	7
Precipitación acumulada en 3 horas máxima anual	6	4
Precipitación acumulada en 6 horas máxima anual	6	4
Precipitación acumulada en 12 horas máxima anual	6	4

Precipitación diaria máxima anual

El análisis preliminar de la autocorrelación en la precipitación diaria máxima anual indica la existencia de autocorrelación significativa positiva/negativa a un nivel de confianza del 95% (considerando retardos de 1 a 5 años), en menos de un 5.9% de las celdas para cada uno de los modelos climáticos de estudio y casos analizados (periodo de control y periodo 2011-2100 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5), es decir, en un porcentaje similar al nivel de significancia, por lo que puede considerarse que no existe autocorrelación en estas series. En la práctica, es común asumir independencia en las series de máximos anuales por considerarse despreciable el efecto de la autocorrelación.

Los diferentes modelos climáticos de estudio muestran una gran variabilidad de resultados en relación a los test aplicados en cada celda para el análisis de la precipitación diaria máxima anual. El resumen de dichos resultados se muestra a continuación, mediante la comparación visual del número de celdas y regiones con tendencias o cambios significativos identificados para cada modelo climático y cada escenario, y el análisis del número medio de resultados significativos. En general, el número de tendencias significativas, tanto positivas como negativas, es mayor para el escenario RCP 8.5 que para RCP 4.5, como se aprecia en la [Figura 4.1](#), donde la mayor parte de los puntos están localizados por encima de la diagonal. El número de cambios en la mediana significativos es, en general, mayor para RCP 8.5 que para RCP 4.5, excepto para



cambios significativos negativos asociados con el periodo de impacto 2011-2040, que son menores para RCP 8.5 (Figura 4.2). Este efecto se intensifica según avanza el siglo XXI. Los resultados asociados a los cambios en la varianza presentan más variabilidad, siendo en general el número de cambios en este estadístico significativos positivos mayores para RCP 8.5 que para RCP 4.5, y el número de cambios significativos negativos menores para RCP 8.5, existiendo excepciones en ambos casos (Figura 4.3). En general, el número medio de resultados significativos aumenta con el escenario (mayor en RCP 8.5 que en RCP 4.5) y con el periodo de impacto (existiendo excepciones) según avanza el siglo XXI, siendo el número medio de resultados significativos positivos mayor que el de resultados significativos negativos para los tres test.

A continuación se identifican aquellas celdas en las que la mayoría de los modelos climáticos de estudio coincide respecto a los resultados del test de Mann Kendall, Wilcoxon y Fligner Killeen para la precipitación diaria máxima anual. Como resultado, no se identifica ninguna celda con tendencia significativa para “RCP 4.5: 2011-2100”, mientras que se identifican cuatro celdas con tendencia significativa negativa en el sur de la Península para “RCP 8.5: 2011-2100” (Figura 4.4). La mayor parte de las celdas en las que se identifica cambio en la mediana significativo presentan cambio positivo, estando localizadas en el norte de la Península (tres celdas para “RCP 4.5: 2041-2070”, 14 celdas para “RCP 4.5: 2071-2100”, cuatro celdas para “RCP 8.5: 2041-2070” y 114 celdas para “RCP 8.5: 2071-2100”), mientras que seis celdas localizadas en el sur de la Península presentan cambio en la mediana significativo negativo para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.5). Las celdas en las que se identifica cambio en la varianza significativo presentan cambio positivo, estando asociadas con el escenario RCP 8.5 (una celda para “RCP 8.5: 2041-2070” y 22 celdas para “RCP 8.5: 2071-2100”) y distribuidas por la Península (Figura 4.6).

Posteriormente se identifican aquellas regiones en las que la mayoría de los modelos climáticos de estudio coincide respecto a los resultados del método de la tasa de falso descubrimiento para cada uno de los test estadísticos aplicados sobre la precipitación diaria máxima anual. Como resultado, no se identifica ninguna región con tendencia significativa (Figura 4.4) o cambio en la varianza significativo (Figura 4.6). En cambio, se identifican regiones con cambio en la mediana significativo para “RCP 8.5: 2071-2100”, siendo este cambio positivo en cinco regiones ubicadas en el norte de la Península (región “0101”, “0202”, “0204”, “0205”, y “0901”), y negativo para la región “0701” ubicada en el sur de la Península (Figura 4.5). No se identifican regiones con tendencias o cambios inconsistentes para la mayoría de modelos climáticos.

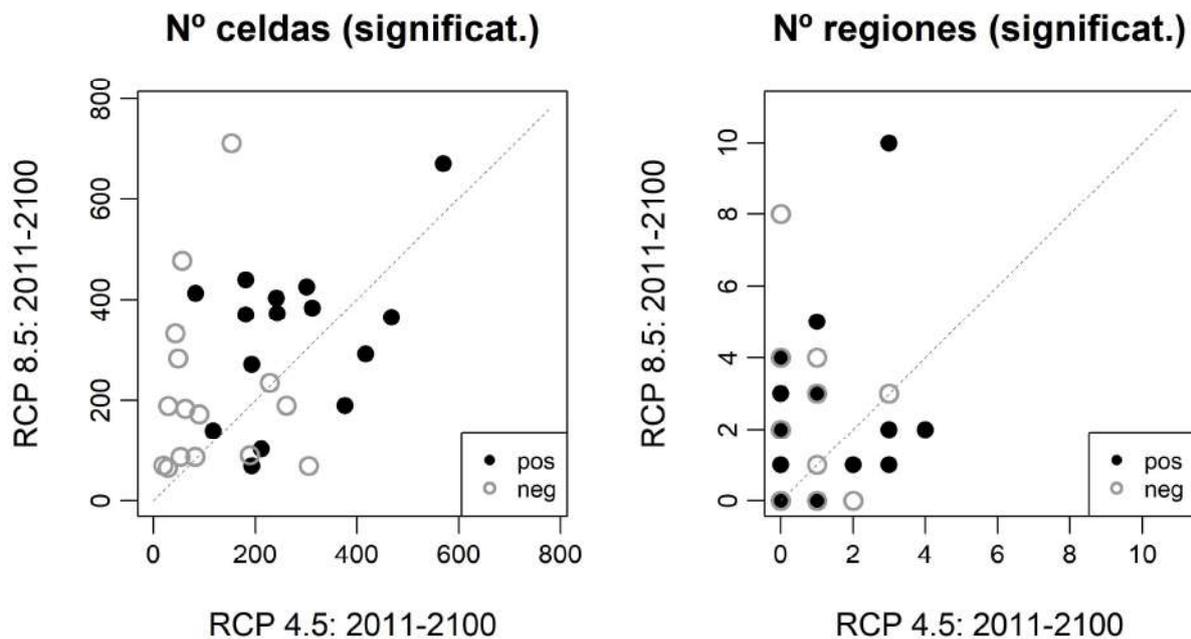


Figura 4.1. Número de celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en los modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual.

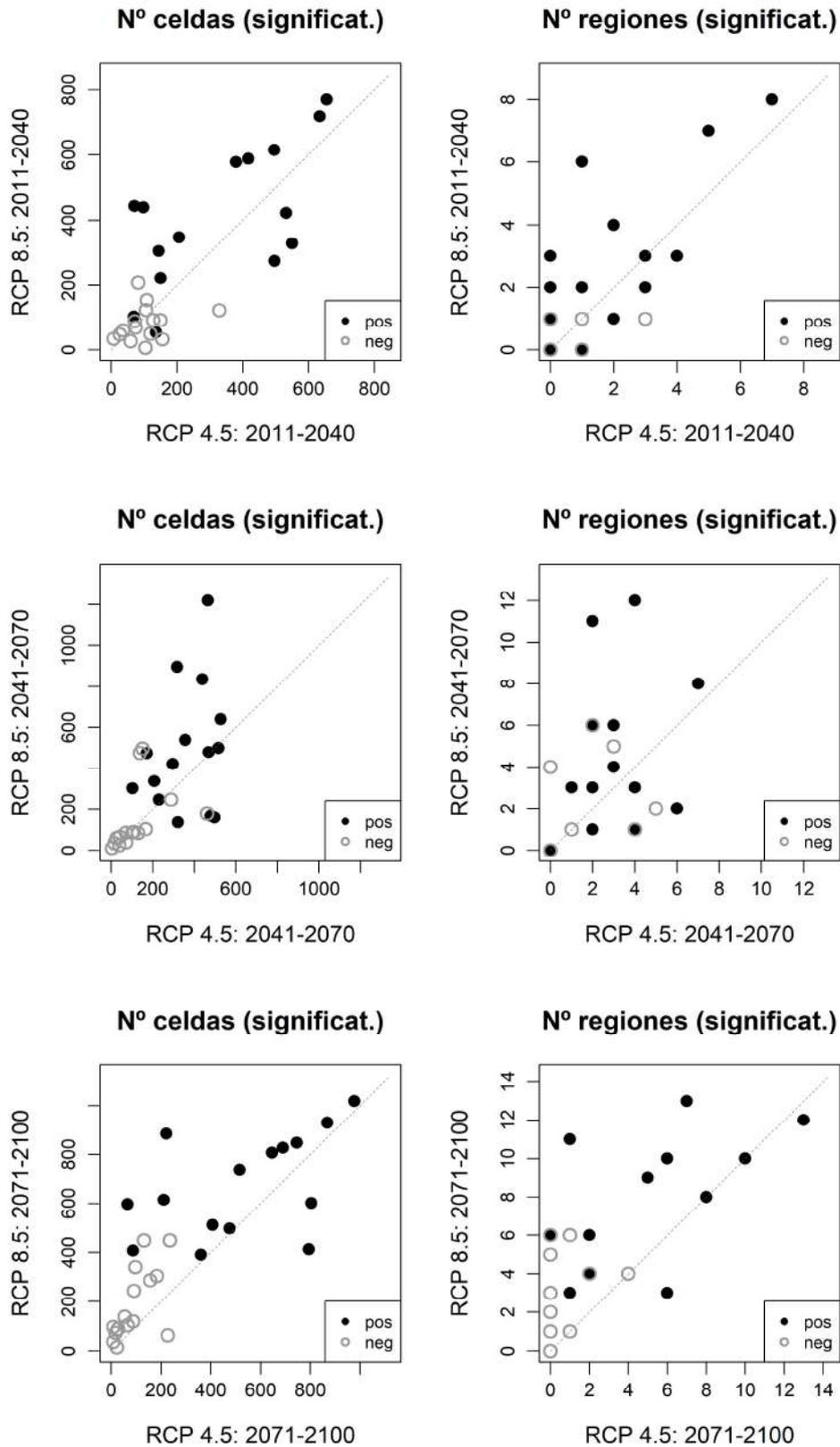


Figura 4.2. Número de celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en los modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual.

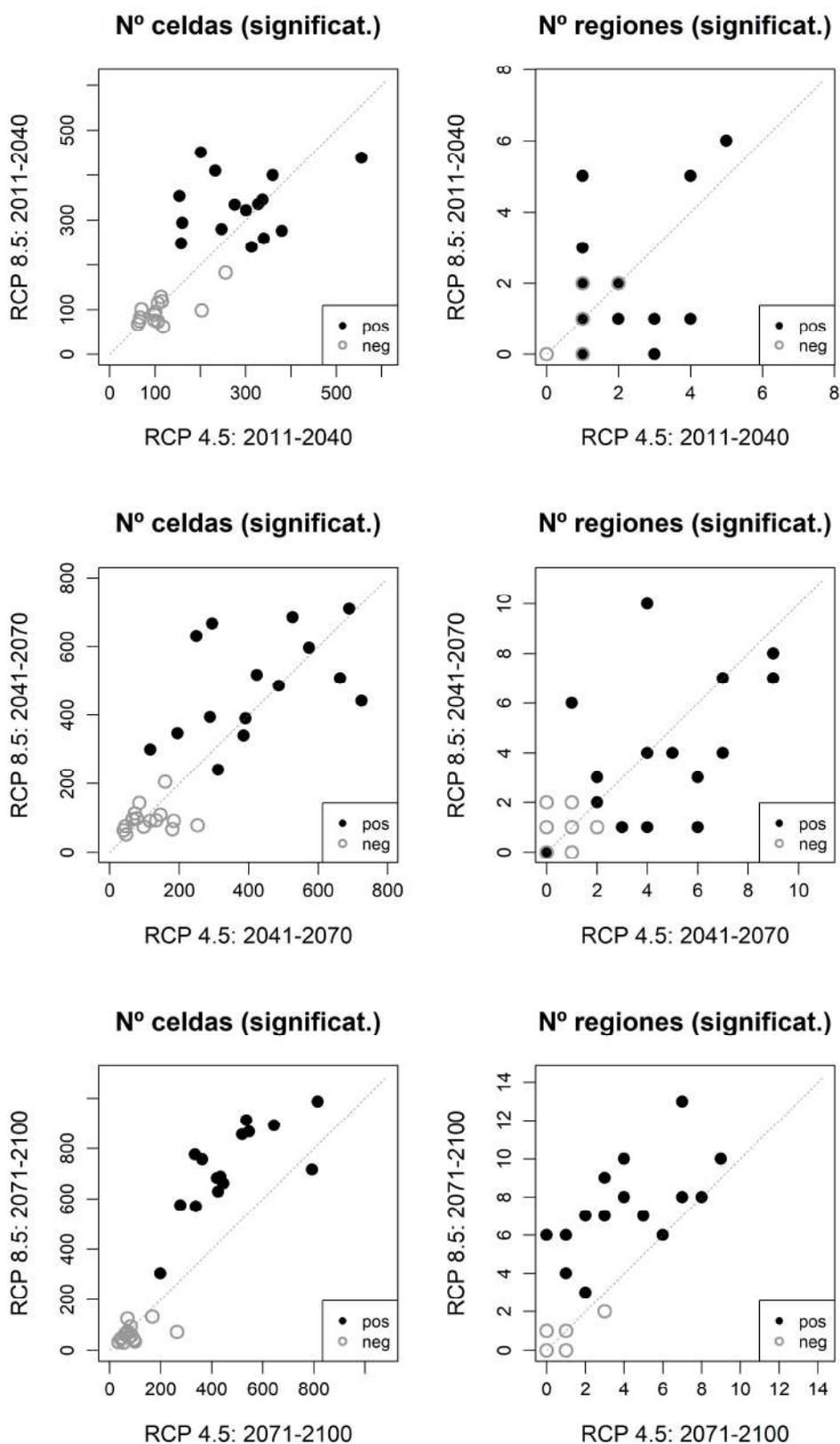


Figura 4.3. Número de celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en los modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual.

En general, el número de celdas y regiones con tendencias o cambios significativos para la mayoría de modelos climáticos de estudio respecto a la precipitación diaria máxima anual es reducido debido a la variedad de resultados obtenidos por los diferentes modelos climáticos. De esta forma, el escaso número de celdas y regiones con tendencias y cambios significativos identificados no significa que los modelos climáticos considerados en el estudio no pronostiquen cambios significativos en los estadísticos analizados, sino que existen diferencias entre los distintos modelos climáticos respecto a la ubicación geográfica de estos cambios, de tal forma que únicamente en un número reducido de celdas y regiones hay coincidencia en el pronóstico de la mayoría de modelos. En el **Anexo nº 3** se incluyen figuras con los resultados obtenidos para cada uno de los modelos climáticos de estudio.

Como se ha indicado anteriormente, el número de celdas y regiones significativos aumenta, en general, con el escenario y el periodo de impacto, siendo por lo tanto mayor para “RCP 8.5: 2071-2100”. A nivel de celda, para ese escenario y periodo de impacto se ha identificado tendencia significativa negativa y disminución significativa de la mediana en algunas celdas en el sureste de la Península, aumento significativo de la mediana en celdas del norte de la Península (principalmente en el noroeste), y aumento significativo de la varianza en algunas celdas aisladas distribuidas por la Península. A nivel de región, para la misma combinación de escenario y periodo de impacto se ha identificado disminución significativa de la mediana en una región en el sureste de la Península y aumento significativo de la mediana en cinco regiones en el noroeste de la Península.

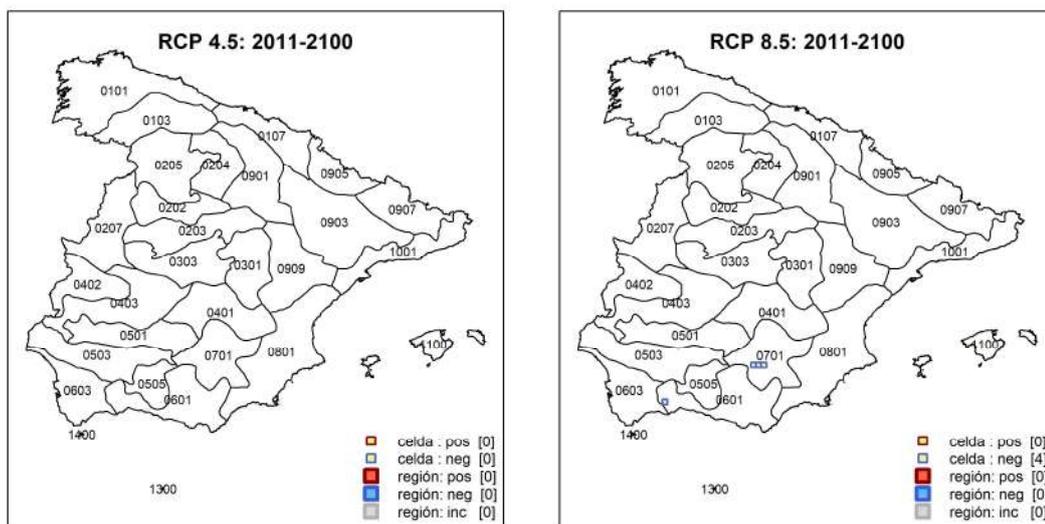


Figura 4.4. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual. (“pos” = *positiva*; “neg” = *negativa*; “inc” = *inconsistente*).

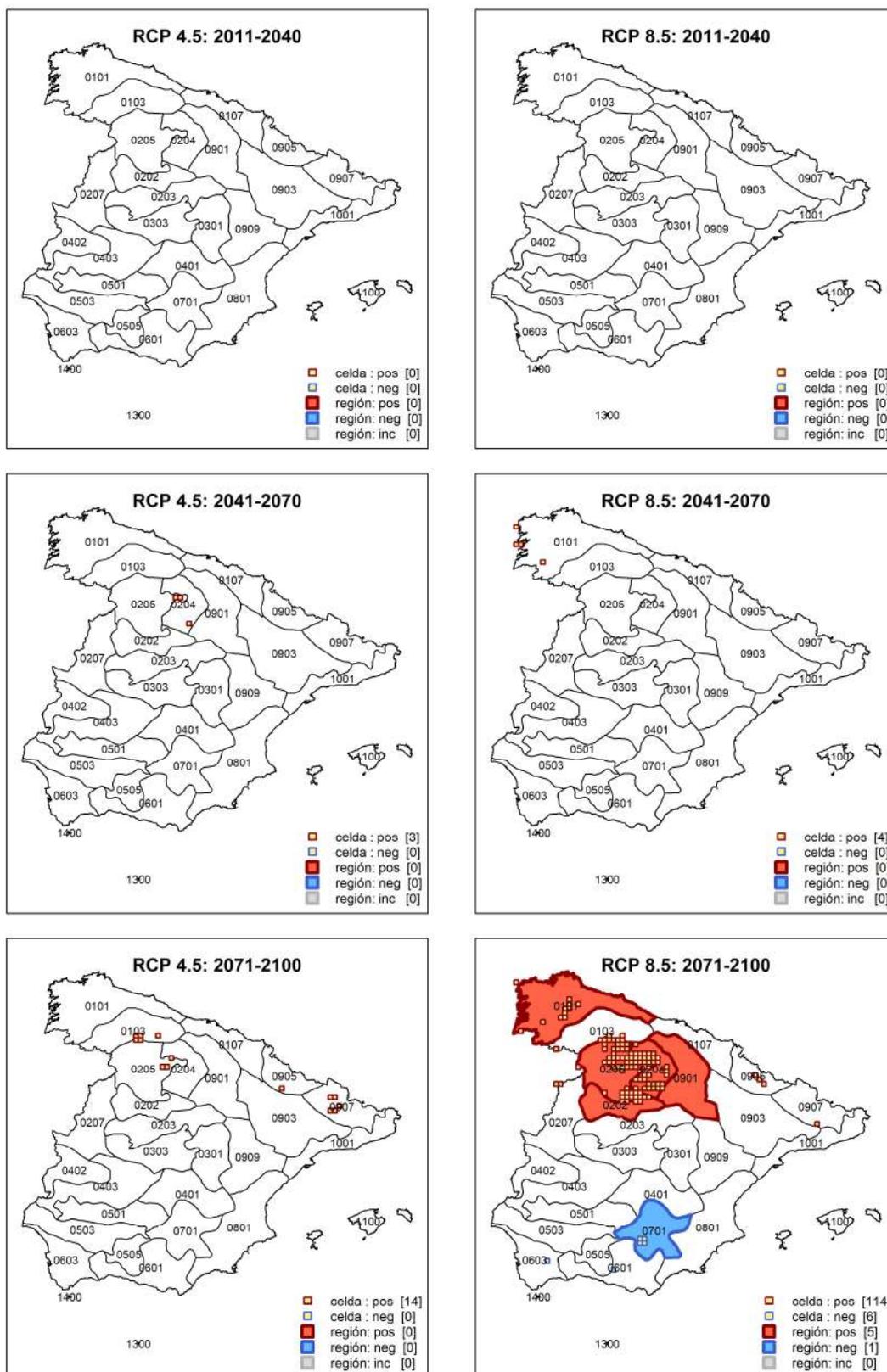


Figura 4.5. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

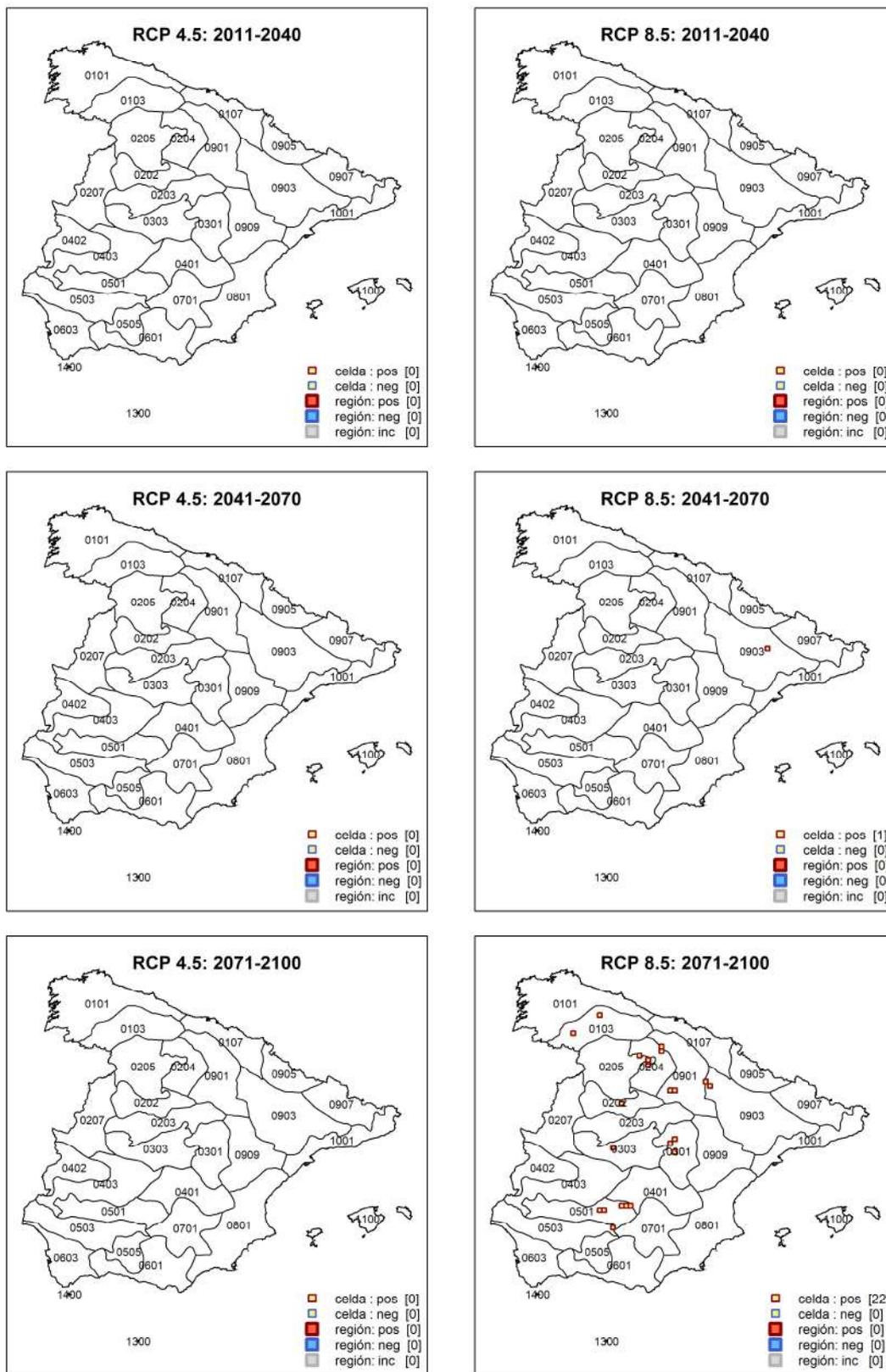


Figura 4.6. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

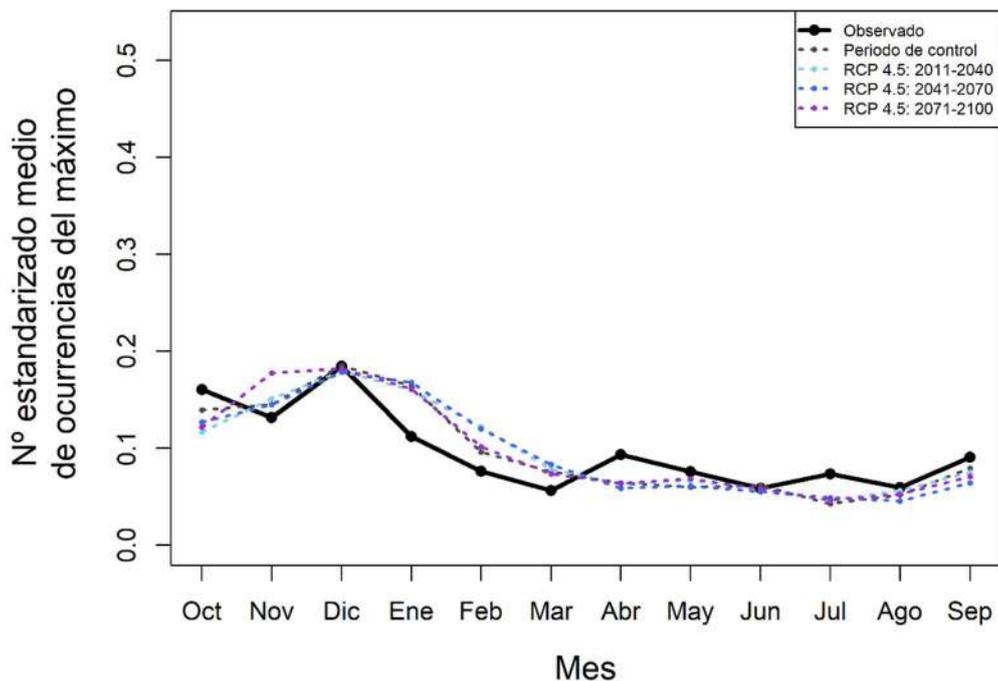


El contraste del valor medio del número estandarizado medio de ocurrencias del máximo obtenido a través de los modelos climáticos de estudio para cada periodo de impacto y escenario con respecto al valor medio obtenido para el periodo de control muestra que los patrones estacionales futuros son muy similares a los del periodo de control en todos los casos, registrándose las mayores diferencias entre periodos de estudio, en la mayor parte de las regiones, en los meses de otoño e invierno, principalmente en el caso de las regiones de la vertiente atlántica. Estos resultados parecen indicar que no son esperables cambios relevantes en el patrón estacional de ocurrencia de las máximas precipitaciones diarias como consecuencia del cambio climático. No obstante, en la mayor parte de las regiones de la vertiente atlántica se aprecia, en algunos casos, un ligero retraso, de uno o dos meses, en el mes en el que se registra el mayor número de eventos, correspondiente a las estaciones de otoño o invierno. Los resultados para las regiones “0101” (en el noroeste de la Península) y “0801” (en el sureste de la Península) respecto a los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 se muestran a modo de ejemplo en las Figuras 4.7 y 4.8. En el Anexo nº 4 se incluyen las figuras para todas las regiones climáticas, con la excepción de la región “1400” que, como se ya se ha indicado, no dispone de estaciones para realizar el contraste.

El análisis de la estacionalidad obtenida para los modelos climáticos de estudio de forma individual en los diferentes periodos de impacto permite concluir que el comportamiento anómalo de determinados modelos, identificados al realizar el contraste con los datos observados en el periodo de control (modelo “7_IPS-WRF” y, en menor medida, otros como los modelos “8_IPS-RCA” y 12_MPI-RCA”), se mantiene también en los periodos de impacto. Los resultados asociados con las regiones “0101” y “0801” respecto al escenario RCP 4.5 y periodo de impacto 2041-2070 se muestran a modo de ejemplo en la Figura 4.9.



Región 0101



Región 0101

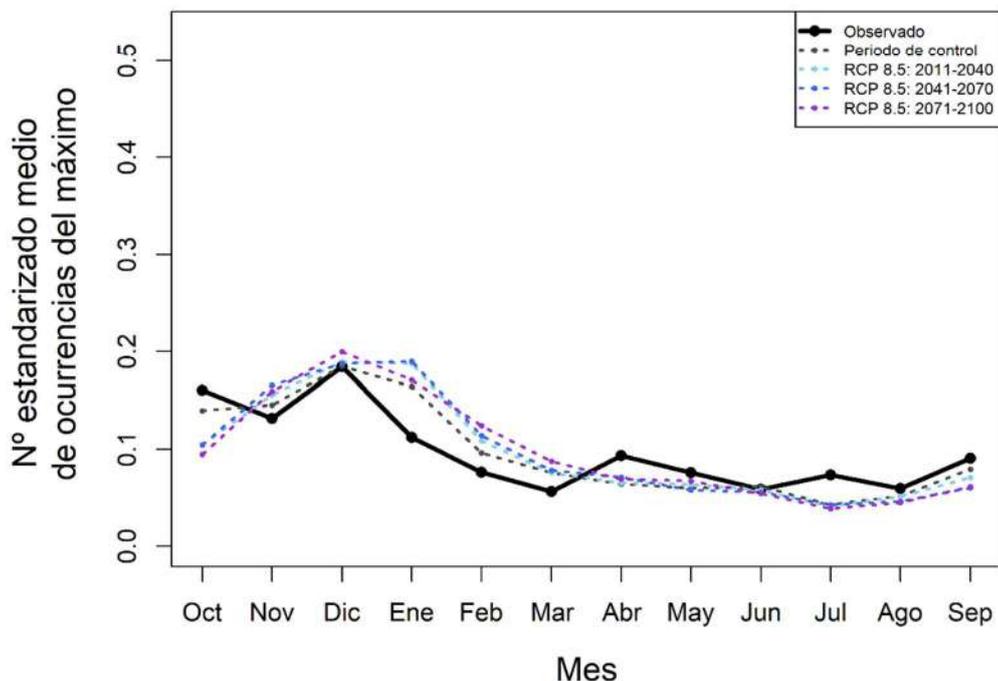
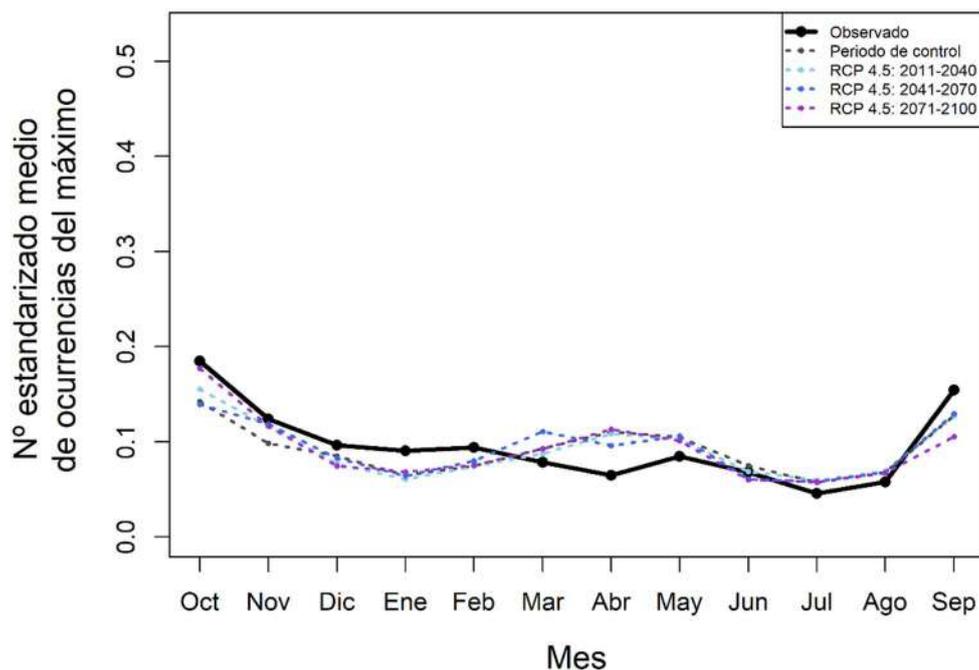


Figura 4.7. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y los escenarios RCP 4.5 (arriba) y RCP 8.5 (abajo) respecto al periodo de control en la región "0101".



Región 0801



Región 0801

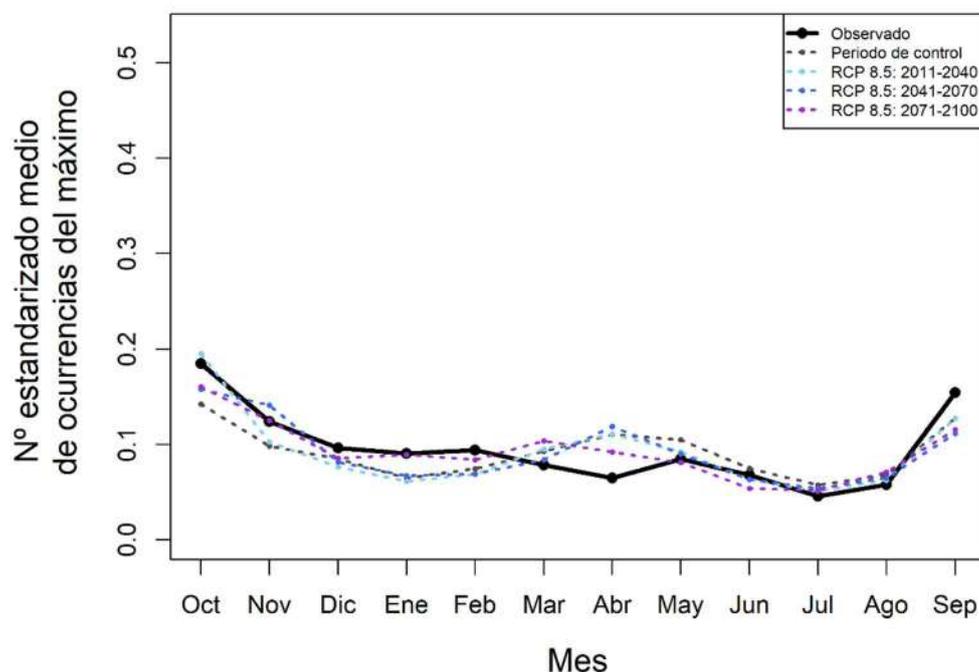
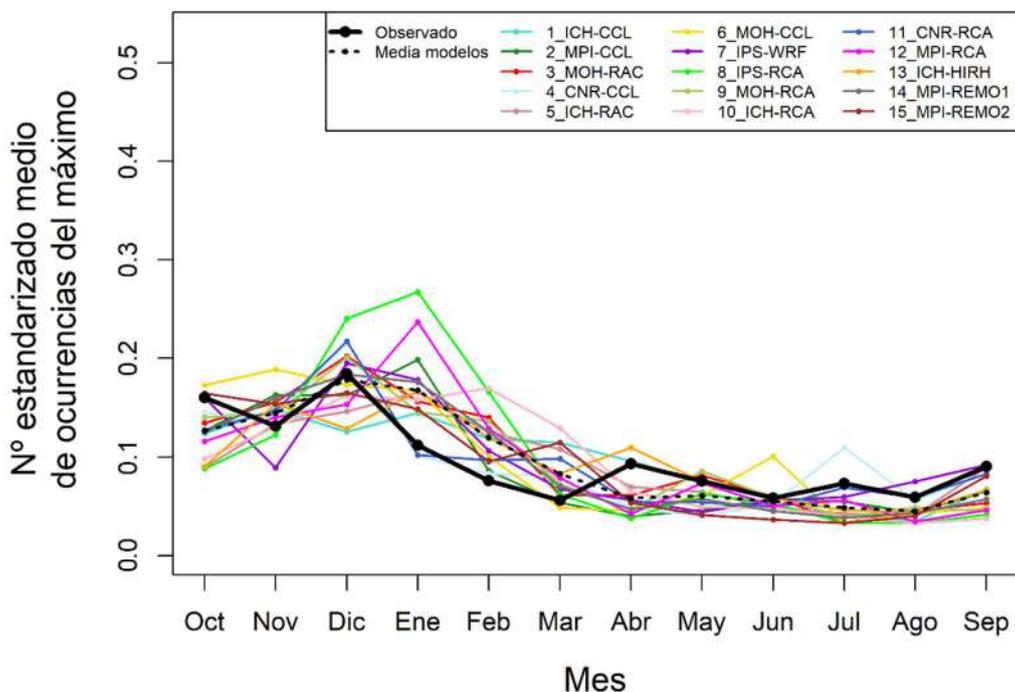


Figura 4.8. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y los escenarios RCP 4.5 (arriba) y RCP 8.5 (abajo) respecto al periodo de control en la región "0801".



Región 0101



Región 0801

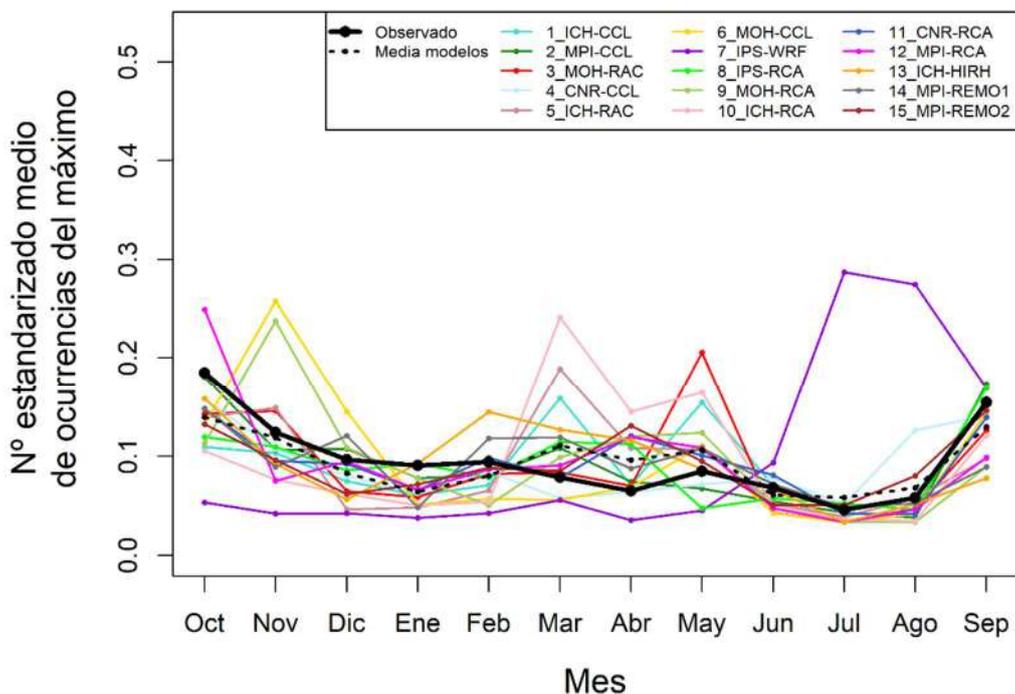


Figura 4.9. Estacionalidad proporcionada por los distintos modelos climáticos para la precipitación diaria máxima anual en el periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en las regiones “0101” (arriba) y “0801” (abajo).

Precipitación convectiva diaria máxima anual

Como se ha indicado anteriormente, el análisis de la precipitación convectiva máxima anual se ha llevado a cabo con 14 modelos climáticos, uno menos que los empleados para analizar la precipitación diaria máxima anual, ya que el modelo “2_MPI-CCL” no proporciona información sobre esta variable. No se identifican celdas ni regiones con tendencias significativas en las que la mayoría de modelos climáticos de estudio coincide (Figura 4.10). Se observan cambios en la mediana significativos positivos en algunas celdas en el noreste de la Península, en los Pirineos, para la mayoría de periodos de impacto y escenarios, y cambios significativos negativos en dos celdas en el sur de la Península para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.11), así como una celda con cambio en la varianza significativo positivo en el centro de la Península para “RCP 4.5: 2041-2070” y tres celdas distribuidas por la zona de estudio (dos en la Península y una en Baleares) para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.12). Se identifican regiones con cambios en la mediana significativos positivos en el noreste de la Península: la región “0907” para “RCP 8.5: 2041-2070” y dos regiones (“0905” y “0907”) para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.11). A su vez, se identifican cambios en la varianza significativos positivos en dos regiones localizadas en el noreste (“0907”) de la Península y Baleares (“1100”) para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.12). Como resultado, la región “0907”, ubicada en el noreste de la Península y correspondiente al Pirineo oriental, presenta cambios tanto en la mediana como en la varianza significativos positivos para “RCP 8.5: 2071-2100”.

Estos resultados indicarían que el posible incremento de precipitación máxima en la zona de los Pirineos podría deberse en parte a una intensificación de los fenómenos de carácter convectivo típicos de las zonas montañosas. Por otra parte, se destaca el hecho de que no se detecten cambios en la precipitación convectiva en la zona del levante y sureste peninsular (sí aparecen cambios en varianza en las Islas Baleares), salvo para la mediana en algunas celdas al norte de la región “1001”, donde ese tipo de fenómeno es origen de las mayores precipitaciones que se producen en la zona. No obstante, como se indicó anteriormente, los resultados proporcionados por los modelos climáticos en las regiones ubicadas en esa zona podrían ser menos fiables (debido al sesgo generalizado en la estimación de la media por parte de los modelos climáticos, posiblemente relacionado con una mayor limitación de los modelos para representar correctamente la precipitación convectiva típica de estas zonas), y, por lo tanto, será necesario tomarlos con una mayor precaución.

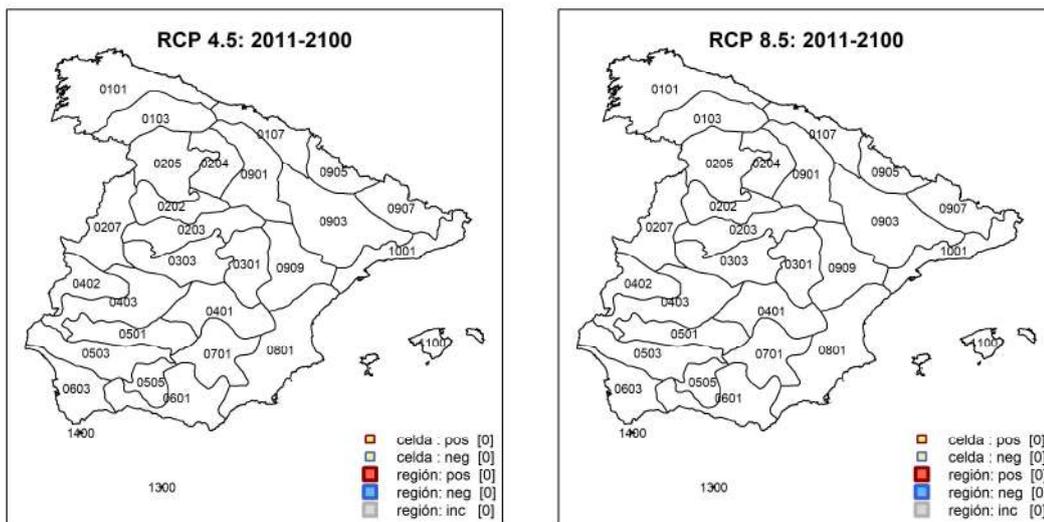


Figura 4.10. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente).

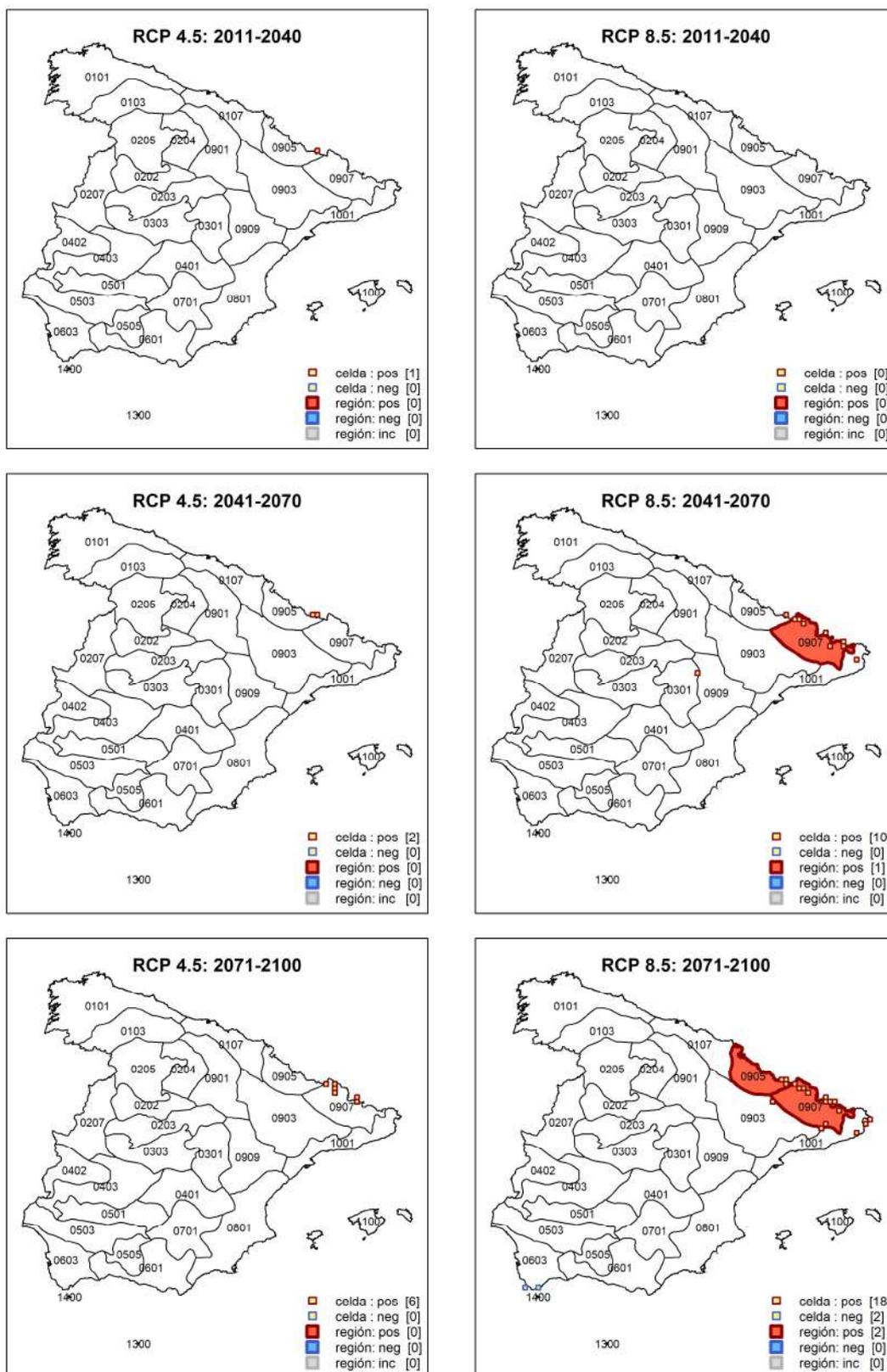


Figura 4.11. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

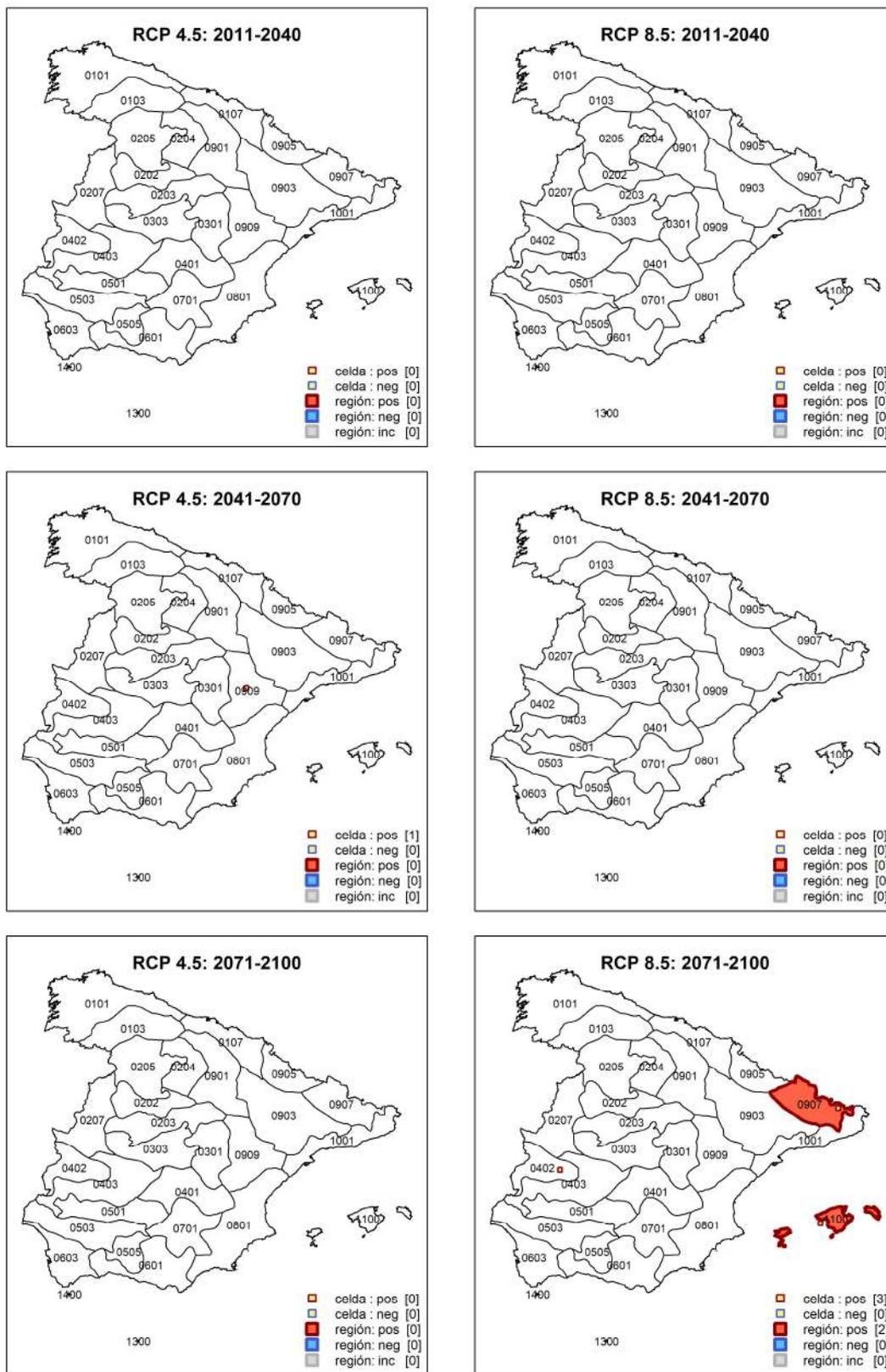


Figura 4.12. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

Precipitación horaria máxima anual

El análisis de la precipitación horaria máxima anual se ha llevado a cabo con los 12 modelos climáticos que proporcionan información sobre este tipo de variable, tres menos que los empleados para analizar la precipitación diaria máxima anual (modelos “7_IPS-WRF”, “14_MPI-REMO1” y “15_MPI-REMO2”), por lo que los resultados no serán estrictamente comparables a los obtenidos para la precipitación diaria máxima anual. No obstante, el número de modelos climáticos en común es suficientemente elevado como para que esta circunstancia no sea demasiado relevante.

La identificación de celdas y regiones en la que la mayoría de modelos climáticos de estudio coincide muestra tendencia significativa positiva en 274 celdas situadas en la mitad norte de la Península (principalmente en el noroeste) para “RCP 8.5: 2011-2100”, así como en cinco regiones (“0101”, “0103”, “0202”, “0205” y “0207”) situadas en el cuadrante noroeste de la Península (Figura 4.13). Se observan cambios en la mediana significativos positivos a nivel de celda y de región a lo largo de la Península, estando más presentes en el cuadrante noroeste de la misma y, en menor medida, en el sur y el sureste, para todos los periodos de impacto y escenarios, excepto para “RCP 4.5: 2011-2040” (Figura 4.14). Estos cambios se observan en cuatro regiones (“0101”, “0103”, “0207” y “0303”) en el cuadrante noroeste de la Península para “RCP 4.5: 2071-2100”, en tres regiones (“0101”, “0103”, y “0205”) en el noroeste para “RCP 8.5: 2041-2070” y en 14 regiones distribuidas a lo largo de la Península con la excepción del sur y de la zona de levante para “RCP 8.5: 2071-2100”. Se identifican a su vez cambios en la varianza significativos positivos a nivel de celda y de región a lo largo de la Península, con una menor incidencia en la vertiente cantábrica, Sistema Ibérico, zonas costeras del este peninsular y Baleares (Figura 4.15). Estos cambios se observan en la región “0401” en el centro de la Península para “RCP 8.5: 2041-2070” y en 19 regiones distribuidas por la Península para “RCP 8.5: 2071-2100”.

Como resultado para “RCP 8.5: 2071-2100”: las regiones “0103”, “0202”, “0205” y “0207” localizadas en el cuadrante noroeste de la Península presentan tendencia significativa positiva y cambio en la mediana y en la varianza significativo positivo, la región “0101” ubicada en el noroeste de la Península presenta tendencia significativa positiva y cambio en la mediana significativo positivo, y las regiones “0203”, “0204”, “0303”, “0401”, “0402”, “0903” y “0905” localizadas en el oeste, centro y norte de la Península presentan cambios en la mediana y en la varianza significativos positivos.

Como puede observarse, los resultados obtenidos son consistentes con los correspondientes a la precipitación diaria máxima anual, siendo similar el patrón espacial de cambios pero con una intensificación muy notable del incremento de la mediana y la varianza en ambos escenarios, y principalmente para el RCP 8.5 y el último periodo de impacto. Los incrementos de mediana se ubican principalmente, al igual que para la precipitación diaria, en la zona noroccidental (aunque en este caso se extienden también hacia el centro y noreste peninsular), y ya no se pronostican descensos en la zona suroriental. Los incrementos de varianza se producen principalmente en las regiones del centro y sur de la Península (también para la varianza con una mayor extensión hacia el noreste del país), de la misma forma que en el caso de la precipitación diaria, aunque, como se ha indicado, de una manera más intensa y generalizada. Estos resultados apuntan a un

mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a un incremento de la torrencialidad.

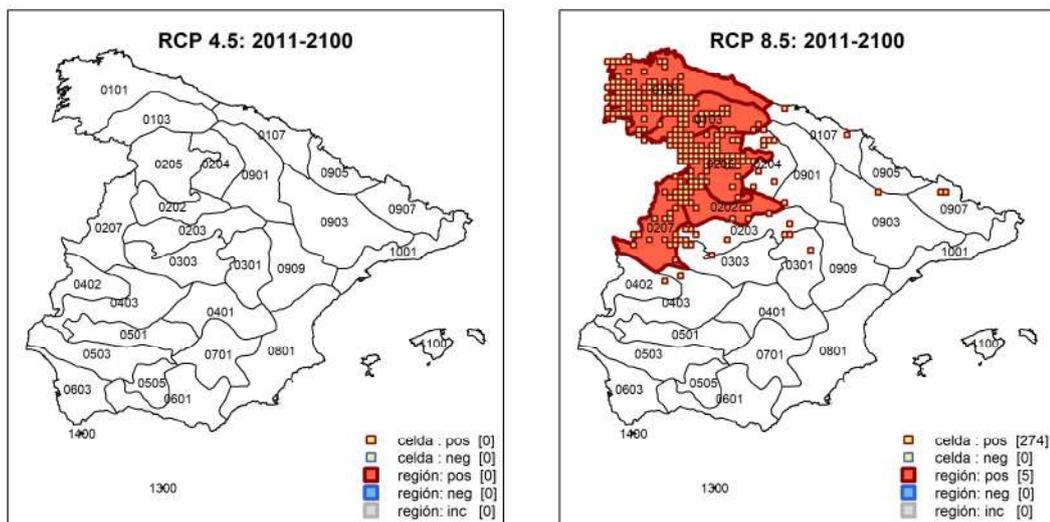


Figura 4.13. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación horaria máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente).

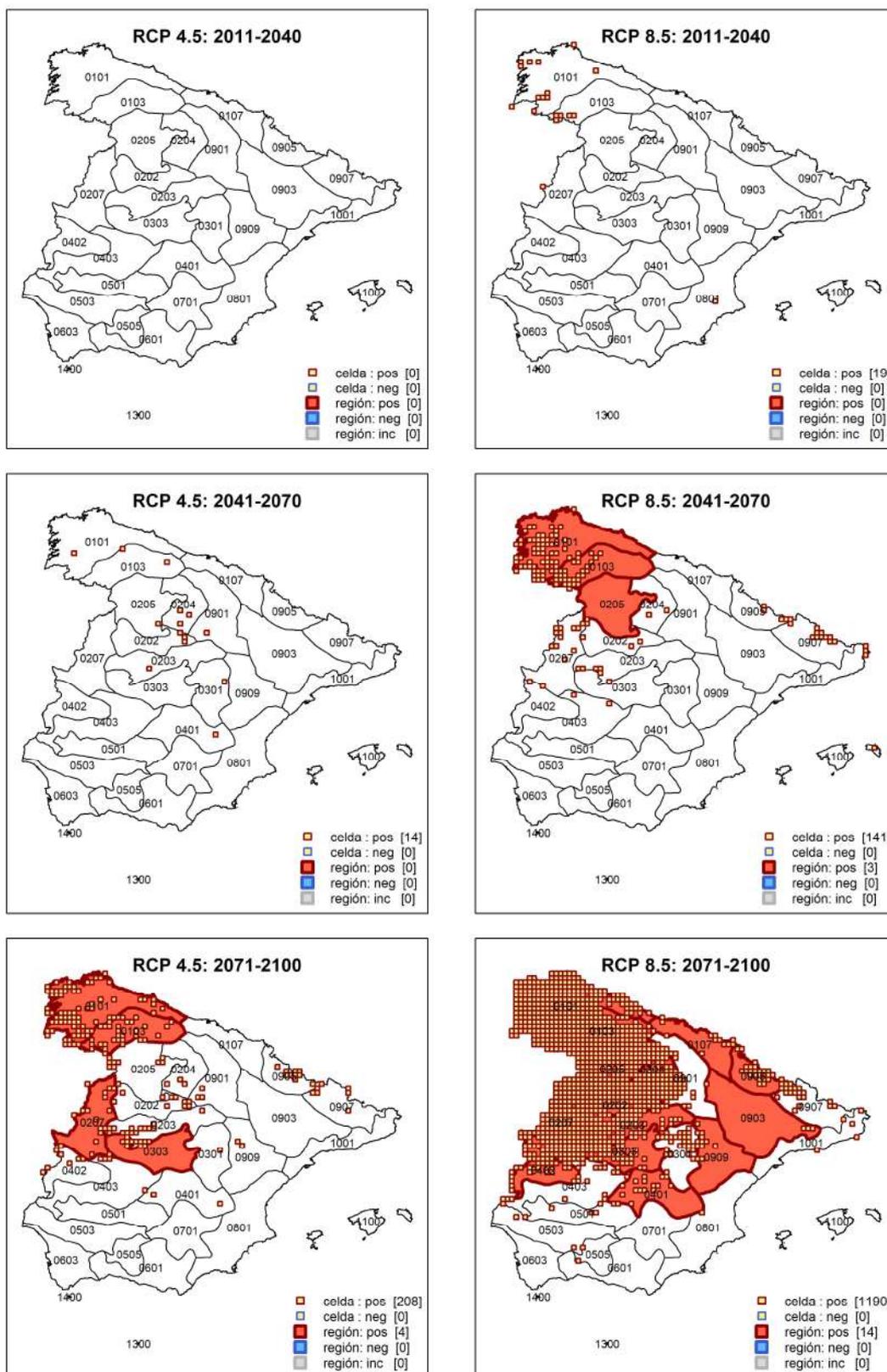


Figura 4.14. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación horaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

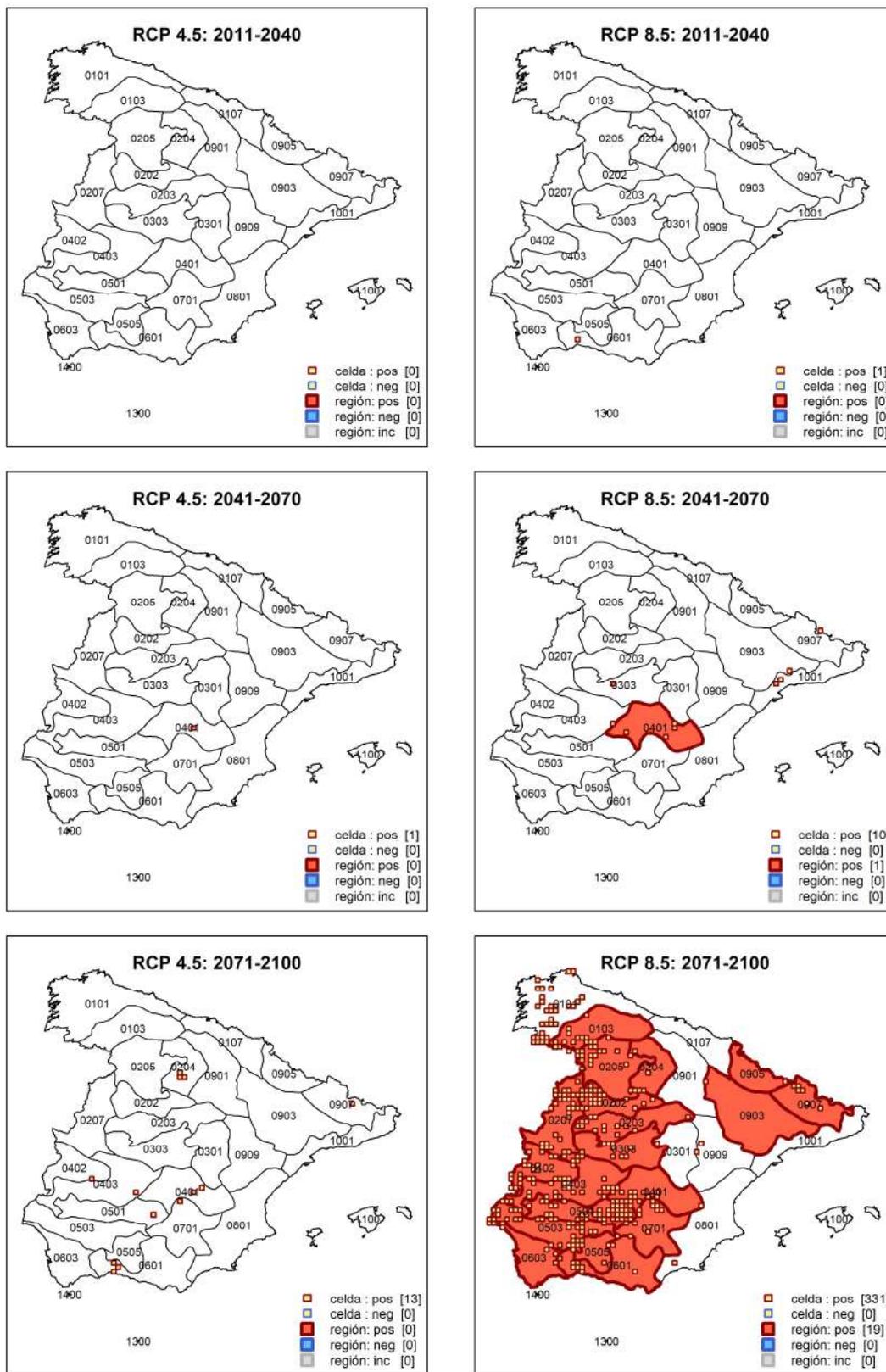


Figura 4.15. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación horaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).



Precipitación acumulada en 3 horas máxima anual

Para el análisis de la precipitación acumulada en 3 horas máxima anual, así como para la acumulada en 6 y 12 horas que son objeto de las siguientes secciones, se ha contado únicamente con los seis modelos climáticos indicados anteriormente que proporcionan este tipo de variable (“8_IPS-RCA”, “9_MOH-RCA”, “10_ICH-RCA”, “11_CNR-RCA”, “12_MPI-RCA” y “13_ICH-HIRH”). El número de modelos climáticos disponible en este caso es notablemente inferior a los utilizados para analizar las variables anteriores por lo que los resultados no serán comparables, aunque sirven para extraer una idea cualitativa del comportamiento de estas variables frente al resto.

La identificación de celdas y regiones en las que la mayoría de modelos climáticos de estudio coincide muestra tendencias significativas positivas en dos celdas ubicadas en el oeste de la Península para “RCP 4.5: 2011-2100” y en 147 celdas y dos regiones (“0103” y “0203”) ubicadas en la mitad norte de la Península para “RCP 8.5: 2011-2100”, así como tendencia significativa negativa en una celda en el sureste de la Península para “RCP 8.5: 2011-2100” (Figura 4.16). A nivel de celda, se observan cambios en la mediana y en la varianza significativos positivos a lo largo de la Península para todas las combinaciones escenario – periodo de impacto, así como cambios en la mediana significativos negativos en alguna celda aislada en el sureste de la Península para “RCP 4.5: 2041-2070” y “RCP 8.5: 2071-2100” (Figuras 4.17 y 4.18). Se identifican regiones con cambios en la mediana significativos positivos en la mitad norte de la Península: la región “0103” para “RCP 4.5: 2071-2100” y 10 regiones para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.17). Asimismo, se identifican cuatro regiones (“0202”, “0303”, “0402” y “0505”) con cambios en la varianza significativos positivos en el centro y sur de la Península para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.18). Como resultado, para “RCP 8.5: 2071-2100”: la región “0103” ubicada en el noroeste de la Península presenta tanto tendencias como cambios en la mediana significativos positivos, y las regiones “0202” y “0303” ubicadas en el centro de la Península presentan tanto cambios en la mediana como en la varianza significativos positivos.



CEDEX

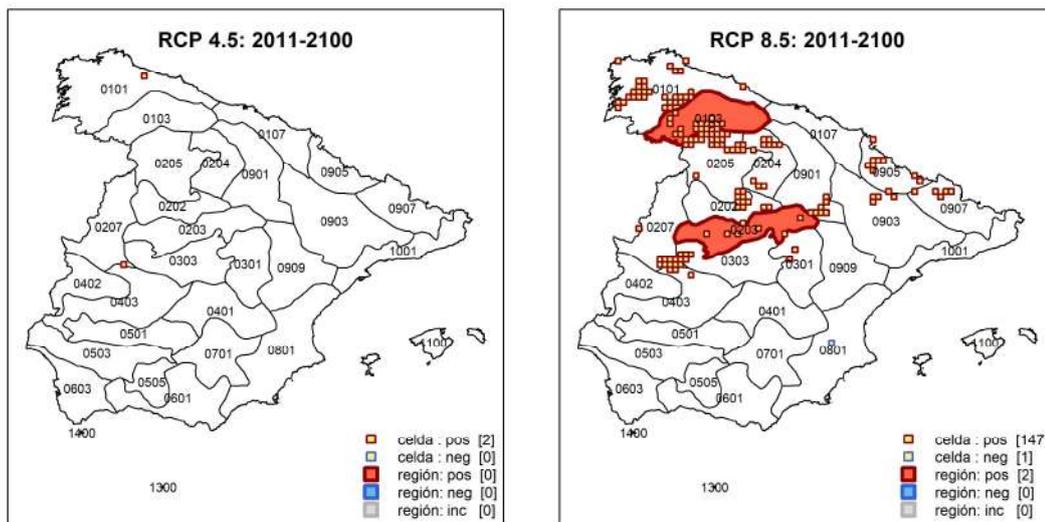


Figura 4.16. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 3 horas máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente).

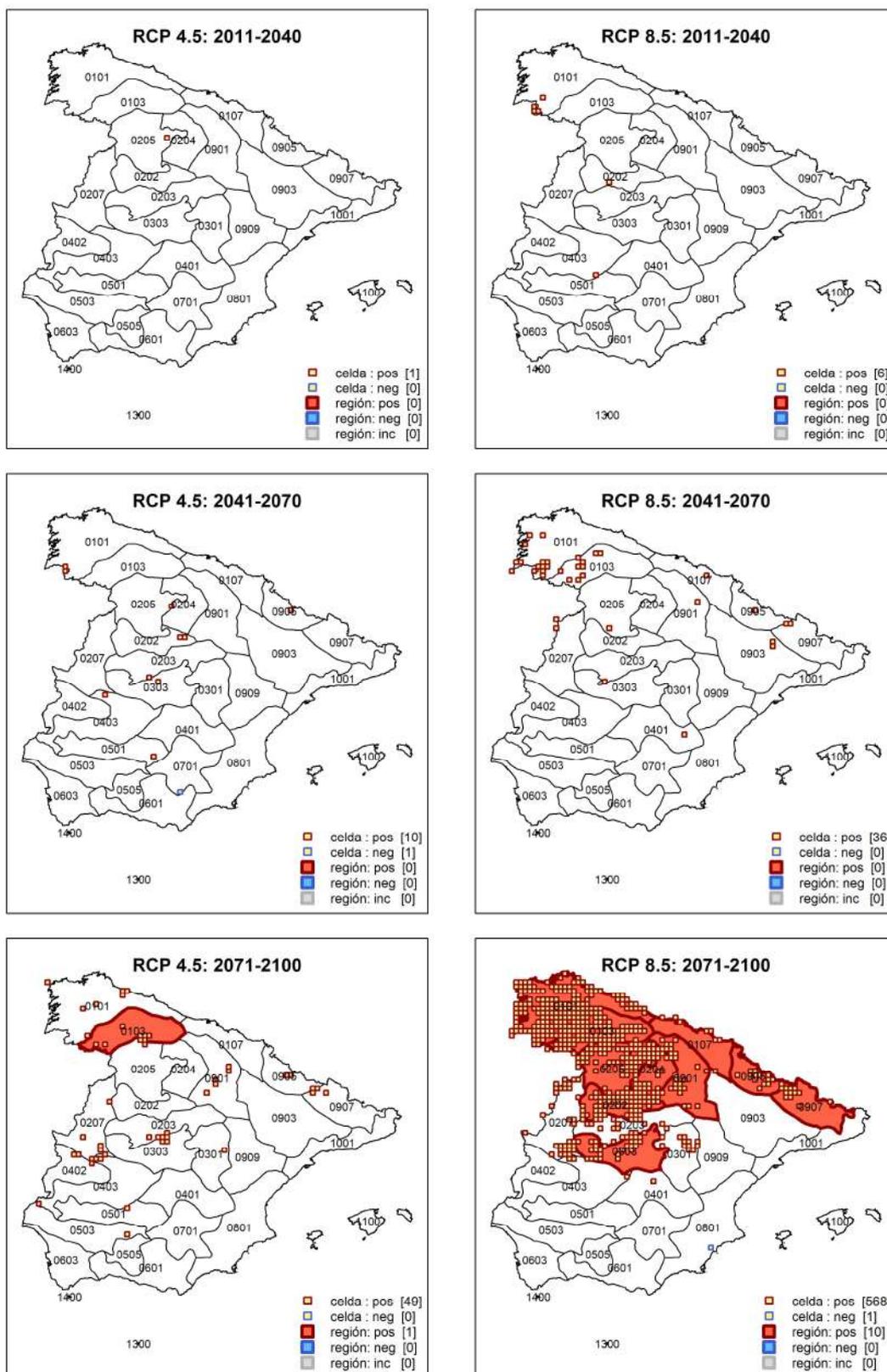


Figura 4.17. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 3 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).

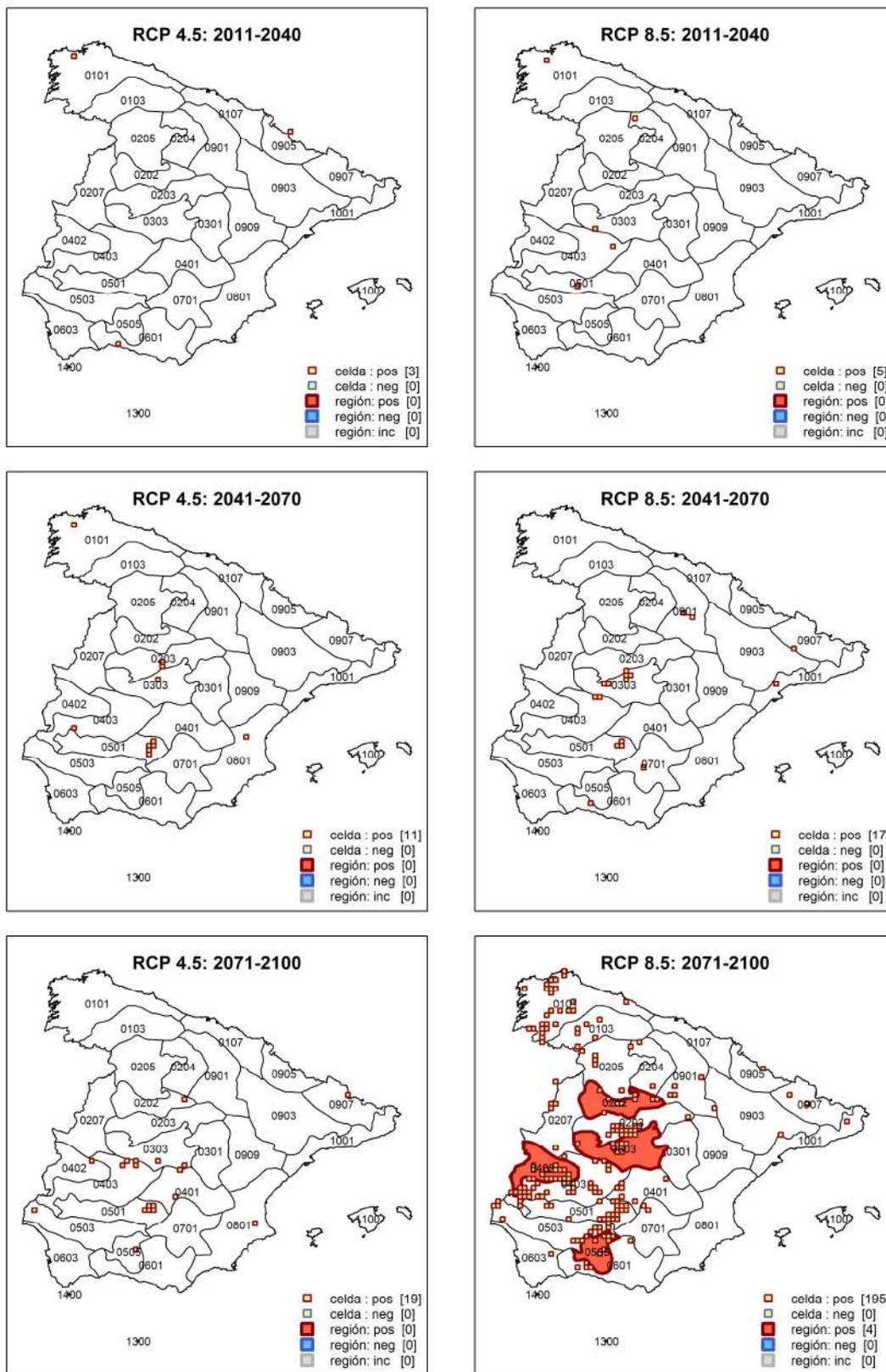


Figura 4.18. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 3 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).

Precipitación acumulada en 6 horas máxima anual

Para el análisis de la precipitación acumulada en 6 horas máxima anual se ha contado con los mismos modelos climáticos indicados anteriormente para la precipitación acumulada en 3 horas. La identificación de celdas y regiones en la que la mayoría de modelos climáticos de estudio coincide muestra tendencias significativas a nivel de celda (Figura 4.19), existiendo tres celdas con tendencia significativa positiva en el oeste de la Península para “RCP 4.5: 2011-2100”, así como 100 celdas con tendencia significativa positiva en la mitad norte de la Península (principalmente en el noroeste) y 2 celdas con tendencia significativa negativa en el sureste de la Península para “RCP 8.5: 2011-2100”. A nivel de celda, se observan cambios en la mediana significativos positivos en la mitad norte de la Península para todos los periodos de impacto y escenarios, así como cambios en la mediana significativos negativos en algunas celdas en el sureste de la Península para “RCP 4.5: 2041-2070” y “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.20). Se identifican regiones con cambios en la mediana significativos positivos en la mitad norte de la Península: dos regiones (“0301” y “0905”) para “RCP 4.5: 2071-2100”, la región “0907” para “RCP 8.5: 2041-2070” y cuatro regiones (“0103”, “0202”, “0905” y “0907”) para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.20). Asimismo, se observan cambios en la varianza significativos positivos a lo largo de la Península para todos los periodos de impacto y escenarios, y se identifican dos regiones (“0202” y “0303”), con cambio significativo en dicho estadístico, en el centro de la Península para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.21). Como resultado, la región “0202”, localizada en el centro de la Península, presenta cambios tanto en la mediana como en la varianza significativos positivos para “RCP 8.5: 2071-2100”.

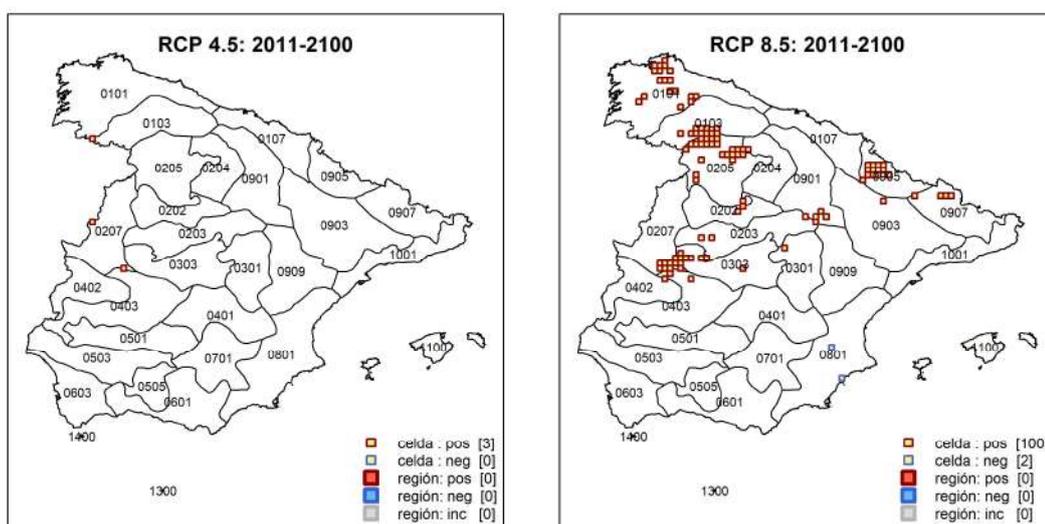


Figura 4.19. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 6 horas máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

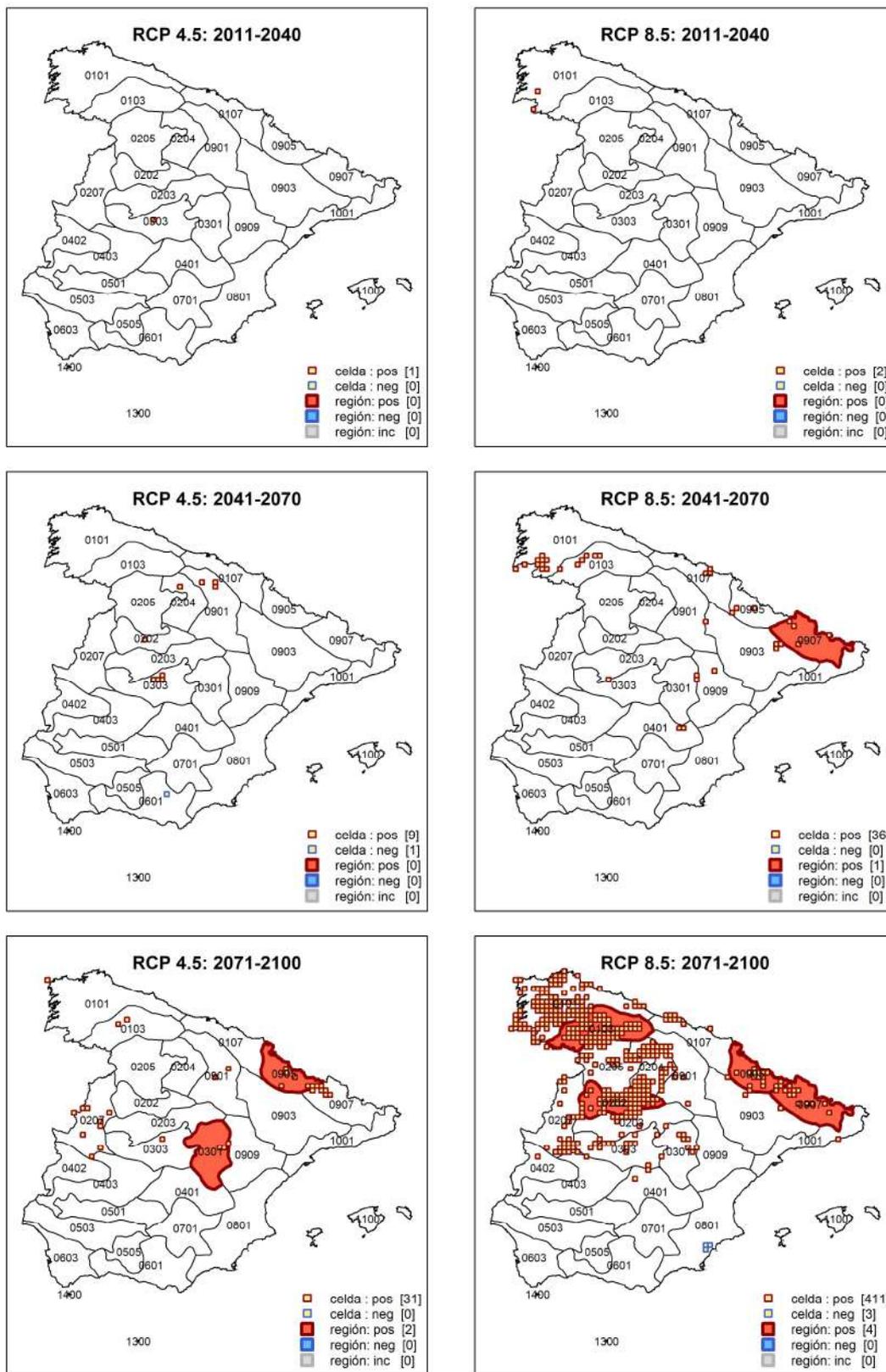


Figura 4.20. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 6 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).

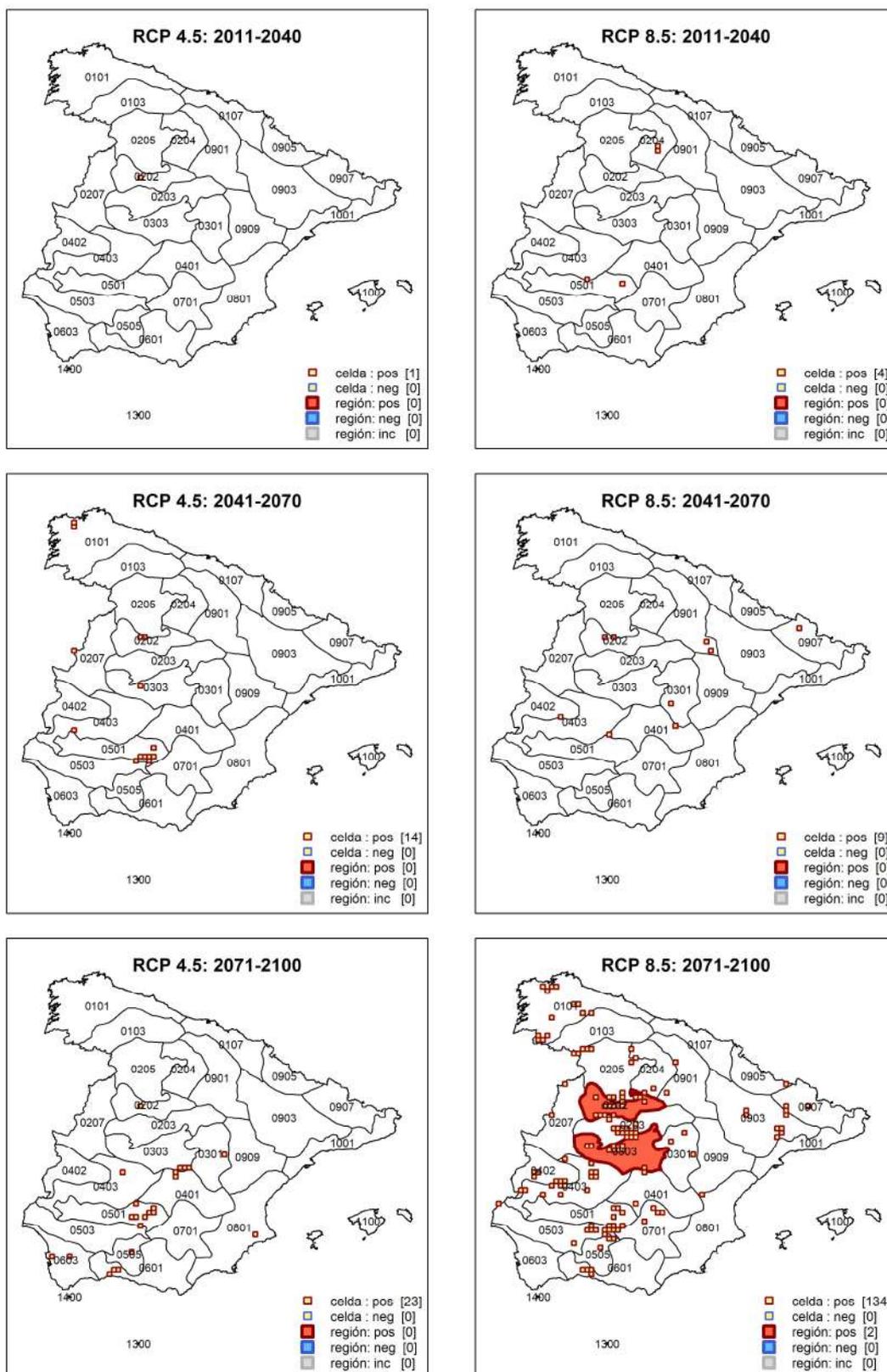


Figura 4.21. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 6 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).



Precipitación acumulada en 12 horas máxima anual

Para el análisis de la precipitación acumulada en 12 horas máxima anual se ha partido de los mismos modelos climáticos que en el caso de la precipitación acumulada en 3 y 6 horas. La identificación de celdas y regiones en las que la mayoría de modelos climáticos de estudio coincide muestra tendencias significativas positivas a nivel de celda en la mitad norte de la Península (Figura 4.22), principalmente en la zona noroccidental y para RCP 8.5. A nivel de celda, se observan cambios en la mediana significativos positivos en la mitad norte de la Península para casi todos los periodos de impacto y escenarios (a excepción de “RCP 4.5: 2011-2040”), cambios en la mediana significativos negativos en cuatro celdas en el sureste de la Península para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.23), así como cambios en la varianza significativos positivos a lo largo de la Península para casi todos los periodos de impacto y escenarios (también a excepción de “RCP 4.5: 2011-2040”) (Figura 4.24). Se identifican tres regiones (“0103”, “0901” y “0905”) con cambios en la mediana significativos positivos en la mitad norte de la Península (Figura 4.23), así como la región “0203” con cambios en la varianza significativos positivos en el centro de la Península, para “RCP 8.5: 2071-2100” (Figura 4.24).

Los resultados mostrados en esta sección respecto a la precipitación acumulada en 12 horas máxima anual, así como los presentados en las dos secciones anteriores respecto a la precipitación acumulada en 3 y 6 horas máxima anual, son, en general, consistentes con los obtenidos anteriormente para la precipitación diaria y horaria máxima anual, a pesar de la diferencia en el número de modelos climáticos empleado.

El patrón espacial de cambios es similar a los de la precipitación diaria y horaria, con incrementos en la mediana principalmente en la zona noroccidental del país (aunque para las precipitaciones acumuladas en 3, 6 y 12 horas se extienden también los cambios hacia el noreste de forma similar a como ocurría con la precipitación horaria) y cambios más intensos y generalizados para los intervalos de menor duración. Asimismo, aparece algún descenso significativo en la mediana en el sureste para los intervalos temporales de mayor duración, consistentes con los que también se detectaban en la precipitación diaria.

En cuanto a la varianza también se prevén incrementos principalmente en las zonas central y sur del país de forma consistente con lo obtenido para la precipitación diaria y horaria, aunque en el caso de las precipitaciones acumuladas en 3, 6 y 12 horas también se detectan cambios en el noreste peninsular, al igual que ocurría en el caso de la precipitación horaria.

Estos resultados coinciden en apuntar también a un posible incremento de la torrencialidad, con mayores incrementos en la precipitación para los intervalos temporales de menor duración.

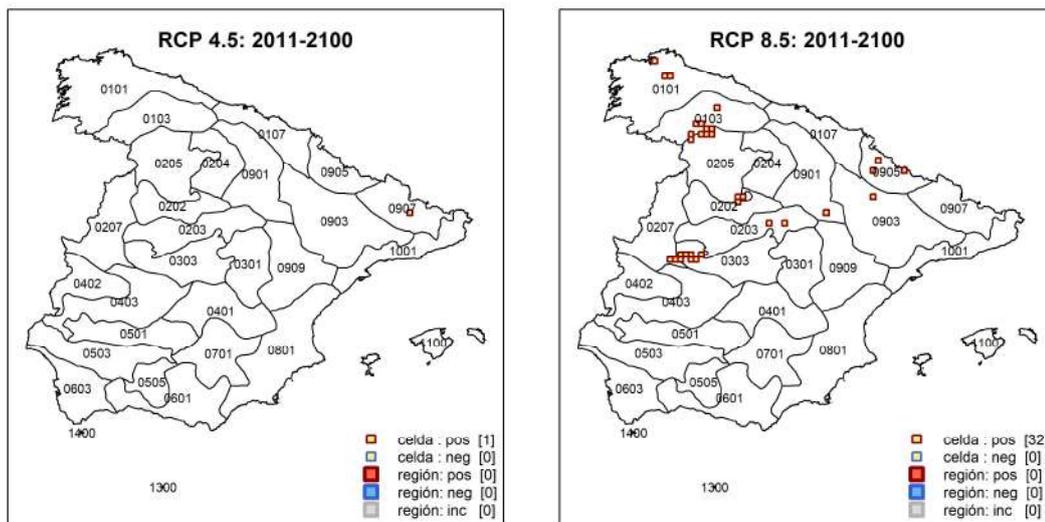


Figura 4.22. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 12 horas máxima anual. (“pos” = positiva; “neg”= negativa; “inc” = inconsistente).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

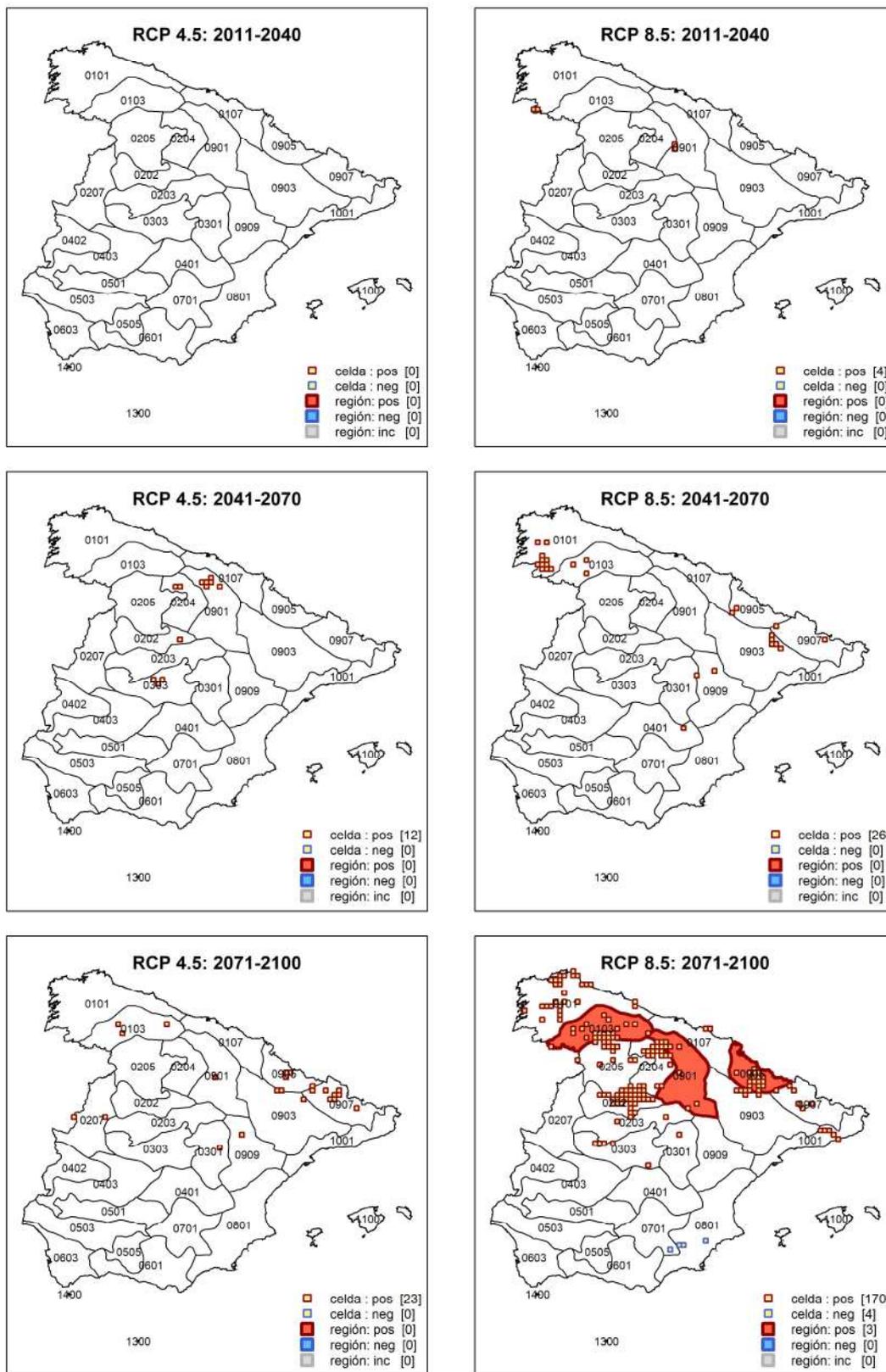


Figura 4.23. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 12 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).

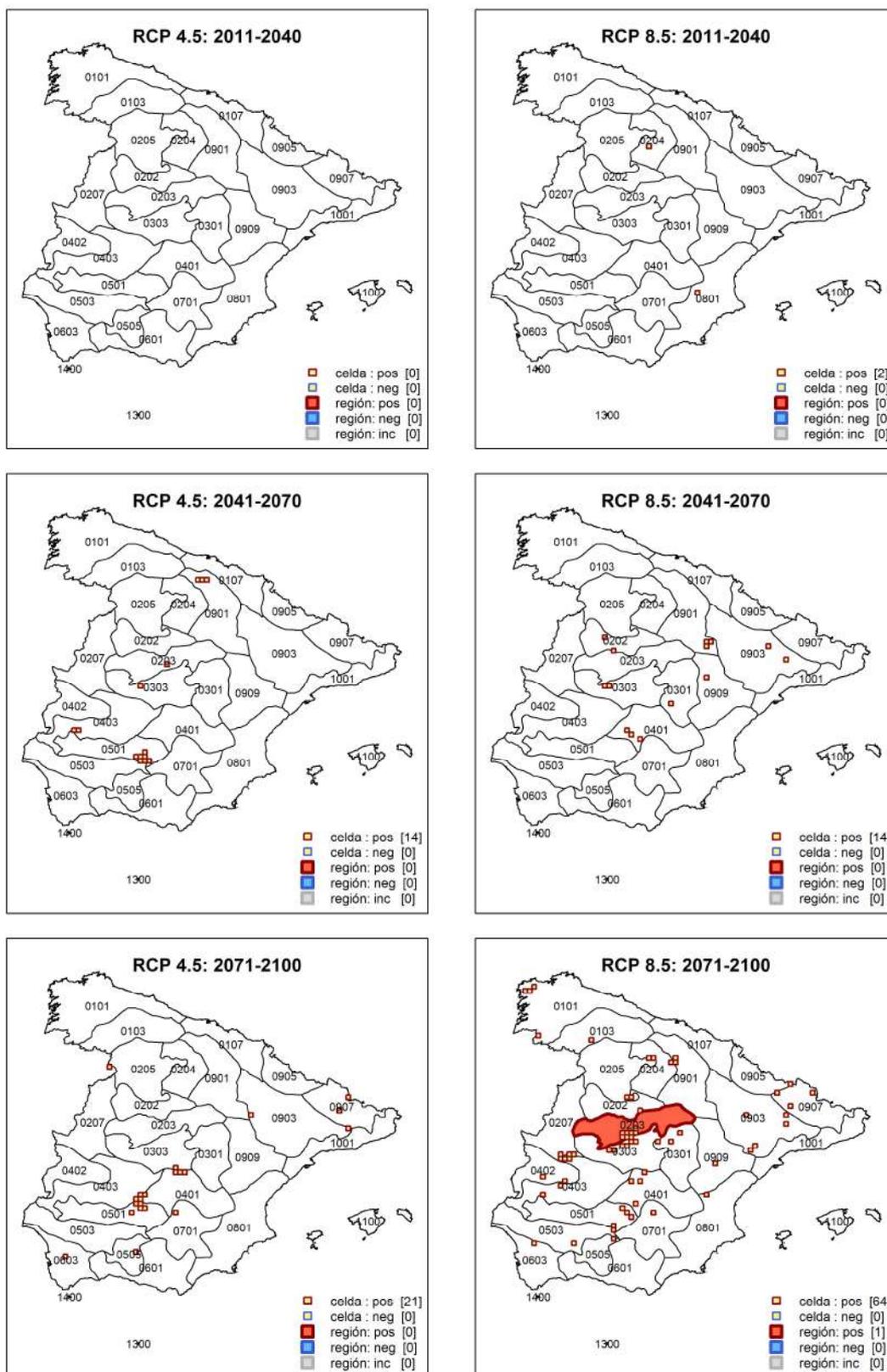


Figura 4.24. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados en la mayoría de modelos climáticos de estudio para precipitación acumulada en 12 horas máxima anual. (“pos” = positivo; “neg”= negativo; “inc” = inconsistente).



4.4. Conclusiones del análisis

El resumen del número de regiones para el que la mayoría de modelos climáticos de estudio indica tendencias, o cambios en la mediana o en la varianza significativos para las diferentes variables de estudio se muestra en la [Tabla 4.2](#).

Tabla 4.2. Número de regiones con tendencias o cambios en la mediana o en la varianza significativos para las variables de estudio. (El signo “+” indica resultados significativos positivos y el signo “-” significativos negativos).

Análisis	Escenario y periodo de impacto	Precipitación diaria máxima anual	Precipitación convectiva diaria máxima anual	Precipitación horaria máxima anual	Precipitación acumulada en 3 horas máxima anual	Precipitación acumulada en 6 horas máxima anual	Precipitación acumulada en 12 horas máxima anual
Tendencia	RCP 4.5: 2011-2100	0	0	0	0	0	0
	RCP 8.5: 2011-2100	0	0	5+	2+	0	0
Cambio en la mediana	RCP 4.5: 2011-2040	0	0	0	0	0	0
	RCP 4.5: 2041-2070	0	0	0	0	0	0
	RCP 4.5: 2071-2100	0	0	4+	1+	2+	0
	RCP 8.5: 2011-2040	0	0	0	0	0	0
	RCP 8.5: 2041-2070	0	1+	3+	0	1+	0
	RCP 8.5: 2071-2100	5+ / 1-	2+	14+	10+	4+	3+
Cambio en la varianza	RCP 4.5: 2011-2040	0	0	0	0	0	0
	RCP 4.5: 2041-2070	0	0	0	0	0	0
	RCP 4.5: 2071-2100	0	0	0	0	0	0
	RCP 8.5: 2011-2040	0	0	0	0	0	0
	RCP 8.5: 2041-2070	0	0	1+	0	0	0
	RCP 8.5: 2071-2100	0	2+	19+	4+	2+	1+

En relación al análisis de tendencias, se observa la existencia de regiones con tendencias significativas positivas asociadas a la precipitación horaria y precipitación acumulada en 3 horas máxima anual para “RCP 8.5: 2011-2100”, es decir, para las duraciones de lluvia más cortas analizadas y el escenario más pesimista; dichas regiones están localizadas en el noroeste de la Península.

En relación al análisis de cambios en la mediana, se observa un mayor número de regiones con cambios en la mediana significativos positivos que negativos. Estos cambios están asociados a precipitación horaria y precipitación acumulada en 3 y 6 horas máxima anual para “RCP 4.5: 2071-2100”, a precipitación convectiva diaria, precipitación horaria y precipitación acumulada en 6 horas máxima anual para “RCP 8.5: 2041-2070”, así como a todas las variables de estudio para “RCP 8.5: 2071-2100”. Es decir, todas las variables presentan regiones con cambios en la mediana significativos positivos para el escenario más pesimista y el último periodo de impacto. Dichas regiones están generalmente situadas en la mitad norte de la Península. A su vez, se observa una región con cambios en la mediana significativos negativos para precipitación diaria máxima anual para “RCP 8.5: 2071-2100”, es decir, para la duración de lluvia más larga analizada, el escenario más pesimista y el último periodo de impacto. Dicha región está localizada en el sureste de la Península.

En relación al análisis de cambios en la varianza, se observa la existencia de regiones con cambios en la varianza significativos positivos. Estos cambios están asociados a precipitación



horaria máxima anual para “RCP 8.5: 2041-2070”, y a la mayoría de variables (excepto a precipitación diaria máxima anual) para “RCP 8.5: 2071-2100”. Es decir, todas las variables salvo la asociada con la duración de lluvia más larga presentan regiones con cambios en la varianza significativos positivos para el escenario más pesimista y el último periodo de impacto. Dichas regiones están distribuidas a lo largo de la zona de estudio.

En particular, para “RCP 8.5: 2071-2100”, se identifican regiones con tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos positivos para precipitación horaria máxima anual, así como regiones con cambios en la mediana y en la varianza significativos positivos para precipitación convectiva diaria y precipitación acumulada en 3 y 6 horas máxima anual.

Los resultados obtenidos son, en general, consistentes entre las distintas variables analizadas a pesar de que se han empleado conjuntos de modelos climáticos diferentes para cada variable. Los resultados obtenidos para la precipitación diaria, horaria y acumulada en 3, 6 y 12 horas máxima anual proporcionan un patrón espacial de cambios similar en el que, en general, las tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos son positivos pero con una intensificación del incremento, aumentando el número de celdas y regiones que los presentan en los distintos periodos de impacto y escenarios según se reduce la duración de la precipitación, y de manera más clara para el RCP 8.5 y el último periodo de impacto. Asimismo, los cambios se intensifican para todas las variables con el escenario más pesimista y los últimos periodos de impacto. Los incrementos de mediana se ubican principalmente en la zona noroccidental, extendiéndose también hacia el noreste en el caso de los intervalos inferiores al día. Asimismo, aparecen descensos en celdas puntuales del sureste peninsular asociados a las precipitaciones de mayor duración, principalmente en el caso de la precipitación diaria para la que también se identifica descenso en una región. Los incrementos de varianza se producen para todas las variables principalmente en las regiones del centro y sur de la Península, así como en puntos de la zona nororiental en el caso de duraciones de precipitación inferiores al día. Estos resultados parecen apuntar a un mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a un incremento de la torrencialidad, en línea con la idea general de que el efecto del cambio climático es mayor en lluvias extremas asociadas con duraciones de lluvia más cortas ([Westra et al. 2014](#)).

En lo que se refiere a la precipitación convectiva diaria máxima anual, los resultados indicarían que el posible incremento de precipitación máxima en la zona de los Pirineos podría deberse en parte a una intensificación de los fenómenos de carácter convectivo típicos de las zonas montañosas. No se detectan cambios, sin embargo, en la zona del levante y sureste peninsular donde las precipitaciones máximas suelen estar asociadas a este tipo de precipitación.

No obstante, se insiste en que las variables analizadas disponen de información procedente de distintos modelos climáticos ([Tabla 4.1](#)) y que, por lo tanto, sus resultados no son estrictamente comparables y deben ser manejados con cautela.

El contraste del valor medio del número estandarizado medio de ocurrencias del máximo obtenido a través de los modelos climáticos de estudio para cada periodo de impacto y escenario con respecto al valor medio obtenido para el periodo de control muestra que los patrones estacionales futuros son muy similares a los del periodo de control en todos los casos, registrándose las mayores diferencias entre periodos de estudio, en la mayor parte de las



regiones, en los meses de otoño e invierno, principalmente en el caso de las regiones de la vertiente atlántica. Estos resultados parecen indicar que no son esperables cambios relevantes en el patrón estacional de ocurrencia de las máximas precipitaciones diarias como consecuencia del cambio climático. No obstante, en la mayor parte de las regiones de la vertiente atlántica se aprecia, en algunos casos, un ligero retraso, de uno o dos meses, en el mes en el que se registra el mayor número de eventos, correspondiente a las estaciones de otoño o invierno.

5. ESTIMACIÓN DE TASAS DE CAMBIO EN CUANTIL

5.1. Introducción

En esta sección se lleva a cabo la estimación de las tasas de cambio en cuantil medias y asociadas a los percentiles 10 y 90 (con objeto de valorar la incertidumbre asociada a las estimaciones) de las series de precipitación máxima anual procedentes de los modelos climáticos de estudio, así como la evaluación de la significancia estadística de dichas tasas de cambio medias mediante un procedimiento basado en simulaciones de Monte Carlo. El análisis se realiza principalmente para la precipitación diaria máxima anual, como variable básica en los estudios de crecidas, y se complementa con el análisis de la precipitación horaria máxima anual, para valorar los cambios en la distribución temporal de la precipitación. Asimismo, se analiza la precipitación convectiva diaria máxima anual, para conocer en qué medida los cambios en la precipitación se deben a cambios en aquellas de origen convectivo. De forma adicional, se calculan los cambios en el factor de torrencialidad (a través de la relación entre las tasas de cambio obtenidas para la precipitación diaria y horaria máxima anual), con el fin de analizar de forma más específica los posibles cambios en la estructura temporal de la precipitación y facilitar, en una primera aproximación, la estimación de las curvas IDF bajo el efecto del cambio climático. Las tasas de cambio se obtienen a partir de los cuantiles estimados para cada uno de los tres periodos de impacto para cada escenario, respecto a aquellos estimados para el periodo de control, obteniéndose mapas de tasas de cambio asociados a: “RCP 4.5: 2011-2040”, “RCP 4.5: 2041-2070”, “RCP 4.5: 2071-2100”, “RCP 8.5: 2011-2040”, “RCP 8.5: 2041-2070” y “RCP 8.5: 2071-2100”.

La estimación de cuantiles se realiza para tres periodos de retorno representativos de la ley de frecuencia: 10, 100 y 500 años. Dicha estimación se lleva a cabo mediante el ajuste de dos leyes de frecuencia: (i) la distribución SQRT-ET_{max} ajustada por momentos ordinarios y CV regional, y (ii) la distribución GEV ajustada por L-momentos de manera local. El primer modelo estadístico se ha seleccionado por ser el que se utilizó en el trabajo “Máximas Lluvias diarias en la España Peninsular” (DGC 1999), que, aunque actualmente se encuentra en revisión, constituye el estudio oficial sobre precipitaciones máximas disponible a escala nacional. El segundo modelo estadístico fue el que se utilizó en los trabajos de evaluación del impacto del cambio climático desarrollados para la revisión de la EPRI (MITECO 2018), ya que fue el empleado en el trabajo previo de la UPM del que se partió. De esta forma, la utilización de la distribución GEV permite relacionar los nuevos resultados alcanzados en este estudio con los obtenidos previamente para la revisión de la EPRI, así como evaluar la influencia del modelo estadístico sobre los resultados obtenidos respecto a las tasas de cambio.

La estimación de las tasas de cambio en cuantil se realiza en base al conocido método del delta de cambio, mediante el que se estima el cambio relativo entre un determinado cuantil para el periodo de impacto y el correspondiente cuantil para el periodo de control. Dicho cambio relativo puede aplicarse al correspondiente cuantil estimado a partir de las observaciones con la finalidad de obtener el cuantil futuro bajo el efecto del cambio climático. Los principales supuestos del método del delta de cambio se resumen a continuación (e.g., Li et al. 2015; Sunyer et al. 2015; Requena et al. 2019): el sesgo asociado al periodo de control y al periodo de impacto es



multiplicativo y estacionario y por ello se cancela al estimar el cambio relativo, y los cambios asociados a escalas espaciales mayores también caracterizan escalas espaciales más pequeñas. De este modo, en el presente estudio no se considera la corrección del sesgo para la estimación de las tasas de cambio en cuantil. Es importante destacar que existen diversos métodos de corrección del sesgo, cuya aplicación debe realizarse utilizando observaciones que presenten una escala temporal y espacial similar a la proporcionada por los modelos climáticos, y cuya aplicación sobre el periodo de impacto implica la asunción de determinadas hipótesis, conllevando incertidumbres.

La evaluación de la significancia estadística de los cambios en cuantil medios se lleva a cabo a nivel local en cada una de las celdas que forman la zona de estudio, así como a nivel regional en base al uso de las regiones climáticas. Debido a la elevada incertidumbre asociada a la estimación de los cuantiles de precipitación máxima (mayor cuanto mayor sea el periodo de retorno que se considere), resulta imprescindible analizar la significancia estadística de los cambios de tal forma que pueda discriminarse en qué casos los cambios son atribuibles a un cambio en el clima y no a la propia aleatoriedad asociada al estadístico. Esto no significa que en aquellos casos en los que el cambio no sea significativo no pueda haber modificaciones del cuantil asociadas con el cambio climático, sino que su menor entidad hace que la señal de cambio climático se pierda dentro de la propia aleatoriedad natural del estadístico, no siendo posible identificarla.

5.2. Metodología

5.2.1. Ajuste de la distribución SQRT-ET_{max}

La distribución SQRT-ET_{max} (que hace referencia a “máximo de la exponencial de la raíz cuadrada”) consta de dos parámetros: el parámetro de escala y el de forma. Su ajuste se realiza por momentos ordinarios y CV regional siguiendo la metodología establecida en Ferrer (1996), que fue la empleada para la elaboración del estudio “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular”. En el presente estudio, a este modelo estadístico se le denomina “SQRT-R” debido a su enfoque regional.

El CV regional se obtiene en cada región de la zona de estudio como media ponderada de los CV estimados en las celdas de la región. La ponderación se realiza en base al número de datos en cada celda, que en este caso es el mismo debido al uso de series extraídas de simulaciones procedentes de modelos climáticos y no de observaciones. El parámetro de forma regional se estima a través del CV regional, a partir del cual a su vez se obtiene el parámetro de escala regional considerando la media regional igual a uno. La estimación de ambos parámetros requiere el uso de aproximaciones polinómicas para cuya aplicación se requiere que el CV regional se encuentre en el rango [0.25, 0.90] (Ferrer 1996). Una vez obtenidos los dos parámetros regionales, los cuantiles regionales (adimensionales para la región) se obtienen mediante un proceso iterativo (Ferrer 1996) para cuyo criterio de parada se utiliza una tolerancia de 10^{-5} . La estimación de cuantiles en cada celda se lleva a cabo multiplicando los cuantiles regionales por la media de la serie de máximos anuales en cada una.

5.2.2. Ajuste de la distribución GEV

La distribución de valores extremos generalizada, denominada GEV por sus siglas en inglés (“*Generalized Extreme Value distribution*”), consta de tres parámetros: el parámetro de localización, el de escala y el de forma. Su ajuste se realiza por L-momentos (Hosking y Wallis 1997) de manera local. En el presente estudio, a este modelo estadístico se le denomina “GEV-L” debido a su enfoque local, es decir, su ajuste se lleva a cabo utilizando únicamente las series máximas anuales disponibles en la celda. La distribución GEV incluye tres familias de distribuciones de valores extremos según el valor del parámetro de forma: la tipo I (o Gumbel), la tipo II (o Fréchet) y la tipo III (o Weibull). La distribución de valores extremos de tipo I tiene asociada un parámetro de forma igual a cero. La expresión de la distribución GEV utilizada en el presente análisis (Hosking 2019) asocia valores negativos del parámetro de forma a la distribución de valores extremos de tipo II y valores positivos a la de tipo III.

Mencionar que la adecuada estimación del parámetro de forma, y por lo tanto de los cuantiles de mayor periodo de retorno, requiere el uso de una longitud de datos relativamente larga, mientras que las series máximas anuales utilizadas en el presente estudio tienen longitudes de datos de 29 o 30 años. En cualquier caso, una longitud de serie de 30 datos es representativa de lo habitualmente disponible en la práctica. No obstante, el objetivo del presente análisis no es la estimación del cuantil de manera precisa, sino la estimación de la tasa de cambio asociada y la evaluación de su significancia estadística. Los cuantiles de mayor periodo de retorno tendrán asociada una mayor incertidumbre que los de menor periodo de retorno, siendo esto más marcado en el ajuste local para el que serán de esperar cambios más importantes. Ello se tiene en cuenta en la metodología asociada a la evaluación de la significancia estadística de las tasas de cambio (sección 5.2.4). Dicha metodología está basada en la estimación de intervalos de confianza para los cuantiles en el periodo de control mediante simulaciones de Monte Carlo, siendo los intervalos de confianza mayores a mayor periodo de retorno, así como mayores en el ajuste local que en el regional.

5.2.3. Estimación de las tasas de cambio en cuantil

Las tasas de cambio en cuantil en una celda (C en %) se obtienen a través de la relación entre el cuantil estimado para cada periodo de impacto y escenario y el cuantil estimado en el periodo de control (a partir de un determinado modelo climático), en base a la siguiente ecuación:

$$C [\%] = \frac{(x_T^{\text{fut}} - x_T^{\text{con}})}{x_T^{\text{con}}} 100, \quad (5.1)$$

siendo x_T^{con} el cuantil asociado al periodo de retorno T estimado en la celda para el periodo de control y x_T^{fut} el cuantil futuro asociado al periodo de retorno T estimado en la celda para un determinado periodo de impacto y escenario.

La estimación de cuantiles se realiza de manera separada para cada modelo climático, a través de los dos modelos estadísticos SQRT-R y GEV-L. Los mapas de tasas de cambio medias para



cada modelo estadístico se obtienen como media de las tasas de cambio asociadas al conjunto de modelos climáticos para cada periodo de impacto y escenario en cada celda. Además de la media, también se estiman los valores asociados a los percentiles 10 y 90 con el objetivo de caracterizar la variabilidad de las tasas de cambio en el conjunto de modelos climáticos, lo que constituye una medida de su incertidumbre asociada. Estos percentiles representan valores posibles de las tasas de cambio en cuantil, pero menos probables. Los valores asociados al mínimo y al máximo no se obtienen por ser valores extremos muy influenciados por la selección de modelos climáticos utilizada.

5.2.4. Análisis de la significancia de las tasas de cambio en cuantil

La significancia estadística de las tasas de cambio en cuantil requiere ser evaluada para poder identificar si dichos cambios están asociados a la existencia de una nueva población estadística con una ley de frecuencia diferente en el futuro, y no al azar. Es decir, para determinar si los cambios están asociados al efecto del cambio climático, y no a la variabilidad natural del clima que conlleva una determinada incertidumbre en la estimación de los estadísticos de la población y, en concreto, del cuantil de un determinado periodo de retorno. La evaluación de la significancia estadística de los cambios en cuantil en cada celda se lleva a cabo a través de la estimación de los intervalos de confianza asociados a los cuantiles del periodo de control, mediante la realización de simulaciones de Monte Carlo, y de su posterior comparación con los cuantiles para los periodos de impacto y escenarios, siguiendo la metodología propuesta por el CEDEX y que ya fue empleada en [MITECO \(2018\)](#). De este modo, el cambio asociado a aquellos cuantiles que para un periodo de impacto y escenario estén fuera de los intervalos de confianza de los cuantiles para el periodo de control, para un determinado nivel de significancia seleccionado, puede considerarse significativo.

El número de simulaciones de Monte Carlo a ejecutar (M) se ha establecido en 4500, como balance entre la gran demanda computacional asociada a la estimación de resultados para todos los casos analizados y el uso de un número suficiente de simulaciones para obtener resultados aceptablemente robustos. Mencionar que la obtención de resultados idénticos al repetir el proceso que se detalla a continuación es complicada debido a la generación de series sintéticas en base a un proceso aleatorio para el que se utiliza una longitud de datos relativamente corta (i.e., 30 años, que es la longitud de datos asociada al periodo de control).

El proceso se detalla a continuación para cada uno de los dos modelos estadísticos (SQRT-R y GEV-L), considerando su aplicación para un determinado modelo climático en una determinada celda objetivo:

- 1) Generación de M series sintéticas de tamaño igual a la longitud de datos en el periodo de control ($n = 30$ años), a partir de la ley de frecuencia ajustada en el periodo de control:
 - a) En el caso del modelo GEV-L: Generación de M series sintéticas de tamaño n a partir del ajuste de la GEV de manera local en el periodo de control en la celda objetivo.
 - b) En el caso del modelo SQRT-R:

- (i) Generación de M series sintéticas de tamaño n en cada celda localizada en la región de la celda objetivo, a partir del valor del CV regional de dicha región y de la media local de cada celda en el periodo de control.
 - (ii) Generación de M regiones sintéticas para la región de la celda objetivo mediante las M series sintéticas generadas en las celdas de la región, y estimación de los M CV regionales asociados.
- 2) Ajuste de la ley de frecuencia para cada una de las M series (o regiones) sintéticas, obteniendo M estimaciones de los cuantiles asociados a los periodos de retorno de estudio en la celda objetivo:
- a) En el caso del modelo GEV-L: Ajuste de la GEV de manera local para las M series sintéticas con el fin de obtener M cuantiles para cada periodo de retorno en la celda objetivo.
 - b) En el caso del modelo SQRT-R:
 - (i) Ajuste del modelo SQRT-R en las M regiones sintéticas a través de los M CV regionales previamente estimados, con el fin de obtener M cuantiles regionales para cada periodo de retorno en la región de la celda objetivo.
 - (ii) Estimación de M cuantiles para cada periodo de retorno en la celda objetivo mediante la multiplicación de los M cuantiles regionales generados para cada periodo de retorno por las M medias de las series sintéticas generadas en la celda objetivo en el paso (1.b.i).
- 3) Estimación del intervalo de confianza correspondiente a un determinado nivel de significancia (α) para cada cuantil del periodo de control en la celda objetivo:

El límite inferior y superior del intervalo de confianza se obtiene a través de la ordenación de menor a mayor de las M estimaciones de cada cuantil. El intervalo de confianza es un intervalo abierto, y como tal no incluye los valores asociados al propio límite inferior y superior. Por ejemplo, para $M = 4500$ el límite inferior del intervalo de confianza del 90% (asociado a $\alpha = 0.10 = 10\%$) corresponde con el valor del cuantil ubicado en la posición 225 (i.e., el valor del cuantil para el que hay $M \alpha/2 = 225$ cuantiles sintéticos menores o iguales que dicho valor), y el límite superior corresponde con el valor del cuantil ubicado en la posición $4275 + 1$ (i.e., el valor del cuantil para el que hay $M \alpha/2 = 225$ cuantiles sintéticos mayores o iguales que dicho valor). Si el valor $M \alpha/2$ da lugar a decimales, los valores de cuantil asociados a los límites del intervalo se obtienen mediante interpolación.

- 4) Evaluación de la significancia del cambio en cuantil mediante la comparación del cuantil para un determinado periodo de impacto y escenario con respecto al intervalo de confianza estimado para el cuantil del periodo de control en la celda objetivo:

Si el cuantil para el periodo de impacto y escenario está fuera del intervalo de confianza del cuantil en el periodo de control (i.e., si es menor o igual al límite inferior,



o mayor o igual al límite superior), el cambio en cuantil puede considerarse significativo para el nivel de significancia asociado. Esta evaluación se realiza para los siguientes niveles de significancia:

- a) En el caso del modelo GEV-L: la evaluación de la significancia se realiza para $\alpha = 0.10$ y 0.33 . El primer nivel de significancia indica con rigor si los cambios son estadísticamente significativos, siendo 0.10 un nivel de significancia utilizado habitualmente en la aplicación práctica de los test estadísticos (0.10 a dos lados, 0.05 a un lado). La estimación de resultados adicionales para $\alpha = 0.33$ es necesaria con objeto de relacionar los resultados de este estudio con los obtenidos para la revisión de la EPRI, debido a que dicho valor fue el nivel de significancia utilizado en [MITECO \(2018\)](#). El motivo por el que se utilizó ese valor en dicho estudio, en lugar de un valor más bajo más propio de un test estadístico, es, como se pondrá de manifiesto más adelante, la gran incertidumbre asociada a la estimación de cuantiles para altos periodos de retorno mediante el ajuste de la distribución GEV de manera local, que da lugar a la identificación de un número reducido de celdas con cambios en cuantil significativos al aplicar el test con carácter estrictamente estadístico (i.e., para $\alpha = 0.10$), no permitiendo la caracterización espacial de los cambios. De esta forma, con objeto de identificar aquellas celdas con un mayor impacto del cambio climático que permitiese tener en cuenta este fenómeno en los PGRI de una manera conservadora, se adoptó un valor más alto para el nivel de significancia de tal manera que el intervalo de confianza correspondiera aproximadamente a más/menos una desviación típica (i.e., $\alpha \approx 0.33$, [MITECO 2018](#)).
 - b) En el caso del modelo SQRT-R: la evaluación de la significancia se realiza únicamente para $\alpha = 0.10$, ya que este modelo estadístico no presenta los problemas asociados al modelo GEV-L.
- 5) Cálculo de los p-valores asociados a la evaluación de la significancia del cambio en cuantil a nivel de celda para su posterior uso en la evaluación de la significancia a nivel de región:

El p-valor asociado a la evaluación del cambio en cuantil positivo en una celda se obtiene como el número de cuantiles sintéticos mayores o iguales que el cuantil para un determinado periodo de impacto y escenario dividido entre el número de cuantiles sintéticos (i.e., dividido entre M). De forma análoga, el p-valor asociado a la evaluación del cambio en cuantil negativo en una celda se obtiene como el número de cuantiles sintéticos menores o iguales que el cuantil para el periodo de impacto y escenario, dividido entre M . En la práctica, la estimación de estos p-valores requiere interpolación debido a que el número de cuantiles sintéticos generados es limitado. La interpolación se realiza en base a los p-valores estimados para los cuantiles sintéticos situados por encima y por debajo del cuantil para el periodo de impacto y escenario. Mencionar que la significancia del cambio en cuantil a nivel de celda estimada a través de los pasos (3 a 4) puede evaluarse de forma alternativa directamente a través del p-valor, considerándose el cambio significativo positivo (o

significativo negativo) a nivel de celda si el p-valor correspondiente es menor o igual que $\alpha/2$.

Este proceso se repite para cada modelo climático en cada celda, de modo que se identifican aquellas celdas para las que la mayoría de modelos climáticos indican una tasa de cambio en cuantil significativa positiva, o negativa, en base al nivel de significancia evaluado. Esto se realiza para cada uno de los dos modelos estadísticos.

La evaluación de la significancia del cambio en cuantil a nivel de región se lleva a cabo mediante el método de la tasa de falso descubrimiento presentado en la [sección 4.2.4](#) (en este caso, siendo “ H_0 local: no hay cambio en cuantil”). El método permite identificar si los cambios en cuantil positivos o negativos en las celdas pueden ser considerados significativos a nivel de región, por lo que se aplica de manera separada sobre los p-valores asociados a la evaluación de cambios en cuantil positivos, o negativos, previamente estimados en el paso (5). Para su aplicación se considera un nivel de significancia regional a cada lado igual a $\alpha/2$ (i.e., igual al nivel de significancia a nivel de celda a dos lados dividido entre dos), siendo $\alpha = 10\%$. El proceso se repite para cada modelo climático en cada región, de modo que se identifican aquellas regiones para las que la mayoría de modelos climáticos indican una tasa de cambio en cuantil significativa positiva, o negativa. La evaluación de la significancia a nivel regional se realiza únicamente para el modelo SQRT-R, ya que el modelo GEV-L tiene carácter local y las regiones climáticas no caracterizan su comportamiento.

5.2.5. Análisis de los cambios en el factor de torrencialidad

El análisis de los cambios en el factor de torrencialidad (relación entre la intensidad de precipitación horaria y diaria) se lleva a cabo mediante el cálculo del cambio relativo en el factor de torrencialidad (F en %) en aquellas celdas que presentan cambios en cuantil significativos para la precipitación diaria máxima anual y para la precipitación horaria máxima anual, así como para sólo una de las dos variables. Dicho cálculo se realiza en base a la siguiente ecuación:

$$F [\%] = \left(\frac{\left(\frac{\overline{C}_h [\%]}{100} + 1 \right)}{\left(\frac{\overline{C}_d [\%]}{100} + 1 \right)} - 1 \right) 100, \quad (5.2)$$

siendo $\overline{C}_h [\%]$ la tasa de cambio en cuantil media obtenida para la precipitación horaria máxima anual en una determinada celda, para un determinado periodo de retorno, periodo de impacto y escenario, y $\overline{C}_d [\%]$ la tasa de cambio en cuantil media para la precipitación diaria máxima anual en esa celda, para ese periodo de retorno, periodo de impacto y escenario.

Una mayor tasa de cambio en cuantil media para la precipitación horaria máxima anual indica un cambio en el factor de torrencialidad positivo (i.e., $F [\%] > 0\%$, con $\overline{C}_h [\%] > \overline{C}_d [\%]$), mientras que una mayor tasa de cambio en cuantil media para la precipitación diaria máxima anual indica un cambio en el factor de torrencialidad negativo (i.e., $F [\%] < 0\%$, con $\overline{C}_h [\%] < \overline{C}_d [\%]$), siendo



el cambio en el factor de torrencialidad igual a cero si ambas tasas presentan el mismo valor (i.e., $F [\%] = 0\%$, con $\overline{C_h}[\%] = \overline{C_d}[\%]$).

Como resultado se proporcionan los promedios de los cambios por región climática. Esta información puede permitir disponer de una primera aproximación a los posibles cambios en la estructura temporal de la precipitación y las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) bajo el efecto del cambio climático. La estimación de la posible modificación del factor de torrencialidad, junto con la de los cuantiles de precipitación diaria máxima anual (a través de las tasas de cambio en cuantil expuestas anteriormente), permitiría disponer de una primera aproximación a la posibles curvas IDF futuras si se adopta la expresión matemática para dichas curvas incluida en la Norma 5.2 - IC de Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras (MF 2016), y se asume que dicha forma funcional seguiría siendo válida en el futuro.

5.2.6. Transformación de las tasas de cambio de rejilla rotada a rejilla regular

Los mapas de tasas de cambio en cuantil medias, y asociadas a los percentiles 10 y 90, obtenidas para las variables de estudio en la rejilla rotada (latitud-longitud) nativa, se transforman a rejilla regular (latitud-longitud) mediante el método “*patch recovery*”. Esta transformación, también denominada interpolación, “*remapping*” o “*regridding*”, es necesaria para facilitar su uso en la práctica. Por ejemplo, los mapas de cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada sobre los que se deben aplicar las tasas de cambio en cuantil medias significativas están disponibles en rejilla regular (DGC 1999).

El mapa de tasas de cambio medias significativas en rejilla regular se obtiene en base al mapa de tasas de cambio medias en dicha rejilla, mediante la identificación de las celdas en rejilla regular más cercanas a las celdas con cambios en cuantil significativos en rejilla rotada. Este procedimiento es necesario para una adecuada estimación del valor y localización de las tasas de cambio medias significativas en rejilla regular. Debido a la diferente disposición y número de celdas pertenecientes a la rejilla rotada y a la rejilla regular, la correspondencia no es uno a uno, y determinadas celdas con cambios en cuantil significativos que se encuentren próximas a los bordes de la zona de estudio en rejilla rotada pueden estar asignadas a celdas que se encuentren fuera de la zona de estudio en rejilla regular (i.e., masas de agua o países limítrofes).

El método “*patch recovery*” (Gu et al. 2004; ESMF 2012) se usa habitualmente en el análisis de elementos finitos, y suele producir mejores aproximaciones de valores y derivadas que la conocida interpolación bilineal. En la interpolación bilineal, cada punto de la malla de destino es asignado a una ubicación en la malla de origen, de manera que su posición relativa a los puntos de la malla de origen que lo rodean se usa para calcular los pesos de la interpolación. En el caso del método “*patch recovery*”, la interpolación se realiza mediante la construcción de múltiples parches polinomiales para representar los datos en el elemento de origen, que en este caso, debido al uso de cuadrículas de dos dimensiones, consisten en polinomios de segundo grado de dos variables. Para un determinado punto de destino, el método “*patch recovery*” identifica el elemento de origen que contiene dicho punto de destino, y construye un parche polinomial para cada nodo de esquina que constituye dicho elemento (i.e., cuatro parches). Cada parche para cada nodo de esquina se construye en base a los elementos situados alrededor de dicho nodo, de forma que los pesos de este tipo de interpolación no solo dependen de los nodos del elemento



en el que se encuentra el punto de destino, sino también de los nodos de los elementos que lo rodean. El conjunto de coeficientes que da lugar al mejor ajuste del polinomio con respecto a los datos de dichos elementos se estima a través de un algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados, obteniéndose un valor en el punto de destino que se ajusta a los datos de origen de los elementos que rodean el nodo de esquina. El proceso se repite para cada nodo de esquina, de forma que el valor final en el punto de destino es la media ponderada de los valores obtenidos por los cuatro parches polinomiales en dicho punto. La ponderación se realiza en base al peso bilineal del punto de destino con respecto a cada esquina.

La aplicación del método “*patch recovery*” se lleva a cabo mediante el algoritmo “*Patch*” de ESMF (“*Earth System Modeling Framework*”; ESMF 2012), consistiendo éste último en un conjunto de herramientas para el modelado de aplicaciones relacionadas con las ciencias de la tierra, que puede ejecutarse a través del programa NCL (“*NCAR Command Language*”; NCL 2017, 2018). El uso del programa NCL requiere su instalación en un sistema operativo basado en UNIX (Linux, MacOSX o Cygwin/X). En el presente estudio, el programa NCL se ha instalado en una máquina virtual (*Oracle Virtual Machine VirtualBox*) con sistema operativo Ubuntu. La aplicación del método se compone de dos etapas. En la primera etapa se genera la matriz de pesos para llevar a cabo la interpolación, mediante la cual se establece la manera en la que cada punto de la rejilla nativa contribuye a los puntos que forman la rejilla final. En la segunda etapa se procede a la multiplicación de los valores de la rejilla nativa por la matriz de pesos para producir los valores en la rejilla final. El algoritmo “*Patch*” de ESMF es utilizado por NA-CORDEX, la rama norteamericana del proyecto CORDEX, para transformar las rejillas nativas de los modelos climáticos a una rejilla regular (latitud-longitud) común (<https://na-cordex.org/dataset-description.html#facets>); contactando con ellos pueden obtenerse funciones base para su implantación.

5.3. Resultados y discusión

Antes de presentar los resultados para las variables de estudio consideradas, es importante recordar que el ajuste del modelo SQRT-R presenta problemas si el valor del CV regional está fuera del rango de aplicación de la metodología establecida en Ferrer (1996). En una determinada región, esto puede ocurrir tanto en la estimación inicial del CV regional para un determinado modelo climático y periodo de estudio, como durante la estimación de los CV regionales sintéticos en base a simulaciones de Monte Carlo para el periodo de control.

La estimación preliminar de los CV regionales asociados a las variables de estudio reveló la existencia de un elevado número de casos en los que las regiones asociadas con las Islas Baleares, Ceuta y Melilla presentaban valores del CV regional mayores al límite superior del rango de aplicación de la metodología mencionada. El análisis detallado de dichos casos identificó al modelo climático “3_ MOH-RAC” como el modelo asociado con los casos existentes en las Islas Baleares, y a diversos modelos climáticos con los de Ceuta y Melilla. No obstante, se recuerda que el trabajo “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” mediante el que se estimaron lluvias máximas en base a una distribución SQRT-ET_{max} ajustada de forma regional sólo se llevó a cabo en la España Peninsular (DGC 1999), por lo que no se dispone de resultados



en los territorios de las Islas Baleares, Ceuta y Melilla, lo que representa una dificultad adicional para la aplicación práctica de las tasas de cambio obtenidas mediante ese modelo estadístico.

Con la motivación de proporcionar resultados en la mayor parte posible del territorio español, usando el mayor número posible de modelos climáticos, el ajuste del modelo SQRT-R se lleva a cabo en base a aquellos modelos climáticos cuyo CV regional se encuentra dentro del rango de aplicación para todas las regiones de la Península y Baleares. A estos modelos climáticos se les denomina “modelos climáticos comunes”, ya que pueden emplearse tanto en el ajuste del modelo SQRT-R como en el ajuste del modelo GEV-L, permitiendo la comparación de sus resultados.

La identificación de modelos climáticos comunes se lleva a cabo de forma independiente para cada variable de estudio. Dado que para las variables relativas a la precipitación máxima en intervalos temporales inferiores al día el número de modelos climáticos para los que es posible realizar el cálculo con el modelo SQRT-R se reduce muy considerablemente, se ha decidido centrar los análisis en la precipitación diaria máxima anual, variable de referencia en los estudios de crecidas; la precipitación horaria máxima anual, como variable representativa del comportamiento de la precipitación en intervalos de corta duración; y la precipitación convectiva diaria máxima anual.

El resumen del número de modelos climáticos de estudio, del número de modelos climáticos comunes, y del correspondiente número de modelos climáticos necesarios para alcanzar mayoría con el fin de identificar celdas/regiones con tasas de cambio en cuantil medias significativas positivas o negativas se muestra en la [Tabla 5.1](#). Al igual que ocurría al llevar a cabo el análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza, el conjunto de modelos climáticos utilizado difiere para cada variable por lo que los resultados obtenidos para cada una de ellas no serán estrictamente comparables. De esta forma, el estudio se ha centrado en cuantificar y analizar con un mayor detalle la precipitación diaria máxima anual, complementando sus resultados con los obtenidos de forma cualitativa para la precipitación horaria máxima anual y la precipitación convectiva diaria máxima anual.

De forma adicional, se ha llevado a cabo el análisis de los cambios en el factor de torrencialidad, para lo que ha sido necesario utilizar las tasas de cambio en cuantil obtenidas para la precipitación diaria y horaria máxima anual en base al uso de los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables (i.e., modelos “1_ICH-CCL”, “4_CNR-CCL”, “6_MOH-CCL” y “13_ICH-HIRH”; ver [Tabla 5.1](#)), siendo por lo tanto en este caso tres el número de modelos climáticos necesarios para alcanzar mayoría para la identificación de tasas de cambio en cuantil medias significativas. Puesto que el número de modelos climáticos disponible para realizar este análisis es reducido y difiere del conjunto de modelos utilizado para analizar las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual, no se ha considerado adecuado proporcionar resultados locales a nivel de celda. En su lugar, se ha optado por obtener los valores promedio para las distintas regiones climáticas consideradas.

Asimismo, los modelos climáticos utilizados en esta sección difieren de los empleados anteriormente para cada variable para el análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza. Se ha comprobado que los cambios y tendencias que se obtienen para la precipitación diaria máxima anual con los 11 modelos climáticos utilizados aquí, en lugar de los 15 empleados en la [sección 4](#), son similares a los presentados en dicha sección. En consecuencia, los

resultados alcanzados en esta sección, en relación a las tasas de cambio en cuantil, son coherentes con los de la [sección 4](#).

Tabla 5.1. Número de modelos climáticos de estudio y comunes disponibles para las variables de estudio consideradas, así como mayoría necesaria para la estimación de tasas de cambio en cuantil medias significativas positivas o negativas.

Variable de estudio	Nº de modelos climáticos de estudio	Modelos climáticos con problemas en el ajuste SQRT-R en la Península o Baleares	Modelos climáticos comunes para la Península y Baleares		
			Modelos climáticos	Nº de modelos climáticos	Nº de modelos climáticos para mayoría
Precipitación diaria máxima anual	15	#2, #3, #7, #12	#1, #4, #5, #6, #8, #9, #10, #11, #13, #14, #15	11	6
Precipitación convectiva diaria máxima anual	14	#5, #7, #8, #11	#1, #3, #4, #6, #9, #10, #12, #13, #14, #15	10	6
Precipitación horaria máxima anual	12	#3, #5, #8, #9, #10, #11, #12	#1, #2, #4, #6, #13	5	3

Precipitación diaria máxima anual

Ajuste de las distribuciones

El CV regional para precipitación diaria máxima anual, considerando los resultados de todos los modelos climáticos para todos los periodos analizados ([Tabla 5.2](#)), se encuentra en el rango (0.24, 1.35) para toda la zona de estudio, así como para la Península y Baleares, y en el rango (0.24, 0.79) para la Península. Las regiones que presentan un menor CV regional están situadas en la mitad norte (regiones “0103”, “0202”, “0204”, “0301” y “0905”), mientras que las que presentan un mayor CV regional están asociadas con las Islas Baleares, Ceuta y Melilla (regiones “1100”, “1400” y “1300”) ([Tabla 5.2](#)). Si sólo se considera la Península, las regiones con mayor CV regional están ubicadas en el sur y en la costa mediterránea (regiones “0505”, “0601”, “0801” y “1001”).

El ajuste del modelo SQRT-R sobre las series de precipitación diaria máxima anual en la Península y Baleares para los modelos climáticos comunes se presenta en la [Tabla 5.3](#). Los resultados correspondientes asociados al ajuste del modelo GEV-L se muestran en la [Tabla 5.4](#). En general, la media de los cuantiles estimados en las celdas mediante el modelo GEV-L es mayor que la media de los cuantiles estimados mediante el modelo SQRT-R, especialmente a medida que aumenta el periodo de retorno, pudiendo darse valores menores pero similares para $T = 10$ años. Dicha media aumenta con el periodo de impacto y, en la mayoría de los casos, es mayor en el escenario RCP 8.5 que en el RCP 4.5. Mencionar que la amplitud del rango del parámetro de forma del modelo GEV-L (-0.85, 0.69) se debe al uso de un ajuste local; dicho rango se reduciría usando un ajuste regional.



CEDEX

Tabla 5.2. CV regional para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos de estudio para los distintos periodos analizados. (En color se identifican los valores mínimos y máximos del CV regional considerando toda la zona de estudio, la Península y Baleares, o solo la Península; * las regiones "1100", "1300" y "1400" corresponden con las Islas Baleares, Melilla y Ceuta, respectivamente).

Región	RCP 4.5: 2011-2040		RCP 4.5: 2041-2070		RCP 4.5: 2071-2100		RCP 8.5: 2011-2040		RCP 8.5: 2041-2070		RCP 8.5: 2071-2100		Periodo de control		
	mín	máx													
1.	0101	0.30	0.34	0.30	0.45	0.29	0.41	0.30	0.44	0.28	0.40	0.31	0.51	0.28	0.39
2.	0103	0.28	0.36	0.27	0.39	0.26	0.38	0.27	0.38	0.28	0.38	0.29	0.42	0.26	0.39
3.	0107	0.31	0.40	0.28	0.38	0.31	0.43	0.30	0.38	0.32	0.45	0.31	0.47	0.28	0.42
4.	0202	0.28	0.46	0.30	0.53	0.29	0.47	0.31	0.43	0.31	0.56	0.35	0.51	0.24	0.42
5.	0203	0.30	0.48	0.31	0.51	0.30	0.44	0.32	0.40	0.29	0.45	0.33	0.53	0.29	0.47
6.	0204	0.25	0.46	0.28	0.45	0.29	0.42	0.28	0.42	0.29	0.44	0.32	0.48	0.25	0.42
7.	0205	0.28	0.45	0.28	0.48	0.32	0.47	0.30	0.45	0.28	0.49	0.34	0.51	0.29	0.46
8.	0207	0.32	0.44	0.30	0.59	0.29	0.45	0.30	0.40	0.31	0.51	0.34	0.46	0.32	0.48
9.	0301	0.29	0.45	0.29	0.45	0.26	0.55	0.30	0.42	0.30	0.46	0.33	0.49	0.25	0.40
10.	0303	0.33	0.48	0.29	0.54	0.34	0.47	0.32	0.48	0.28	0.51	0.35	0.53	0.31	0.48
11.	0401	0.34	0.48	0.35	0.49	0.32	0.57	0.33	0.51	0.37	0.64	0.32	0.58	0.30	0.46
12.	0402	0.34	0.59	0.34	0.65	0.37	0.48	0.32	0.51	0.33	0.60	0.34	0.54	0.29	0.48
13.	0403	0.32	0.48	0.32	0.51	0.33	0.50	0.33	0.43	0.34	0.51	0.30	0.64	0.28	0.44
14.	0501	0.29	0.48	0.32	0.49	0.36	0.61	0.33	0.48	0.31	0.45	0.31	0.64	0.32	0.45
15.	0503	0.30	0.50	0.34	0.62	0.37	0.60	0.30	0.46	0.34	0.56	0.35	0.74	0.32	0.51
16.	0505	0.36	0.47	0.34	0.62	0.36	0.54	0.35	0.46	0.33	0.57	0.37	0.79	0.27	0.49
17.	0601	0.37	0.55	0.38	0.57	0.40	0.63	0.38	0.57	0.43	0.70	0.41	0.77	0.36	0.55
18.	0603	0.34	0.50	0.37	0.54	0.35	0.60	0.35	0.50	0.34	0.63	0.34	0.59	0.31	0.54
19.	0701	0.33	0.51	0.32	0.51	0.34	0.62	0.34	0.54	0.36	0.55	0.34	0.63	0.34	0.47
20.	0801	0.46	0.64	0.49	0.76	0.50	0.68	0.44	0.66	0.47	0.65	0.46	0.73	0.42	0.64
21.	0901	0.31	0.48	0.30	0.41	0.29	0.41	0.30	0.39	0.34	0.44	0.34	0.47	0.26	0.45
22.	0903	0.39	0.56	0.34	0.57	0.36	0.53	0.35	0.53	0.41	0.62	0.37	0.74	0.37	0.55
23.	0905	0.26	0.40	0.26	0.43	0.29	0.39	0.28	0.40	0.27	0.44	0.28	0.45	0.26	0.37
24.	0907	0.28	0.44	0.30	0.47	0.32	0.46	0.29	0.46	0.35	0.53	0.34	0.52	0.29	0.44
25.	0909	0.38	0.57	0.34	0.56	0.29	0.51	0.33	0.50	0.38	0.54	0.34	0.56	0.29	0.49
26.	1001	0.41	0.64	0.43	0.64	0.39	0.70	0.39	0.59	0.42	0.67	0.44	0.76	0.39	0.64
27.	1100 *	0.42	0.79	0.42	0.68	0.42	0.89	0.38	0.78	0.43	0.80	0.38	1.35	0.40	0.58
28.	1300 *	0.35	0.69	0.34	1.17	0.42	0.86	0.36	1.04	0.37	1.23	0.41	1.01	0.39	1.00
29.	1400 *	0.28	0.63	0.28	1.03	0.35	1.03	0.29	0.73	0.34	0.77	0.39	0.78	0.34	0.75
Zona de estudio		0.25	0.79	0.26	1.17	0.26	1.03	0.27	1.04	0.27	1.23	0.28	1.35	0.24	1.00
Península y Baleares		0.25	0.79	0.26	0.76	0.26	0.89	0.27	0.78	0.27	0.80	0.28	1.35	0.24	0.64
Península		0.25	0.64	0.26	0.76	0.26	0.70	0.27	0.66	0.27	0.70	0.28	0.79	0.24	0.64



Tabla 5.3. Ajuste del modelo SQRT-R en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes para todos los periodos de estudio.

Periodo de estudio	Valor	Parámetro de escala (regional)	Parámetro de forma (regional)	Cuantil (regional)			Media local [mm]	Cuantil [mm]		
				T = 10	T = 100	T = 500		T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	mín	27.21	14.17	1.33	1.93	2.40	11.75	19.62	34.97	47.79
	med	64.05	258.68	1.50	2.43	3.19	50.45	75.68	122.38	160.38
	máx	115.57	1931.62	1.79	3.40	4.76	254.19	404.24	688.86	923.55
RCP 4.5: 2041-2070	mín	21.84	8.86	1.34	1.94	2.41	7.85	13.29	23.99	32.96
	med	59.84	208.98	1.52	2.50	3.30	51.07	77.75	127.50	168.16
	máx	114.63	1863.30	1.90	3.79	5.41	243.53	381.98	664.54	898.86
RCP 4.5: 2071-2100	mín	16.64	5.26	1.28	1.81	2.23	10.51	18.51	34.62	48.24
	med	60.19	234.89	1.52	2.51	3.31	51.98	79.07	129.64	170.98
	máx	135.88	3951.86	2.04	4.36	6.37	255.29	380.09	672.16	915.46
RCP 8.5: 2011-2040	mín	20.72	7.97	1.32	1.91	2.37	11.10	17.94	31.03	41.87
	med	65.47	272.66	1.49	2.41	3.15	51.16	76.64	123.75	162.08
	máx	119.27	2216.20	1.93	3.89	5.58	246.07	386.47	696.68	956.43
RCP 8.5: 2041-2070	mín	19.78	7.28	1.30	1.85	2.29	10.41	18.51	34.91	48.81
	med	59.68	212.33	1.52	2.50	3.31	51.24	77.97	127.84	168.59
	máx	128.15	3033.85	1.95	3.98	5.74	250.63	384.73	664.02	895.13
RCP 8.5: 2071-2100	mín	18.89	6.66	1.37	2.02	2.53	8.44	16.13	32.36	46.33
	med	52.21	129.38	1.57	2.65	3.53	52.55	82.06	137.93	183.91
	máx	101.88	1107.78	1.98	4.08	5.90	252.41	368.95	661.92	906.91
Periodo de control	mín	28.47	15.73	1.33	1.92	2.38	10.46	17.45	31.07	42.45
	med	67.23	295.26	1.49	2.38	3.11	48.88	72.66	116.41	151.92
	máx	117.58	2082.26	1.77	3.32	4.64	264.76	410.49	683.49	907.13



Tabla 5.4. Ajuste del modelo GEV-L en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes para todos los periodos de estudio.

Periodo de estudio	Valor	LCV	Parámetro de localización	Parámetro de escala	Parámetro de forma	Cuantil [mm]		
						T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	mín	0.08	7.47	3.35	-0.74	22.56	31.05	32.76
	med	0.22	40.93	13.85	-0.09	75.58	124.81	173.45
	máx	0.52	226.13	102.48	0.65	416.53	674.06	2169.21
RCP 4.5: 2041-2070	mín	0.09	4.79	3.62	-0.83	15.27	33.27	36.43
	med	0.22	40.95	14.34	-0.10	77.42	130.93	185.41
	máx	0.62	203.73	83.38	0.62	368.12	622.05	2084.88
RCP 4.5: 2071-2100	mín	0.08	5.60	3.80	-0.78	19.83	28.49	32.91
	med	0.23	41.71	14.69	-0.09	78.85	132.69	187.02
	máx	0.56	227.53	103.26	0.62	409.83	743.48	1732.11
RCP 8.5: 2011-2040	mín	0.08	6.75	4.03	-0.76	19.69	28.32	32.67
	med	0.22	41.56	14.23	-0.07	76.73	125.36	172.30
	máx	0.50	216.70	81.88	0.69	360.89	648.32	1498.39
RCP 8.5: 2041-2070	mín	0.09	5.52	3.80	-0.79	20.68	33.70	34.57
	med	0.23	41.09	14.62	-0.09	77.90	130.64	182.93
	máx	0.57	214.14	110.38	0.66	425.41	821.43	2587.16
RCP 8.5: 2071-2100	mín	0.08	4.75	3.99	-0.85	16.65	35.01	41.19
	med	0.24	41.33	15.65	-0.11	81.52	141.69	204.03
	máx	0.60	214.57	78.90	0.61	368.31	759.05	2851.27
Periodo de control	mín	0.08	6.37	3.39	-0.71	20.38	31.20	33.81
	med	0.21	39.89	13.01	-0.09	72.55	119.14	165.25
	máx	0.52	211.30	87.59	0.65	424.88	710.11	1867.43

Tasas de cambio en cuantil

Los modelos climáticos comunes proporcionan una gran variabilidad de resultados en relación a las tasas de cambio en cuantil. Los mapas de tasas de cambio en cuantil para cada uno de los modelos climáticos comunes se incluyen en el Anexo nº 5 para los modelos SQRT-R y GEV-L. Estos resultados se resumen para cada modelo estadístico a través del cálculo de las tasas de cambio en cuantil medias, así como de las asociadas a los percentiles 10 y 90, al considerar los resultados de los diferentes modelos climáticos comunes para cada periodo de impacto y escenario, en cada celda.

Las tasas de cambio en cuantil medias se muestran en las Figuras 5.1 a 5.4, las tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en las Figuras 5.5 a 5.8 y las asociadas al percentil 90 en las Figuras 5.9 a 5.12. A través de estas figuras se presentan los resultados para cada modelo estadístico y escenario. Los mapas asociados con el modelo SQRT-R presentan resultados para la Península y Baleares, mientras que los mapas asociados al modelo GEV-L presentan resultados para toda la zona de estudio (es decir, incluyendo Ceuta y Melilla). El rango de las

tasas de cambio presentes en cada figura se indica en la leyenda asociada, marcando con mayor tamaño los símbolos de la leyenda asociados al conjunto de categorías existentes entre el valor mínimo y el valor máximo de dichas tasas de cambio.

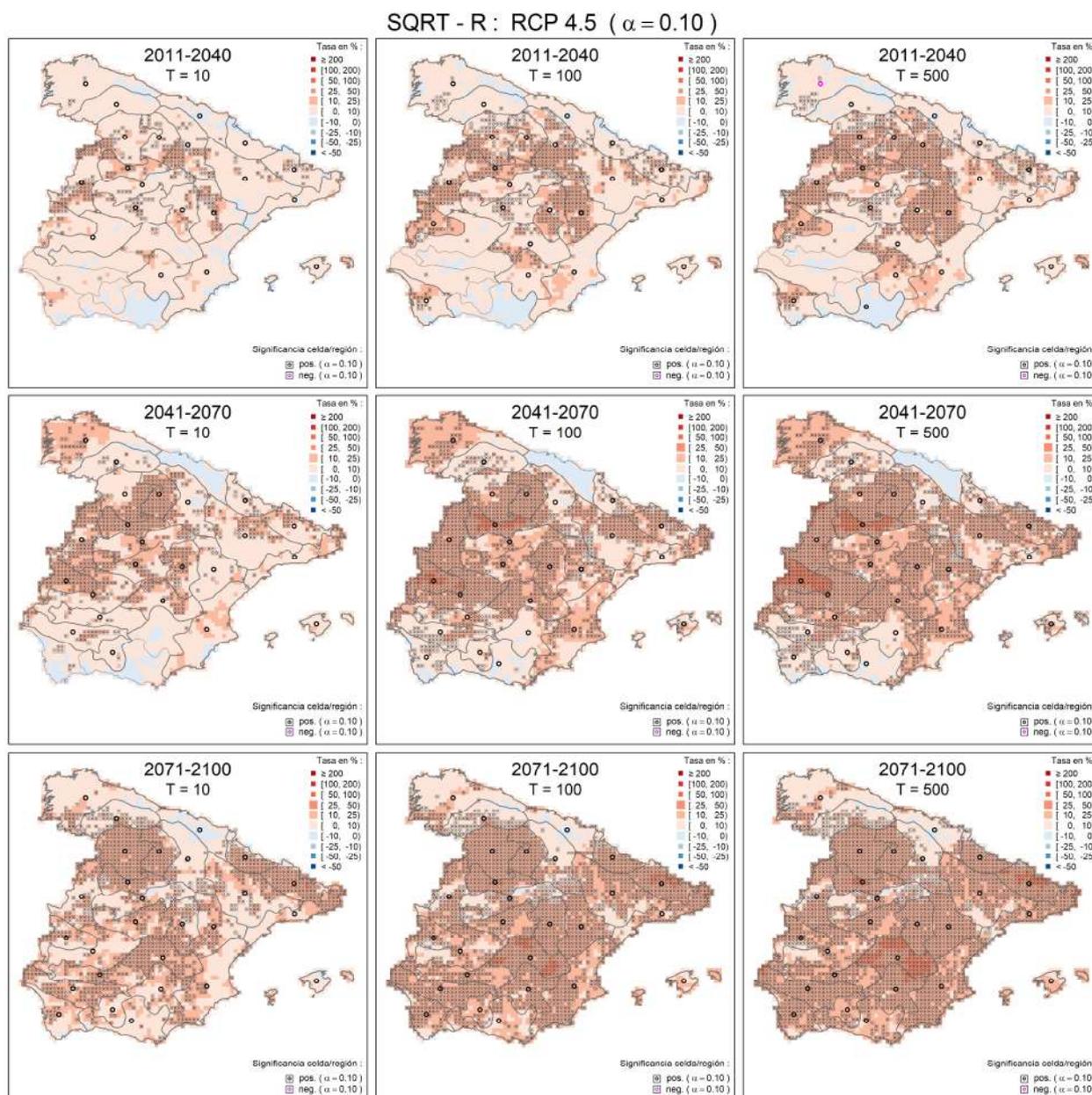


Figura 5.1. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5.

SQRT - R : RCP 8.5 ($\alpha = 0.10$)

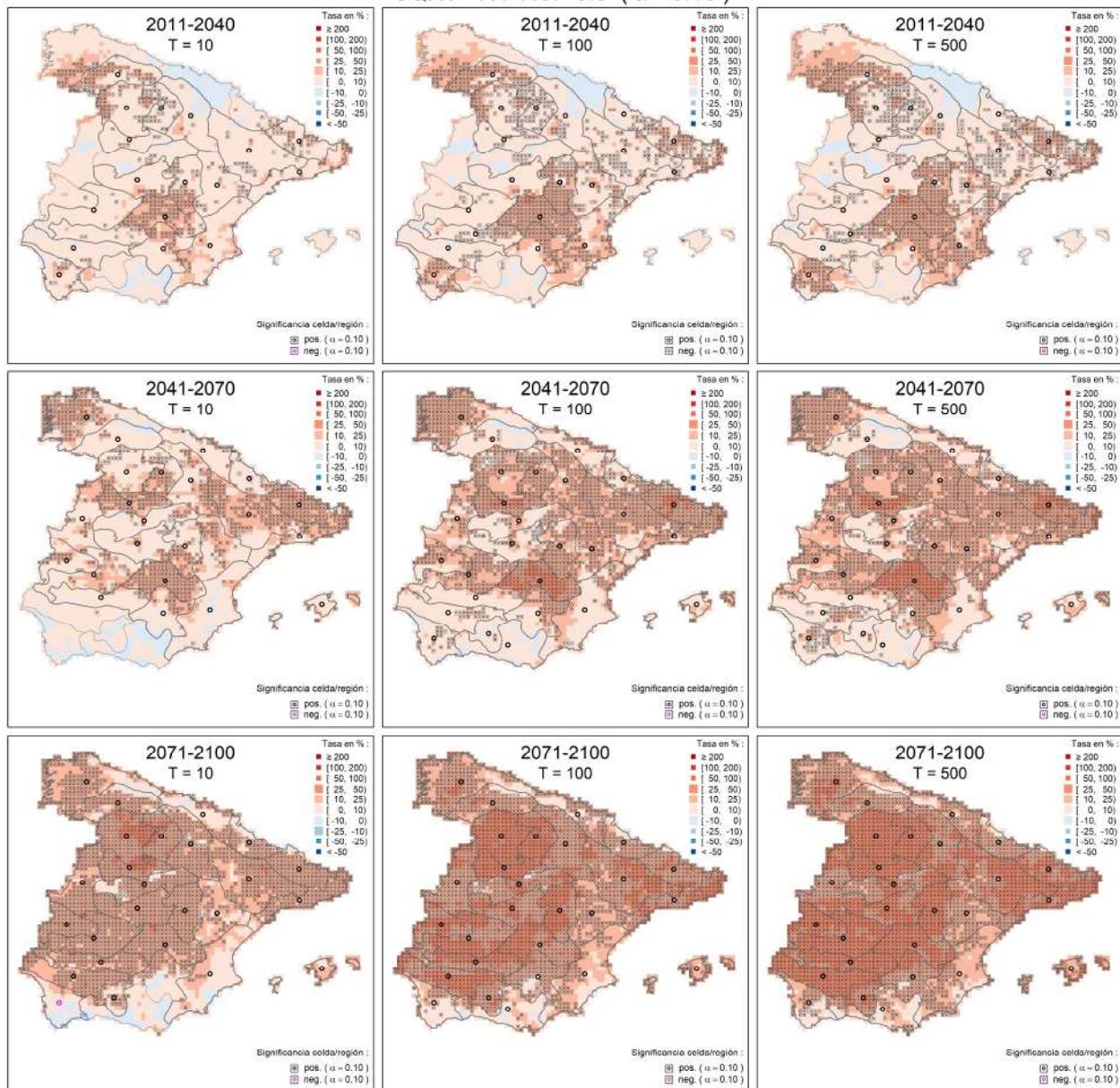


Figura 5.2. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5.

GEV - L : RCP 4.5 ($\alpha = 0.10$)

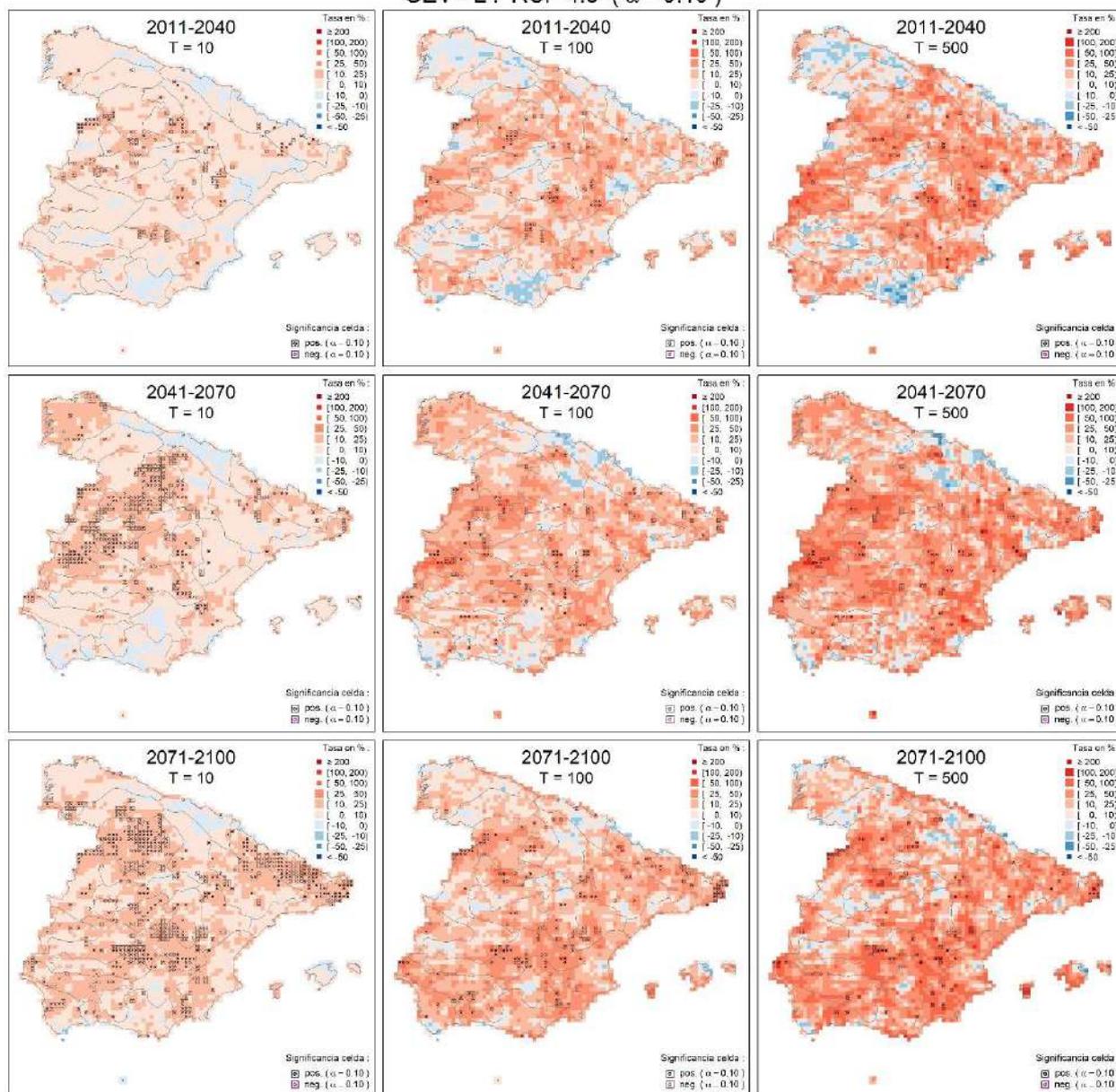


Figura 5.3. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

GEV - L : RCP 8.5 ($\alpha = 0.10$)

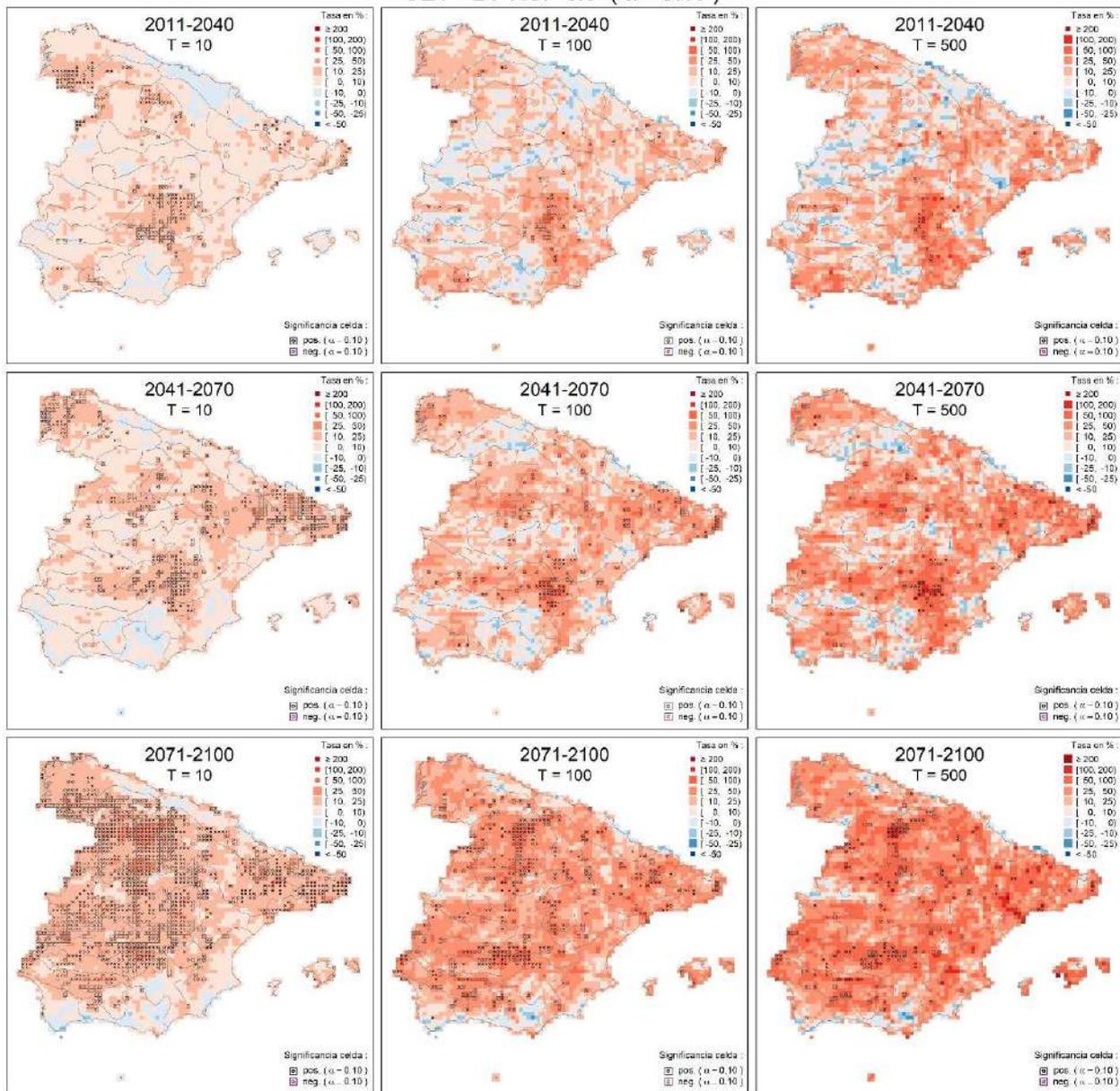


Figura 5.4. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

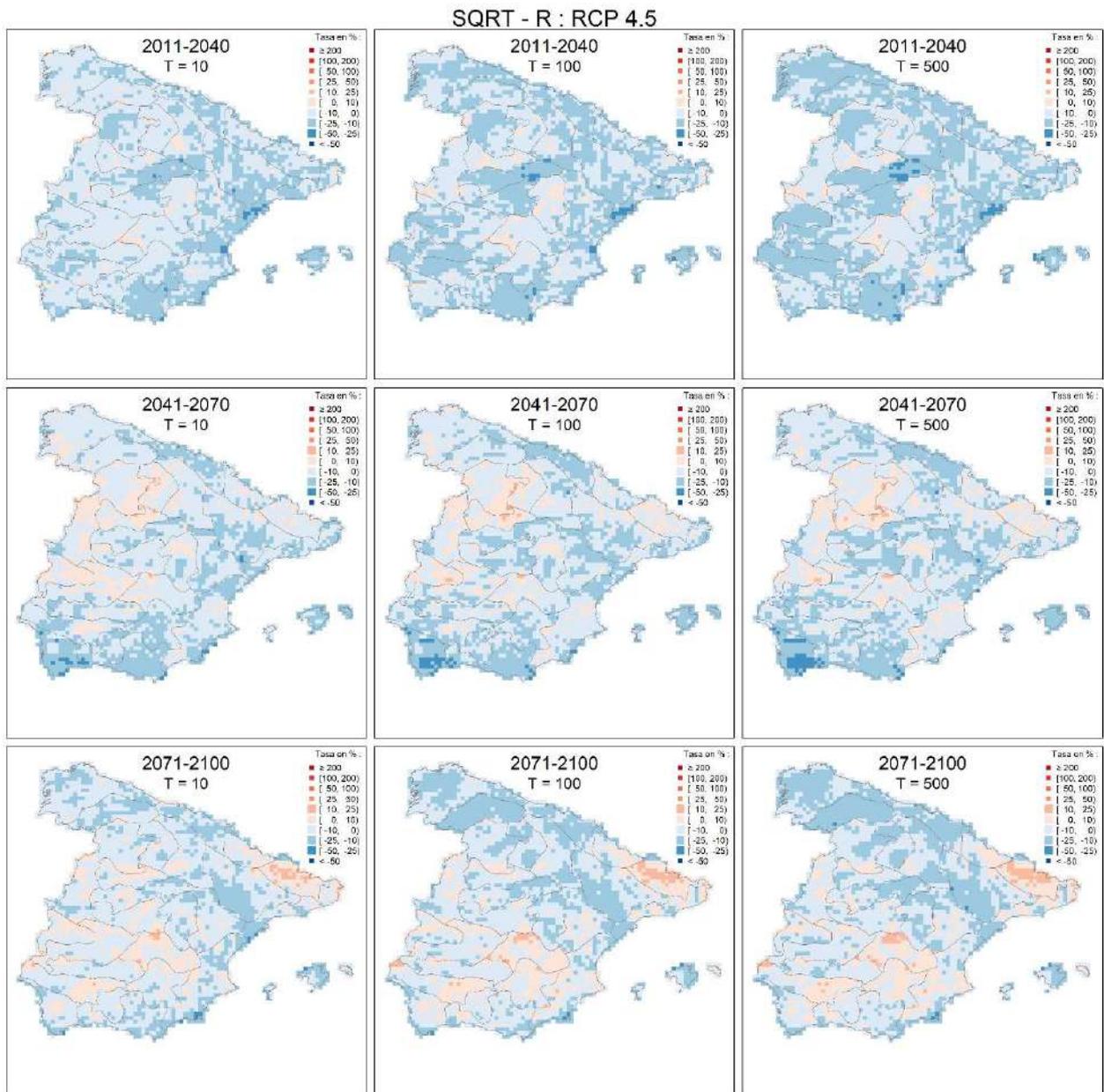


Figura 5.5. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5.

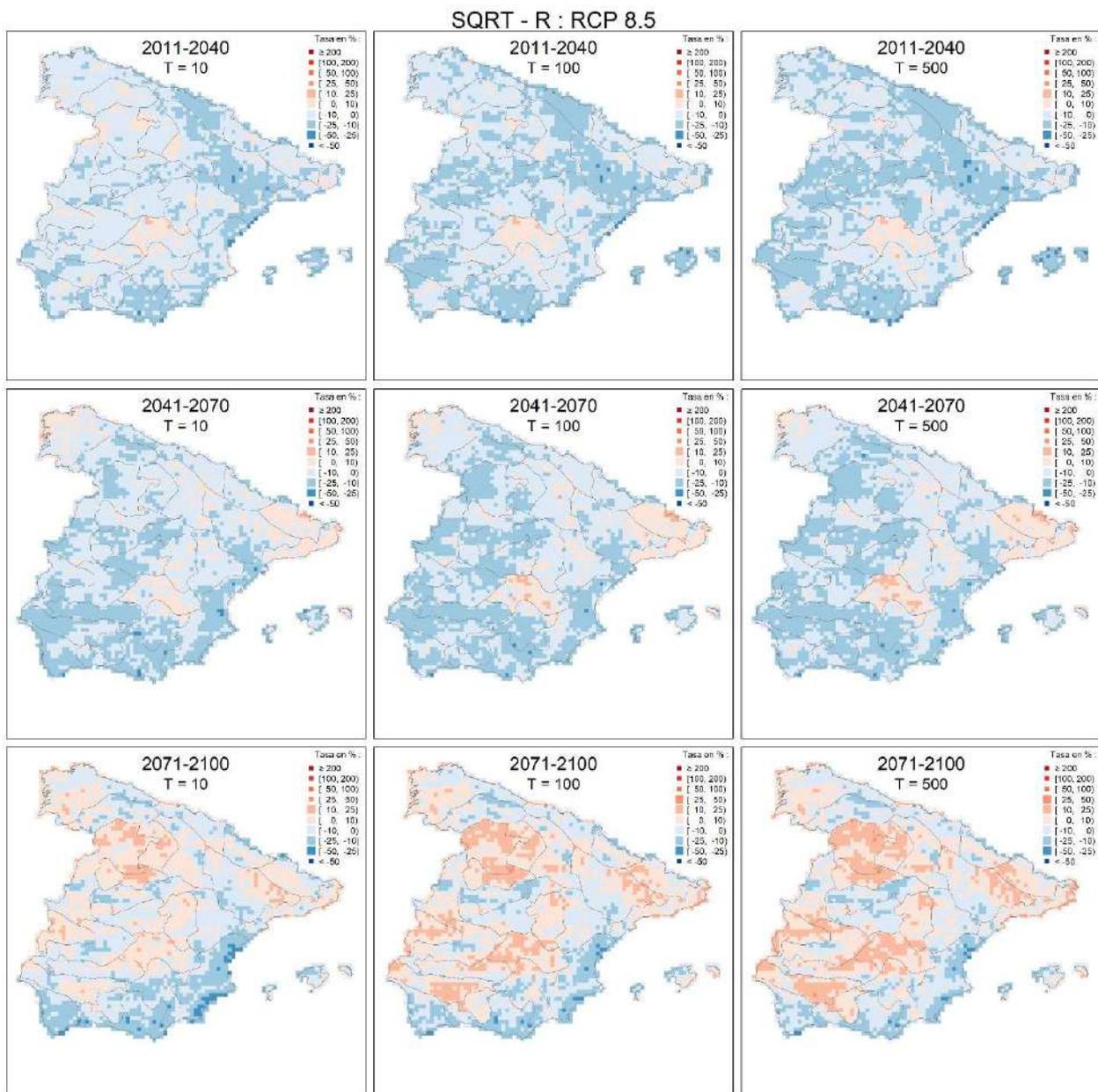


Figura 5.6. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5.

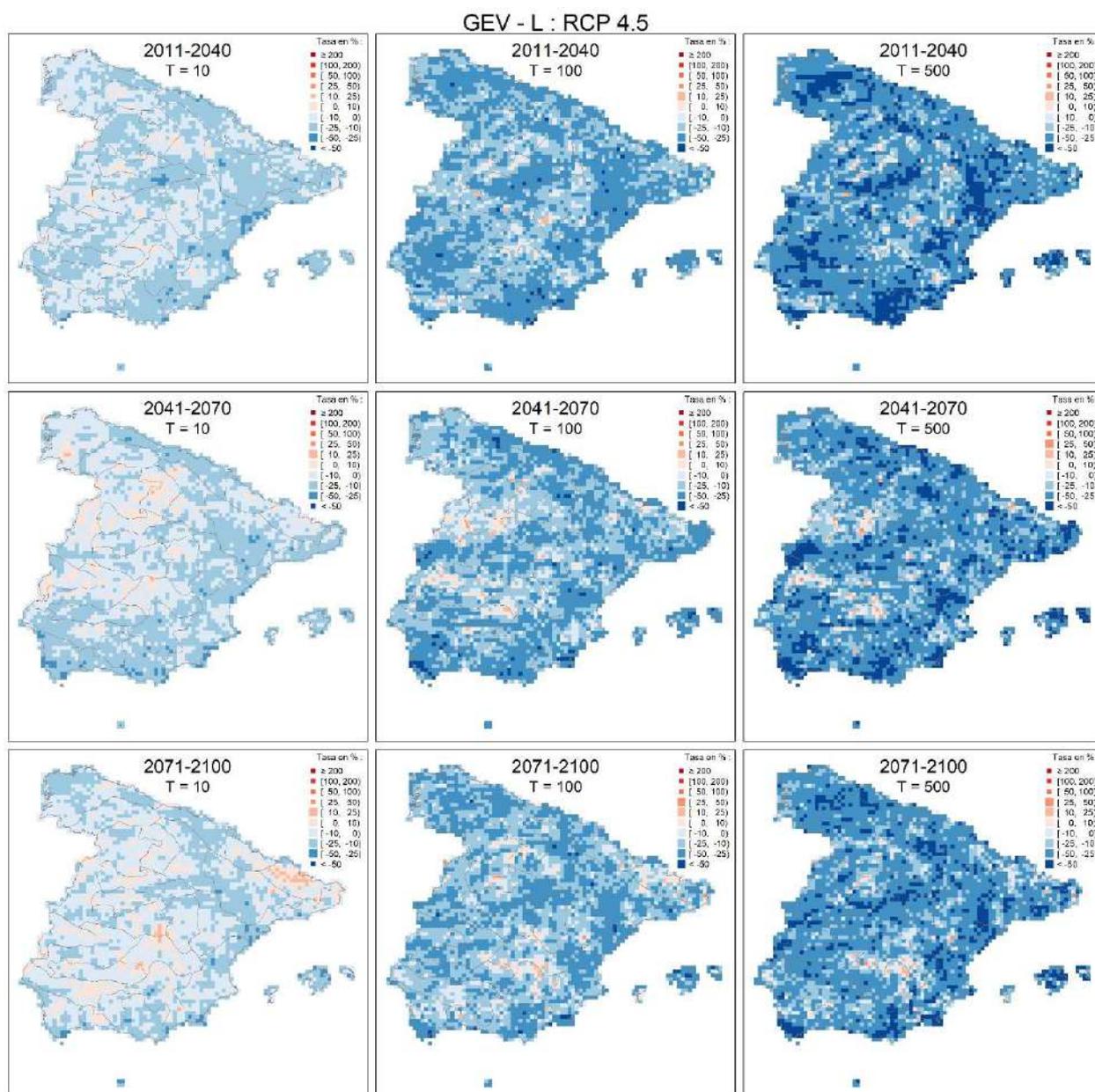


Figura 5.7. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

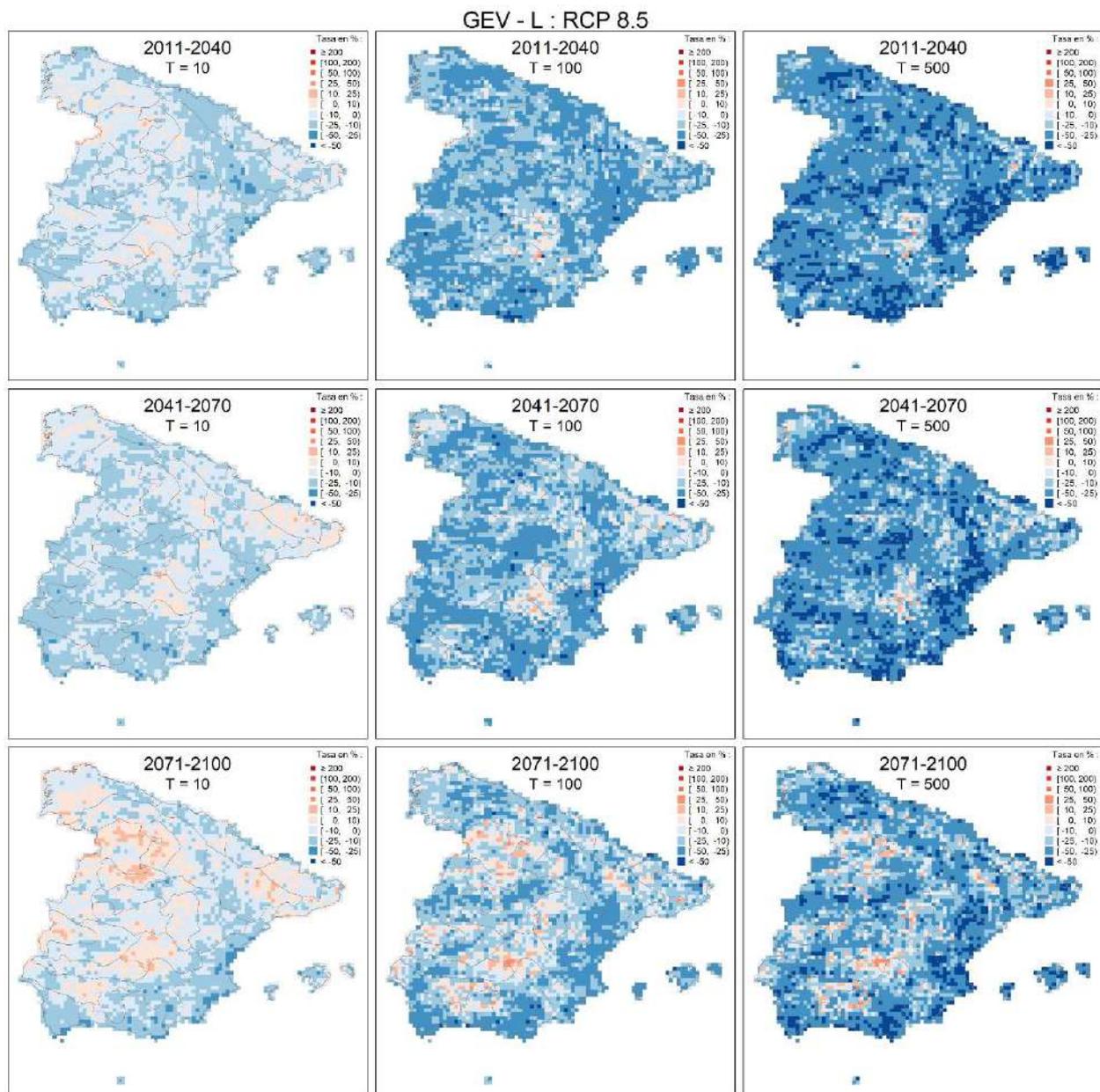


Figura 5.8. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

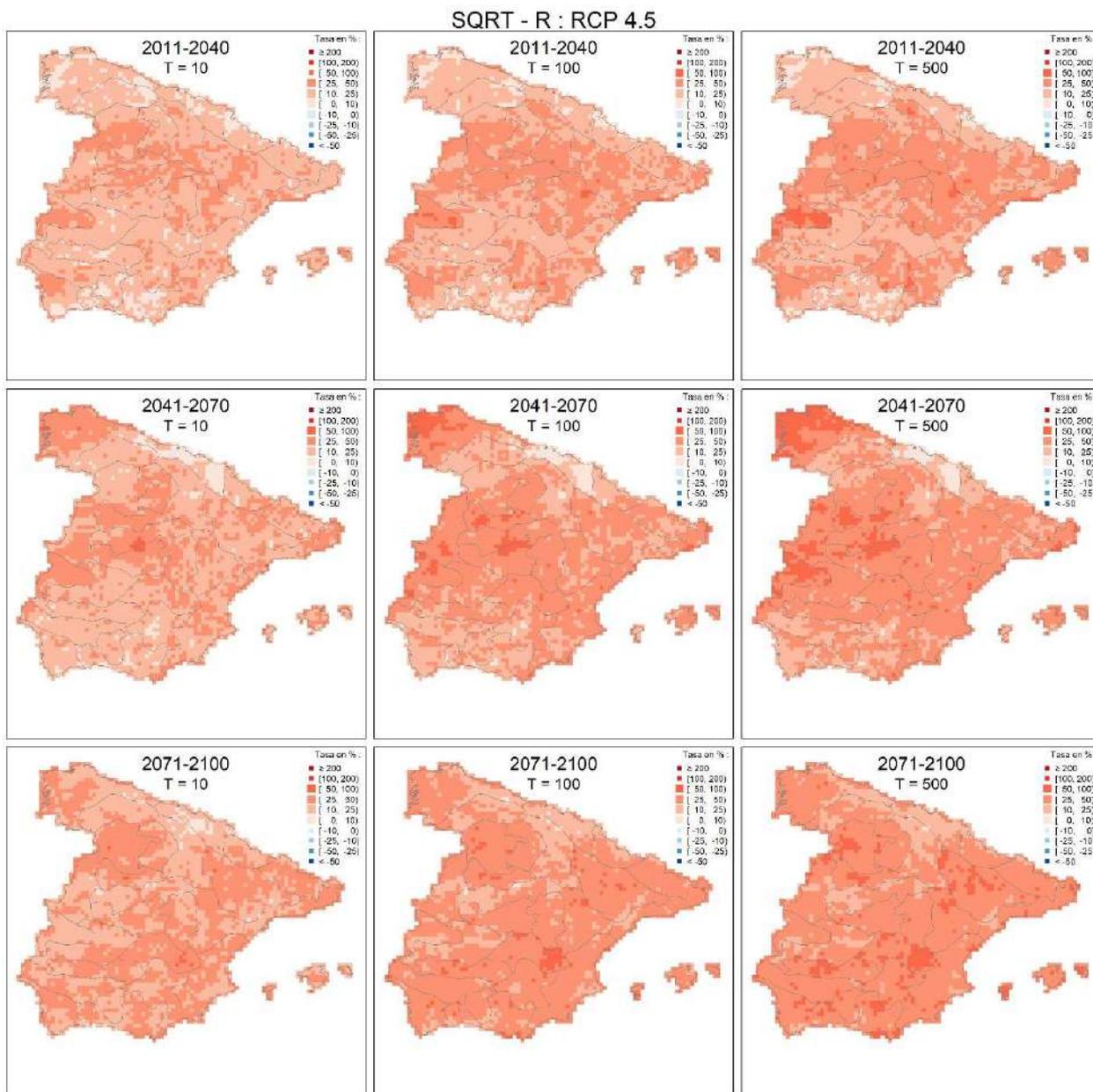


Figura 5.9. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5.

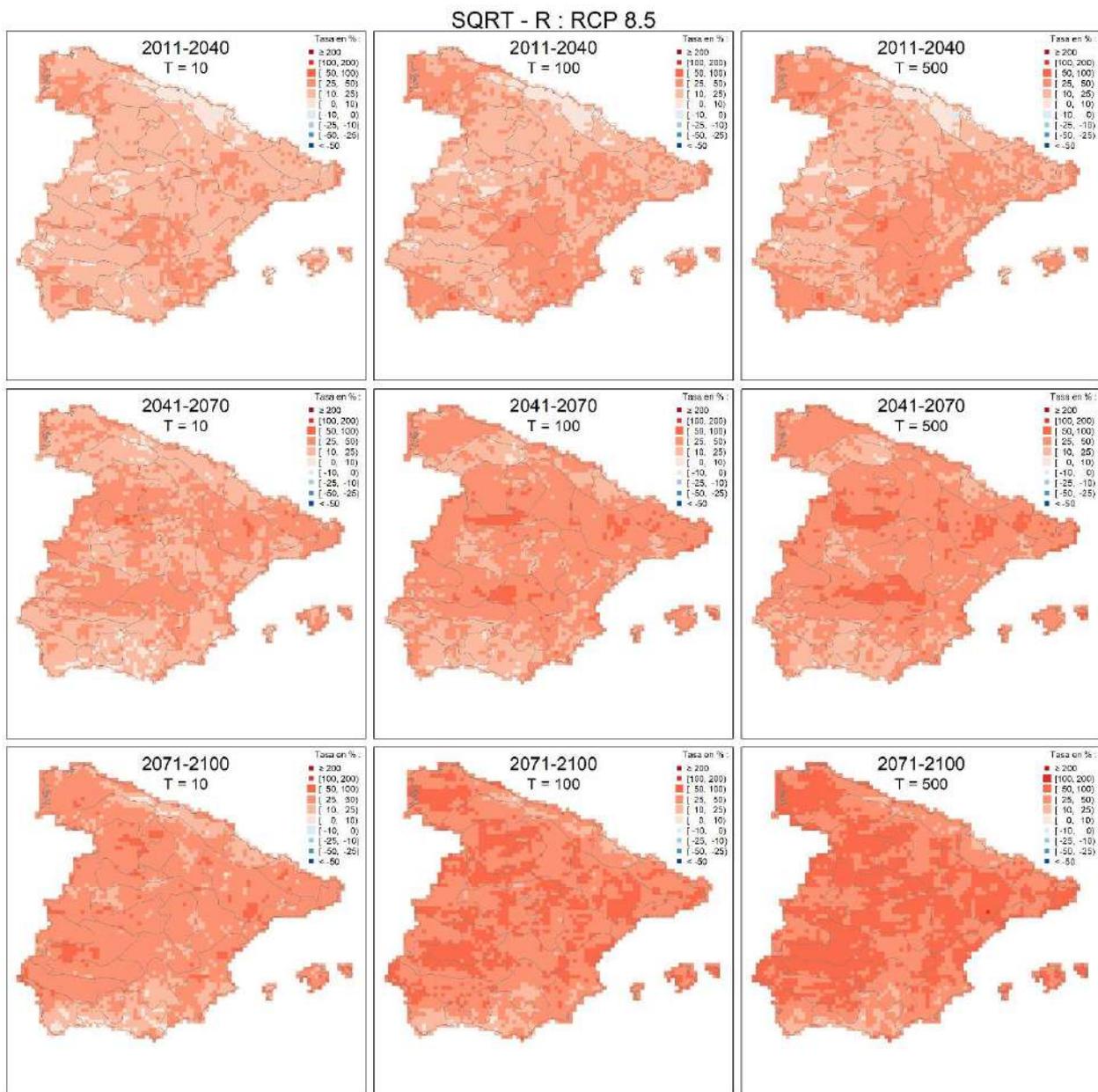


Figura 5.10. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en la Península y Baleares para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5.

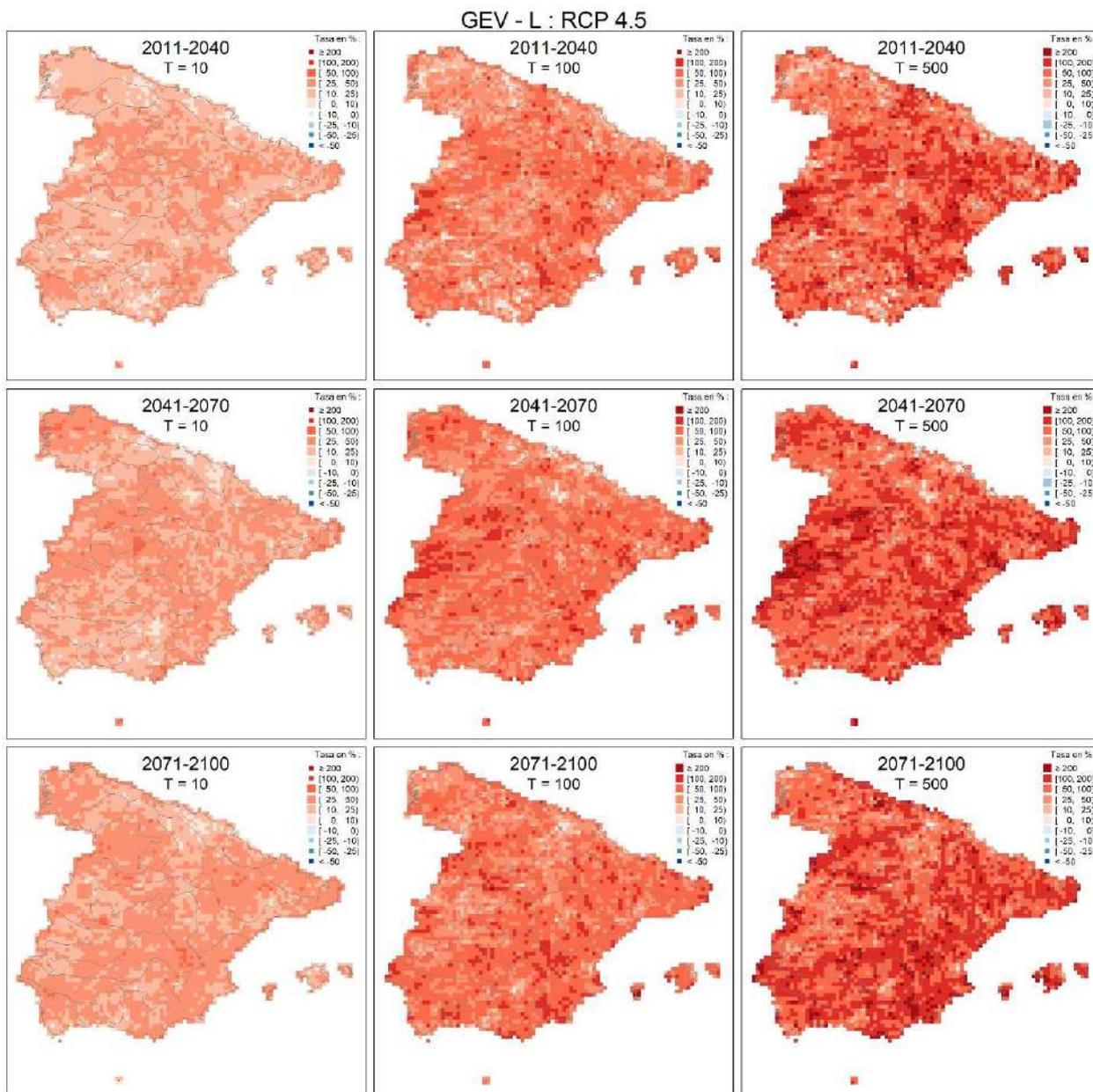


Figura 5.11. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

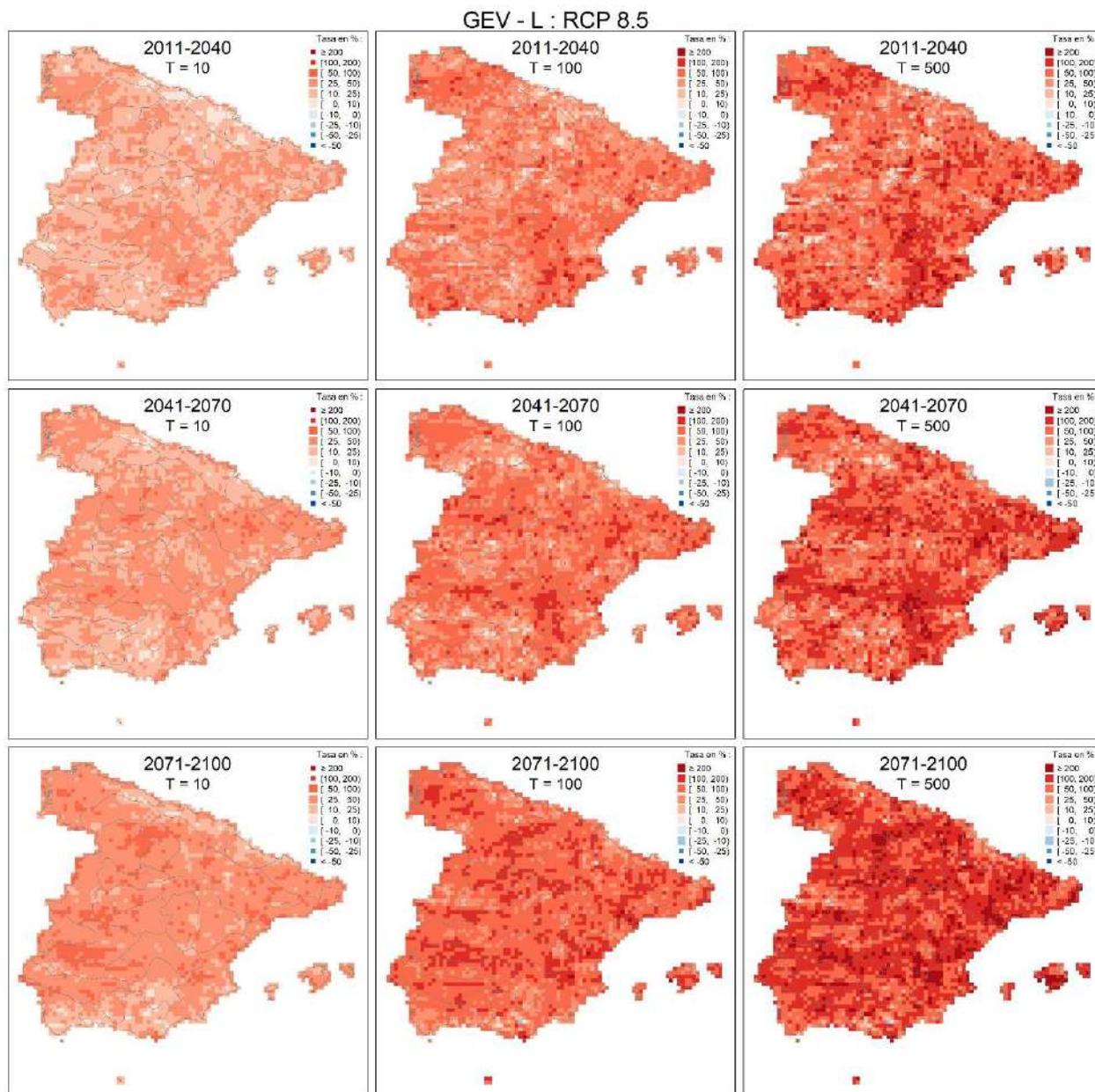


Figura 5.12. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual en base a modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

Las [Tablas 5.5 a 5.7](#) resumen estos resultados, indicando el valor mínimo, medio y máximo sobre la Península y Baleares para ambos modelos estadísticos. La [Tabla 5.8](#) aúna la información mostrada en dichas tablas respecto a los valores medios para facilitar su análisis. Las posibles diferencias entre los valores mostrados en las tablas y los rangos de las tasas de cambio marcados en las leyendas de las figuras están asociadas al redondeo realizado en las tablas, y/o en el caso del modelo GEV-L, al hecho de que las tablas reflejan resultados para la Península y Baleares mientras que las figuras muestran resultados para toda la zona de estudio.

El rango de las tasas de cambio en cuantil medias ([Tabla 5.5](#)) para la Península y Baleares considerando los modelos climáticos comunes es más amplio para el modelo GEV-L (-35%, 211%) que para el modelo SQRT-R (-11%, 47%). Lo mismo ocurre con la media de dichos valores, que es generalmente mayor para el modelo GEV-L y que aumenta con el periodo de



impacto y el periodo de retorno para ambos modelos estadísticos (y también, en general, con el escenario RCP 8.5 frente al RCP 4.5), y cuyo rango es (5%, 42%) para el modelo GEV-L y (5%, 24%) para el modelo SQRT-R. La gran variabilidad en las tasas de cambio medias para el modelo GEV-L es consecuencia de su mayor número de parámetros (que permite un ajuste más flexible a la serie de datos) y de su ajuste local, lo que conlleva una mayor incertidumbre en la estimación de los cuantiles, que da lugar a mayores diferencias entre distintas estimaciones y a una mayor heterogeneidad espacial a medida que aumenta el periodo de retorno. Es decir, el rango, la media y la distribución espacial de las tasas de cambio medias de los dos modelos estadísticos presentan similitudes para $T = 10$ años, pero grandes diferencias para $T = 100$ o 500 años (Tabla 5.5; Figuras 5.1 a 5.4). A continuación se incluye un resumen de la ubicación de la mayor parte de las zonas con mayores tasas de cambio medias positivas en la Península y Baleares para $T = 10$ años; el tamaño de dichas zonas, así como la heterogeneidad en los resultados del modelo GEV-L, generalmente aumenta a medida que aumenta el periodo de retorno (Figuras 5.1 a 5.4):

- “RCP 4.5: 2011-2040”: pocas zonas de pequeño tamaño dispersas a lo largo de la Península (principalmente en la zona centro y noreste) y parte de Baleares.
- “RCP 4.5: 2041-2070”: zonas en centro-oeste, noroeste, noreste y este.
- “RCP 4.5: 2071-2100”: zonas repartidas a lo largo de la Península (salvo en franjas situadas en el norte, sur y este) y en parte de Baleares.
- “RCP 8.5: 2011-2040”: zonas en el noroeste y sureste.
- “RCP 8.5: 2041-2070”: zonas en noroeste, centro y noreste, y parte de Baleares.
- “RCP 8.5: 2071-2100”: toda la Península (salvo franjas en el norte y en la costa sur y este) y parte de Baleares.



CEDEX

Tabla 5.5. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	Valor	SQRT-R			GEV-L		
		T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	mín	-9	-9	-10	-10	-23	-35
	med	5	6	7	5	11	20
	máx	17	20	21	20	57	142
RCP 4.5: 2041-2070	mín	-9	-7	-8	-10	-23	-32
	med	8	11	12	8	17	28
	máx	24	31	34	26	74	155
RCP 4.5: 2071-2100	mín	-9	-6	-4	-13	-19	-27
	med	10	13	14	10	18	30
	máx	26	33	37	31	80	177
RCP 8.5: 2011-2040	mín	-8	-8	-9	-10	-22	-35
	med	6	7	8	7	11	18
	máx	22	27	29	23	67	157
RCP 8.5: 2041-2070	mín	-8	-6	-5	-12	-17	-25
	med	8	11	13	9	16	27
	máx	25	31	35	32	74	170
RCP 8.5: 2071-2100	mín	-11	-6	-4	-13	-25	-33
	med	15	21	24	14	27	42
	máx	35	43	47	38	92	211

Como puede observarse en las Figuras 5.1 a 5.4 los incrementos en los cuantiles son claramente predominantes a lo largo de toda la zona de estudio, siendo los descensos de menor magnitud y estando ceñidos principalmente a algunas zonas concretas del norte, oeste, este y sureste peninsular.

Las tasas de cambio asociadas a los percentiles 10 y 90 presentan un comportamiento similar al de las tasas de cambio medias. El rango de las tasas de cambio asociadas al percentil 10 para la Península y Baleares considerando los modelos climáticos comunes (Tabla 5.6), es más amplio para el modelo GEV-L (-81%, 45%) que para el modelo SQRT-R (-42%, 32%). El rango de las tasas de cambio asociadas al percentil 90 para la Península y Baleares considerando los modelos climáticos comunes (Tabla 5.7) también es más amplio para el modelo GEV-L (-14%, 702%) que para el modelo SQRT-R (-2%, 101%).



Tabla 5.6. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	Valor	SQRT-R			GEV-L		
		T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	mín	-33	-33	-32	-36	-58	-73
	med	-8	-10	-10	-11	-25	-37
	máx	5	6	7	7	19	22
RCP 4.5: 2041-2070	mín	-35	-36	-37	-39	-66	-80
	med	-6	-7	-7	-10	-23	-34
	máx	12	16	16	13	21	36
RCP 4.5: 2071-2100	mín	-33	-32	-32	-41	-64	-81
	med	-5	-6	-6	-7	-22	-33
	máx	18	22	24	19	41	44
RCP 8.5: 2011-2040	mín	-33	-33	-33	-35	-61	-76
	med	-7	-9	-10	-9	-25	-37
	máx	15	16	17	14	32	31
RCP 8.5: 2041-2070	mín	-34	-32	-31	-36	-63	-79
	med	-7	-7	-8	-9	-22	-33
	máx	14	18	19	17	33	40
RCP 8.5: 2071-2100	mín	-42	-37	-35	-49	-60	-75
	med	-3	0	1	-5	-16	-27
	máx	20	29	32	19	33	45

Los valores medios de las tasas de cambio medias y de los percentiles 10 y 90 dan una visión general de la variabilidad que presentan las tasas de cambio obtenidas mediante el uso de los diferentes modelos climáticos (Tabla 5.8). Por ejemplo, para “RCP 8.5: 2071-2100” y T = 500 años, la media para la Península y Baleares de la tasa de cambio en cuantil media del modelo SQRT-R es 24%, con un rango de variabilidad de [1%, 49%], y para el modelo GEV-L es 42%, con un rango de variabilidad de [-27%, 125%]. Se recuerda que las tasas de cambio asociadas a los percentiles 10 y 90 se muestran en las Figuras 5.5 a 5.12.



Tabla 5.7. Tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	Valor	SQRT-R			GEV-L		
		T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	mín	-2	-1	-1	0	-9	-14
	med	19	23	26	22	50	84
	máx	46	60	67	57	180	352
RCP 4.5: 2041-2070	mín	-1	-2	-1	0	-7	-12
	med	23	30	33	26	60	100
	máx	63	76	87	67	210	501
RCP 4.5: 2071-2100	mín	4	6	7	-1	-2	-8
	med	25	32	36	28	62	102
	máx	57	74	80	70	278	702
RCP 8.5: 2011-2040	mín	-2	-2	-2	0	-4	-9
	med	20	23	25	23	49	79
	máx	54	60	63	68	228	461
RCP 8.5: 2041-2070	mín	3	6	7	1	-5	-11
	med	25	31	35	28	59	96
	máx	66	75	83	84	215	406
RCP 8.5: 2071-2100	mín	-2	5	7	-2	-12	-14
	med	33	44	49	36	77	125
	máx	73	93	101	76	245	652

En la práctica, puede ser necesario realizar ajustes en las tasas de cambio en cuantil medias de determinadas celdas para asegurar un adecuado diseño de infraestructuras y una adecuada evaluación del riesgo, de tal forma que se garantice la coherencia entre los distintos periodos de impacto (e.g., Requena et al. 2019). Para un determinado escenario, estos ajustes deben estar enfocados a la obtención de tasas de cambio medias cuyo valor sea más extremo para los últimos periodos de impacto (e.g., las tasas de cambio medias positivas asociadas a “RCP 8.5: 2041-2070” deben ser menores o iguales que las asociadas a “RCP 8.5: 2071-2100”). Sin embargo, puede no ser adecuado realizar ajustes en las tasas de cambio medias en relación a los distintos escenarios, ya que cuando se trata con precipitación extrema, valores más extremos de las tasas de cambio pueden no estar necesariamente asociados a escenarios más pesimistas. A su vez, la aplicación de las tasas de cambio medias sobre cuantiles observados asociados a diversos periodos de retorno requiere verificar que dichos cuantiles futuros estimados bajo el efecto del cambio climático aumentan con el periodo de retorno y con la duración de lluvia si la precipitación está expresada en mm (o disminuyen con la duración de lluvia si la precipitación está expresada en mm/h, es decir, como intensidad de lluvia).

Ejemplos de la falta de coherencia de las tasas de cambio en relación a los periodos de impacto puede observarse, por ejemplo, en la región “0101” ubicada en el noroeste de la Península, donde las tasas de cambio para 2041-2070 son mayores que para 2071-2100 para T = 10, 100 y 500 años para el modelo SQRT-R en relación a RCP 4.5 (Figura 5.1), así como en la región “0401” ubicada en el centro de la Península para T = 100 y 500 años para el modelo GEV-L en relación a RCP 8.5 (Figura 5.4). Ejemplos de la falta de coherencia en relación a los escenarios



pueden encontrarse para ambos modelos estadísticos en la región “0402”, ubicada en el oeste de la Península, donde las tasas de cambio para RCP 4.5 son mayores que para RCP 8.5 para los periodos de impacto 2011-2040 y 2041-2070, para $T = 100$ y 500 años (Figuras 5.1 a 5.4). Estas faltas de coherencia son el reflejo de las limitaciones que presentan los modelos climáticos para representar correctamente el comportamiento de un fenómeno tan complejo como las precipitaciones máximas y dan una idea sobre la elevada incertidumbre asociada a las predicciones en relación a su posible evolución futura, circunstancia que es necesario tener en cuenta a la hora de la posible aplicación práctica de dichas predicciones.

Tabla 5.8. Valor medio sobre la Península y Baleares de las tasas de cambio en cuantil medias y asociadas a los percentiles 10 y 90 (expresadas en %), resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	Valor	SQRT-R			GEV-L		
		$T = 10$	$T = 100$	$T = 500$	$T = 10$	$T = 100$	$T = 500$
RCP 4.5: 2011-2040	Percentil 10	-8	-10	-10	-11	-25	-37
	Media	5	6	7	5	11	20
	Percentil 90	19	23	26	22	50	84
RCP 4.5: 2041-2070	Percentil 10	-6	-7	-7	-10	-23	-34
	Media	8	11	12	8	17	28
	Percentil 90	23	30	33	26	60	100
RCP 4.5: 2071-2100	Percentil 10	-5	-6	-6	-7	-22	-33
	Media	10	13	14	10	18	30
	Percentil 90	25	32	36	28	62	102
RCP 8.5: 2011-2040	Percentil 10	-7	-9	-10	-9	-25	-37
	Media	6	7	8	7	11	18
	Percentil 90	20	23	25	23	49	79
RCP 8.5: 2041-2070	Percentil 10	-7	-7	-8	-9	-22	-33
	Media	8	11	13	9	16	27
	Percentil 90	25	31	35	28	59	96
RCP 8.5: 2071-2100	Percentil 10	-3	0	1	-5	-16	-27
	Media	15	21	24	14	27	42
	Percentil 90	33	44	49	36	77	125

En cualquier caso, se destaca el hecho de que estas tasas de cambio no pueden considerarse directamente relacionadas con el cambio climático, sino que en gran parte son debidas a la incertidumbre inherente a la estimación de los cuantiles (en mayor medida los de más alto periodo de retorno) a partir de muestras de tamaño reducido, lo que conduce a obtener estimaciones diferentes a partir de distintas muestras procedentes de una misma población estadística. Es, por tanto, necesario, como se indicó anteriormente y se expondrá a continuación, analizar la significancia estadística de los cambios para identificar en qué casos son de suficiente magnitud como para que pueda afirmarse con cierto rigor que se deben a un cambio en la población estadística como consecuencia de un cambio en el clima.



Significancia de las tasas de cambio en cuantil

El rango del porcentaje de celdas en la Península y Baleares con cambios significativos positivos para $\alpha = 0.10$ para cada modelo climático común evaluado de forma individual es (9%, 85%) para el modelo SQRT-R y (9%, 51%) para el modelo GEV-L, mientras que el asociado con cambios significativos negativos es (0%¹, 30%) para el modelo SQRT-R y (0%¹, 16%) para el modelo GEV-L (0*% indica que el porcentaje es mayor que 0). Por lo tanto, hay un mayor número de celdas con cambios en cuantil significativos positivos que negativos, y el porcentaje de celdas con cambios significativos es generalmente mayor para el modelo SQRT-R que para el modelo GEV-L. Además, se observa una gran variabilidad en los resultados para los diferentes modelos climáticos.

Existe cierta coherencia en los modelos climáticos que proporcionan el mayor o menor porcentaje de celdas con cambios significativos para $\alpha = 0.10$ para ambos modelos estadísticos: (i) el modelo climático “8_IPS-RCA” está asociado al menor porcentaje de celdas con cambios significativos positivos (i.e., 9%) y al mayor porcentaje de celdas con cambios significativos negativos (i.e., 16% y 30%), y (ii) el modelo climático “10_ICH-RCA” está asociado al menor porcentaje de celdas con cambios significativos negativos (i.e., 0%¹) y al mayor porcentaje de celdas con cambios significativos positivos para el modelo GEV-L (i.e., 51%), proporcionando el segundo mayor valor para el modelo SQRT-R (i.e., 82%; siendo el mayor valor 85% para el modelo “6_MOH-CCL”). En el **Anexo nº 6** se incluyen las figuras con los cambios significativos para cada uno de los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R.

La identificación del porcentaje de celdas en la Península y Baleares con cambio significativo para la mayoría de modelos climáticos comunes, para cada periodo de impacto y escenario, se muestra en la **Tabla 5.9**. Esta tabla muestra los resultados para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R, así como para $\alpha = 0.10$ y 0.33 para el modelo GEV-L. Como resultado, ambos modelos estadísticos identifican un número reducido de celdas con cambios en cuantil significativos negativos, ubicadas en puntos aislados del sur peninsular para $\alpha = 0.10$, así como en puntos aislados a lo largo de la Península con mayor presencia en el sur y norte peninsular en relación al modelo GEV-L para $\alpha = 0.33$. Para $\alpha = 0.10$, el porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos positivos aumenta con el periodo de impacto y también, en general, con el escenario, para ambos modelos estadísticos, y es mayor para el modelo SQRT-R (10% a 85%) que para el modelo GEV-L (1% a 34%). Dichas diferencias aumentan con el periodo de retorno, ya que el porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos positivos aumenta con el periodo de retorno para el modelo SQRT-R (ya que los incrementos en la mediana y en la varianza de las poblaciones se traducen en un mayor incremento de los cuantiles de periodo de retorno más alto) y disminuye con el periodo de retorno para el modelo GEV-L. Este comportamiento también se aprecia en los resultados individuales de los modelos climáticos.

¹ Porcentaje mayor que cero, que da cero al redondear.



Tabla 5.9. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-“) respecto a la precipitación diaria máxima anual para la mayoría de modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$)						GEV-L ($\alpha = 0.10$)						GEV-L ($\alpha = 0.33$)					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
RCP 4.5: 2011-2040	10	0	23	0	28	0	4	0	2	0	1	0	24	0*	15	0*	12	0*
RCP 4.5: 2041-2070	25	0*	47	0	56	0	9	0	4	0	2	0	39	0*	25	0*	18	0*
RCP 4.5: 2071-2100	39	0	62	0	69	0	15	0	5	0	3	0	51	0*	28	0*	20	0*
RCP 8.5: 2011-2040	14	0*	27	0	33	0	6	0	2	0*	1	0	32	0*	13	0*	9	0*
RCP 8.5: 2041-2070	27	0	46	0	54	0	11	0	4	0	2	0	41	0*	24	0*	18	0*
RCP 8.5: 2071-2100	63	0*	80	0	85	0	34	0	12	0	6	0	69	0*	45	0*	33	0*

Para el modelo SQRT-R, las zonas donde se localizan en mayor medida las celdas con cambios significativos positivos en los cuantiles corresponden al centro, noroeste y noreste peninsular (con ciertas diferencias en el patrón espacial proporcionado por el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5), extendiéndose por el resto del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, excepto a zonas del este, sur y cantábrico.

Estos resultados son consistentes con los presentados en la [sección 4](#) sobre tendencias y cambios en la mediana y en la varianza para la precipitación diaria máxima anual. No obstante, se observa cómo el número de celdas con cambio significativo en cuantil es mucho mayor (principalmente para los periodos de retorno más altos) que el que presenta cambios en la mediana y en la varianza. Esto está asociado con tres factores principales: (i) el uso de test de diferente naturaleza, siendo los primeros, test estadísticos formales, y los segundos, test basados en simulaciones de Monte Carlo; (ii) el uso de diferentes modelos climáticos en los dos análisis debido a limitaciones del modelo SQRT-R; y más importante, (iii) a la identificación de cambios significativos en base a los resultados de la “mayoría” de modelos climáticos. Como se expuso en la [sección 4](#), el escaso número de celdas y regiones con tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos identificados no significa que los modelos climáticos considerados en el estudio no pronostiquen cambios significativos en dichos estadísticos, sino que existen diferencias entre los distintos modelos respecto a la ubicación geográfica de los cambios, de tal forma que únicamente en un número reducido de celdas y regiones hay coincidencia en el pronóstico de la mayoría de modelos climáticos. Sin embargo, los incrementos en mediana, varianza y sesgo de las poblaciones se traducen en un mayor incremento de los cuantiles, especialmente de los de periodo de retorno más alto, lo que provoca que las zonas en las que los cambios en cuantil son significativos para cada modelo climático se vayan extendiendo (especialmente para un modelo estadístico como el SQRT-R en el que la menor flexibilidad de la función de distribución, al contar únicamente con dos parámetros, y el carácter regional del ajuste confieren una incertidumbre reducida a la estimación de los cuantiles).

Esto puede observarse a través de la [Figura 5.13](#), en donde se muestran resultados para un determinado modelo climático (“10 ICH-RCA”) y para cuya elaboración se ha realizado un análisis

adicional basado en simulaciones de Monte Carlo (con el objetivo de aplicar el mismo procedimiento utilizado en la identificación de celdas con cambios significativos en cuantil) para la identificación de celdas con cambios en la mediana, varianza y coeficiente de sesgo significativos. Los resultados obtenidos para la mediana y la varianza a través del uso de simulaciones de Monte Carlo (Figura 5.13) están en línea con los obtenidos mediante test estadísticos formales en la sección 4 (Figura 5.14), identificándose zonas similares en las que los cambios son significativos, y siendo las diferencias particulares debidas a la distinta naturaleza de los test. Los resultados para el coeficiente de sesgo, para el que se identifica un número reducido de celdas con cambios significativos, son consistentes con la mayor incertidumbre asociada a dicho estadístico (Figura 5.13). Las zonas en las que los cambios en la mediana, en la varianza y en el coeficiente de sesgo son significativos dan lugar a las zonas en las que se identifican cambios en cuantil significativos, aumentando éstas a medida que el periodo de retorno es más alto (Figura 5.13). De esta forma, al ser más extensas para los cuantiles las zonas con cambio significativo en cada modelo climático, se produce una mayor coincidencia en el pronóstico de la mayoría de modelos, obteniéndose un mayor número de celdas con cambio significativo, en mayor medida cuanto mayor es el periodo de retorno.

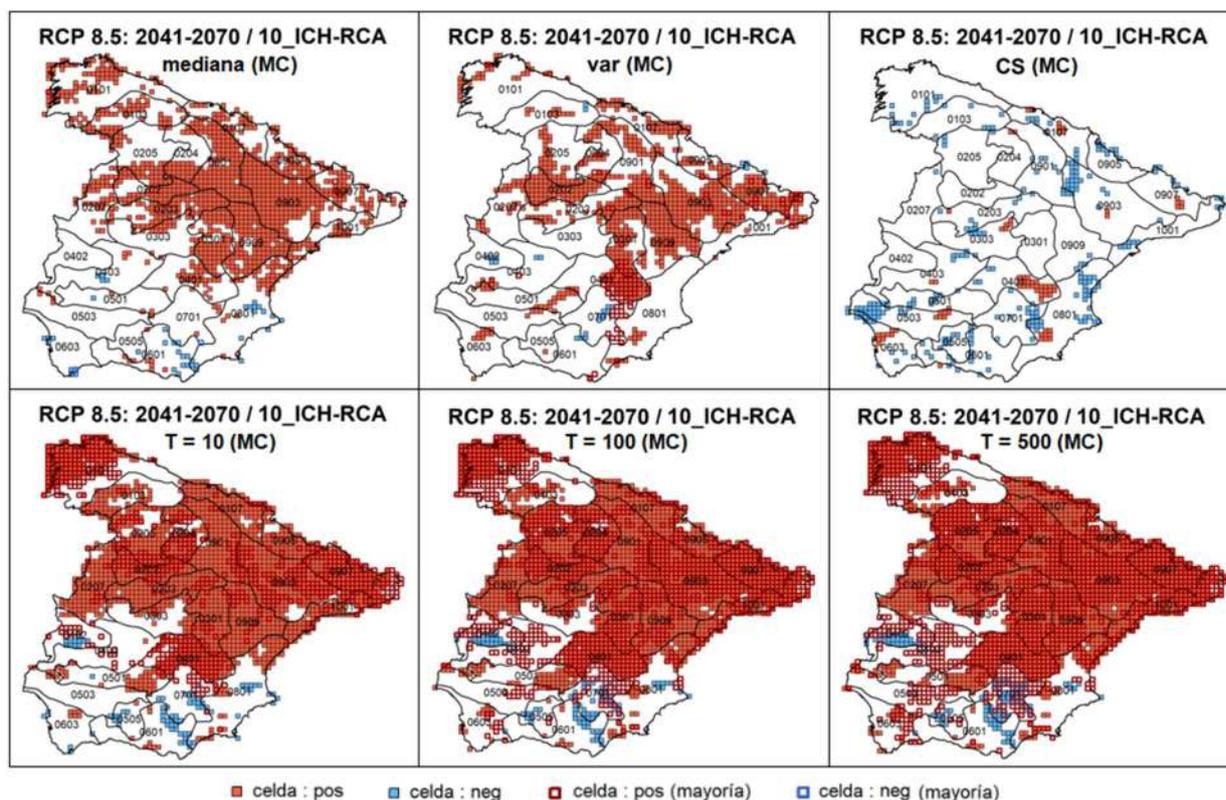


Figura 5.13. Celdas con cambios significativos en estadísticos (mediana, varianza y coeficiente de sesgo) y cuantiles ($T = 10, 100$ y 500 años) calculados con simulaciones de Monte Carlo (MC) para precipitación diaria máxima anual mediante el modelo SQRT-R para el modelo "10_ICH-RCA" en relación al periodo de impacto 2041-2070 y RCP 8.5.² ("pos" = positivo; "neg" = negativo).

² Resultados asociados a un análisis que incluía el modelo "3 MOH-RAC" en los modelos climáticos comunes para la obtención de resultados para la mayoría de modelos climáticos en la Península.

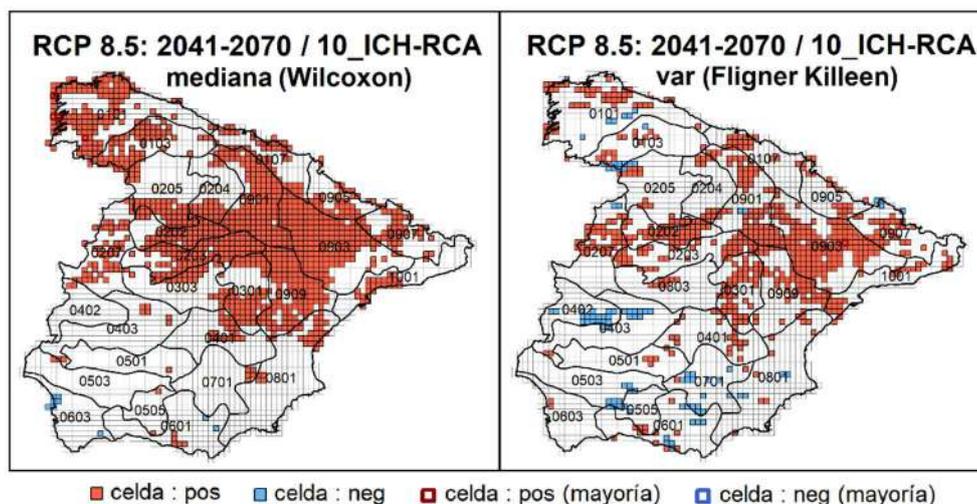


Figura 5.14. Celdas con cambios significativos en la mediana y varianza calculados mediante los test estadísticos de Wilcoxon y Fligner Killeen, respectivamente, para precipitación diaria máxima anual en la Península mediante el modelo SQRT-R para el modelo “10_ICH-RCA” en relación al periodo de impacto 2041-2070 y RCP 8.5. (“pos” = positivo; “neg”= negativo).

El especial comportamiento del modelo GEV-L, con una reducción del número de celdas con cambio significativo según aumenta el periodo de retorno, está relacionado con la gran incertidumbre asociada a la estimación de cuantiles (especialmente para altos periodos de retorno), a partir de muestras de escasa longitud, mediante dicho modelo estadístico, lo que dificulta que los cuantiles caigan fuera del intervalo de confianza de los cuantiles del periodo de control para que los cambios asociados puedan ser considerados significativos. En definitiva, al incrementarse la incertidumbre la señal de cambio climático se pierde, quedando enmascarada por la incertidumbre asociada al estadístico, por lo que ya no es posible identificar los cambios asociados a la modificación del clima. A pesar de ser las tasas de cambio superiores a las del modelo SQRT-R (en algunas celdas, y para los periodos de retorno más altos, con valores muy elevados) los cambios no pueden considerarse significativos desde un punto de vista estadístico, lo que significa que esos valores simplemente reflejan la incertidumbre de la estimación, es decir, la variabilidad en las estimaciones obtenidas a partir de diferentes muestras de una misma longitud.

Lo expuesto pone de manifiesto que el modelo estadístico concreto que se utilice para la obtención de las tasas de cambio de los cuantiles tiene una importancia crítica en los resultados, por lo que debe seleccionarse con fundamento. Como recomendación, y con objeto de identificar lo mejor posible la señal de cambio en los cuantiles debida al cambio climático, debe utilizarse aquel modelo estadístico (función de distribución y procedimiento de ajuste) que, dentro de representar correctamente el comportamiento natural de la precipitación máxima, permita estimar los cuantiles con la menor incertidumbre posible (debiendo considerarse la posibilidad de regionalizar determinados estadísticos). En aquellos casos en los que las características de la precipitación máxima permitan utilizar funciones de distribución con menos parámetros y un procedimiento de ajuste regional, será más fácil identificar el impacto del cambio climático. Por el contrario, cuando se requiera utilizar funciones más flexibles (caso de poblaciones más sesgadas) y/o no sea posible reducir la incertidumbre mediante procedimientos como la



regionalización (por falta de información o por las características propias de la precipitación máxima), la identificación de los cambios debidos a una posible modificación del clima será mucho más complicada.

Por consiguiente, el modelo GEV-L no permite identificar con rigor los cambios en los cuantiles como consecuencia del cambio climático, al menos, para periodos de retorno altos. En [MITECO \(2018\)](#), con objeto de identificar aquellas celdas con un mayor impacto del cambio climático que permitiese tener en cuenta este fenómeno en los PGRI de una manera conservadora, se decidió adoptar un valor más alto para el nivel de significancia ($\alpha \approx 0.33$), lo que permite seleccionar aquellas celdas donde posiblemente el efecto del cambio climático será más acusado. Los resultados obtenidos por el modelo GEV-L para ese nivel de significancia en este trabajo, en relación al segundo periodo de impacto (2041-2070) y $T = 100$ años, son similares a los obtenidos en [MITECO \(2018\)](#), siendo las diferencias debidas a que el conjunto de modelos climáticos empleado no es exactamente el mismo ([Figura 5.15](#)). Los resultados obtenidos en [MITECO \(2018\)](#) (i.e., para GEV-L y $\alpha \approx 0.33$) presentan diferencias respecto a los obtenidos a partir del modelo SQRT-R ($\alpha = 0.10$), tal y como se ha comentado anteriormente al comparar los resultados del modelo SQRT-R y GEV-L: el modelo SQRT-R está asociado con cuantiles menos extremos, un rango más estrecho de las tasas de cambio medias significativas, un mayor porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos y una mayor homogeneidad espacial ([Figura 5.15](#)). Sin embargo, existen ciertas similitudes respecto a las zonas en las que ambos modelos estadísticos identifican tasas de cambio medias significativas altas: una zona situada en el centro-noroeste de la Península para el escenario RCP 4.5, y tres zonas situadas en el centro y noreste de la Península para el escenario RCP 8.5.

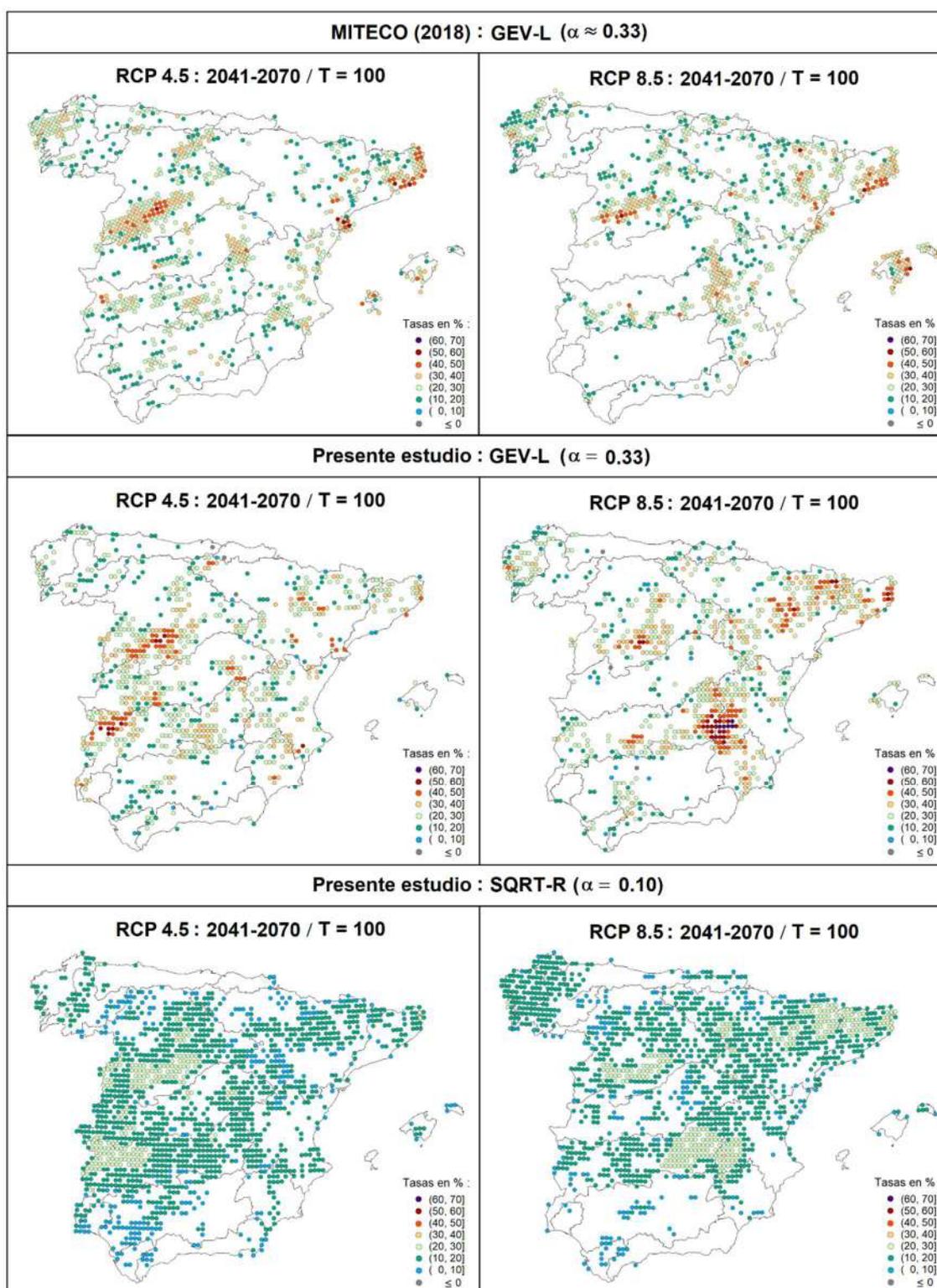


Figura 5.15. Comparación de las tasas de cambio en cuantil medias significativas en la Península y Baleares obtenidas en MITECO (2018) (GEV-L con $\alpha \approx 0.33$, con cambios significativos si al menos la mitad de los 12 primeros modelos climáticos en Tabla 2.1 identifican cambio) y en el presente estudio (GEV-L con $\alpha = 0.33$ y SQRT-R con $\alpha = 0.10$, con cambios significativos si la mayoría de modelos climáticos comunes identifican cambio) para precipitación diaria máxima anual para el periodo de impacto 2041-2070, $T = 100$ años y escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados del presente trabajo se representan una vez transformados a rejilla regular con el fin de facilitar la comparación.



Al aplicar la metodología indicada, basada en la identificación de celdas con cambios significativos en base a los resultados de la mayoría de modelos climáticos, puede existir un número reducido de celdas donde para determinados casos particulares, la tasa de cambio media presente un valor negativo aun teniendo asociado un cambio en cuantil significativo positivo, o un valor positivo aun teniendo asociado un cambio en cuantil significativo negativo. Esto es debido al hecho de que los cambios en la celda se consideran significativos si lo son para la mayoría de modelos climáticos comunes, mientras que todos los modelos climáticos comunes se emplean en el cálculo de la tasa de cambio media para tener en cuenta la mayor cantidad de información posible. En la práctica, la tasa de cambio en cuantil media asociada a estas celdas puede considerarse como no significativa, asignándole un valor de cero. En este estudio se ha identificado una celda con este tipo de inconsistencia para $\alpha = 0.10$ en relación al modelo SQRT-R para “RCP 4.5: 2041-2070” y $T = 500$ años (región “0603”). En el caso del modelo GEV-L, se ha identificado un máximo de tres celdas dependiendo del periodo de impacto y escenario para $\alpha = 0.33$.

La **Tabla 5.10** muestra los rangos de las tasas de cambio medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R para la Península y Baleares, así como para el modelo GEV-L para toda la zona de estudio. De forma consistente con los resultados asociados a las tasas de cambio medias, el rango de las tasas de cambio medias significativas para el modelo GEV-L (-18%, 165%) es más amplio que para el modelo SQRT-R (-10%, 47%). La **Tabla 5.11** muestra los valores medios de dichas tasas de cambio medias significativas, así como de los percentiles 10 y 90 asociados con el fin de ilustrar su incertidumbre. Por ejemplo, para “RCP 8.5: 2071-2100” y $T = 500$ años, la media de la tasa de cambio en cuantil media significativa del modelo SQRT-R en la Península y Baleares es 26%, con un rango de variabilidad de [2%, 51%], y para el modelo GEV-L en toda la zona de estudio es 80%, con un rango de variabilidad de [-14%, 177%].

Tabla 5.10. Tasas de cambio en cuantil medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ (expresadas en %) resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$): Península y Baleares						GEV-L ($\alpha = 0.10$): zona de estudio					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2011-2040	3	17	3	20	4	21	5	20	17	54	39	108
RCP 4.5: 2041-2070	-8	24	0*	31	1	34	8	26	14	59	29	155
RCP 4.5: 2071-2100	3	26	2	33	2	37	7	31	12	80	38	159
RCP 8.5: 2011-2040	-4	22	2	27	2	29	5	23	-18	57	34	107
RCP 8.5: 2041-2070	4	25	3	31	4	35	7	32	13	74	27	140
RCP 8.5: 2071-2100	-10	35	2	43	3	47	9	38	10	78	22	165



Tabla 5.11. Valor medio de las tasas de cambio en cuantil significativas (sin inconsistencias) asociadas a la media y a los percentiles 10 y 90 (expresadas en %), resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	Valor	SQRT-R ($\alpha = 0.10$): Península y Baleares			GEV-L ($\alpha = 0.10$): zona de estudio		
		T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	Percentil 10	-7	-8	-8	-7	-17	-25
	Media	10	11	12	13	34	67
	Percentil 90	25	29	31	30	79	152
RCP 4.5: 2041-2070	Percentil 10	-2	-4	-5	-4	-14	-23
	Media	13	15	16	16	36	68
	Percentil 90	28	33	36	34	83	162
RCP 4.5: 2071-2100	Percentil 10	-3	-4	-5	-3	-13	-21
	Media	13	15	17	17	40	74
	Percentil 90	28	34	38	35	88	167
RCP 8.5: 2011-2040	Percentil 10	-4	-6	-7	-3	-14	-18
	Media	11	12	12	15	35	69
	Percentil 90	24	27	29	30	80	151
RCP 8.5: 2041-2070	Percentil 10	-3	-4	-5	-3	-12	-19
	Media	14	16	17	17	40	72
	Percentil 90	30	36	39	36	92	165
RCP 8.5: 2071-2100	Percentil 10	1	2	2	0	-6	-14
	Media	18	23	26	21	45	80
	Percentil 90	37	46	51	42	97	177

A continuación se lleva a cabo el análisis de la significancia de los cambios en cuantil a nivel de región para el modelo SQRT-R. Se recuerda que la significancia regional no se evalúa para el modelo GEV-L debido a su carácter local y a la heterogeneidad espacial de sus resultados, que aumenta al aumentar el periodo de retorno y puede apreciarse en las Figuras 5.3 y 5.4. Considerando los resultados de los modelos climáticos comunes de forma individual, el número de regiones en la Península y Baleares que para el modelo SQRT-R presenta cambios significativos positivos consistentes para $\alpha = 0.10$ oscila entre 4 y 27 regiones, mientras que el asociado con cambios significativos negativos consistentes oscila entre 0 y 13 regiones. Por lo tanto, hay un mayor número de regiones con cambios en cuantil significativos positivos que negativos. Asimismo, se observa una gran variabilidad en los resultados de los diferentes modelos climáticos. Se recuerda que hay un total de 27 regiones en la Península y Baleares, y que el cambio significativo en una región se considera consistente cuando únicamente es significativo para uno de los dos signos (positivo o negativo).

Existe coherencia en los modelos climáticos que proporcionan el mayor o menor número de regiones con cambios significativos consistentes para $\alpha = 0.10$, en relación a los resultados correspondientes a nivel de celda: (i) el modelo climático “8_IPS-RCA” está asociado al menor número de regiones con cambios significativos positivos consistentes (i.e., 4 regiones) y al mayor número de regiones con cambios significativos negativos consistentes (i.e., 13 regiones), (ii) el modelo climático “10_ICH-RCA” está asociado al mayor número de regiones con cambios significativos positivos (i.e., 27 regiones) y (iii) diversos modelos climáticos (entre los que figura



el modelo climático “10_ICH-RCA”) están asociados al menor número de regiones con cambios significativos negativos consistentes (i.e., ninguna región).

La identificación del número de regiones en la Península y Baleares con cambios significativos para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R se muestra en la [Tabla 5.12](#). La significancia del cambio en cuantil para $\alpha = 0.10$ en base a los resultados de la mayoría de modelos climáticos comunes (a nivel de celda para el modelo GEV-L, y tanto a nivel de celda como de región para el modelo SQRT-R) se incorpora en los mapas de tasas de cambio en cuantil medias para precipitación máxima anual. En particular, los mapas completos asociados con el modelo SQRT-R para la Península y Baleares (escenario RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente) se muestran en las [Figuras 5.1 y 5.2](#), y los mapas asociados con el modelo GEV-L para toda la zona de estudio (escenario RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente) en las [Figuras 5.3 y 5.4](#). Los mapas de tasas de cambio medias para toda la zona de estudio, indicando cambios en cuantil significativos a nivel de celda para $\alpha = 0.33$ para el modelo GEV-L, se incluyen en el [Anexo nº 7](#) ([Figuras A7.1 y A7.2](#)).

Tabla 5.12. Número de regiones en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación diaria máxima anual para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes. (Número de regiones con cambios consistentes entre paréntesis).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$)					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	+	-	+	-	+	-
RCP 4.5: 2011-2040	20 (20)	0 (0)	22 (22)	0 (0)	22 (22)	1 (1)
RCP 4.5: 2041-2070	25 (23)	2 (0)	26 (26)	0 (0)	26 (26)	0 (0)
RCP 4.5: 2071-2100	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)	27 (26)	1 (0)
RCP 8.5: 2011-2040	17 (17)	0 (0)	19 (19)	0 (0)	19 (19)	0 (0)
RCP 8.5: 2041-2070	23 (22)	1 (0)	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)
RCP 8.5: 2071-2100	26 (24)	3 (1)	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)

Como resultado, el modelo SQRT-R identifica un número reducido de regiones con cambios en cuantil significativos negativos consistentes ([Tabla 5.12](#); [Figuras 5.1 y 5.2](#)): la región “0101” en el noroeste de la Península para “RCP 4.5: 2011-2040” y $T = 500$ años y la región “0603” en el sur de la Península para “RCP 8.5: 2071-2100” y $T = 10$ años. El número de regiones con cambios en cuantil significativos positivos consistentes identificadas por el modelo SQRT-R es de 17 a 27 regiones ([Tabla 5.12](#)), siendo su localización la siguiente ([Figuras 5.1 y 5.2](#)):

- “RCP 4.5: 2011-2040”: Península y Baleares, salvo regiones en el sur, y la región “0101” en el noroeste para $T = 500$ años.
- “RCP 4.5: 2041-2070”: Península y Baleares, salvo la región “0107” en el norte, y regiones en el sur y sureste para $T = 10$ años.
- “RCP 4.5: 2071-2100”: Península y Baleares, salvo la región “0103” en el noroeste para $T = 500$ años.
- “RCP 8.5: 2011-2040”: Península, salvo regiones en el norte, oeste, centro y sur.
- “RCP 8.5: 2041-2070”: Península y Baleares, salvo regiones en el sur y este para $T = 10$ años.



- “RCP 8.5: 2071-2100”: Península y Baleares, salvo regiones en el sur y sureste para $T = 10$ años.

Tasas de cambio en cuantil en rejilla regular (capas en formato ASCII)

Como resultado del análisis expuesto, se generan capas de tasas de cambio en cuantil medias, asociadas a los percentiles 10 y 90, así como medias significativas en formato ASCII (ver descripción en [Anexo nº 8](#)). Estas capas se proporcionan, en base a los modelos climáticos comunes, para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en la Península y Baleares, así como para el modelo GEV-L para $\alpha = 0.10$ y 0.33 en toda la zona de estudio. Se recomienda utilizar para su aplicación práctica las tasas de cambio medias significativas obtenidas mediante el modelo SQRT-R, ya que, como se ha indicado anteriormente, el modelo GEV-L no permite una correcta identificación de los cambios en cuantil debidos al cambio climático, especialmente aquellos correspondientes a los mayores periodos de retorno.

Para ello se procede a la transformación de las tasas de cambio medias obtenidas en rejilla rotada a rejilla regular, así como a la posterior extracción de las tasas de cambio medias significativas (sin inconsistencias) en dicha rejilla regular ([sección 5.2.6](#)). Como ilustración, la [Figura 5.16](#) muestra la transformación de rejilla rotada a rejilla regular de las tasas de cambio en cuantil medias para los modelos SQRT-R y GEV-L para el caso “RCP 4.5: 2071-2100” y $T = 100$ años.

El rango de las tasas de cambio medias en rejilla rotada y en rejilla regular se muestra para el modelo SQRT-R respecto a la Península y Baleares en la [Tabla 5.13](#), y para el modelo GEV-L respecto a toda la zona de estudio en la [Tabla 5.14](#). Los rangos asociados a ambas rejillas son similares para el modelo SQRT-R, así como para el modelo GEV-L para $T = 10$ años, mientras que su diferencia aumenta a medida que aumenta el periodo de retorno para el modelo GEV-L debido a la heterogeneidad espacial y magnitud de sus resultados.



CEDEX

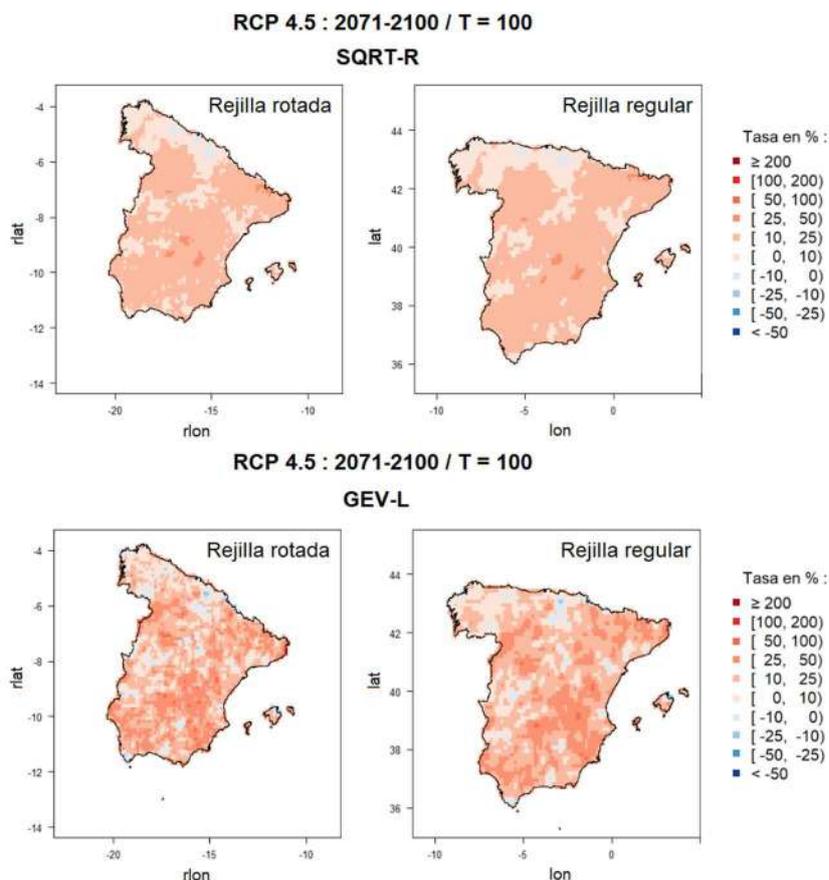


Figura 5.16. Transformación de rejilla rotada a rejilla regular de las tasas de cambio en cuantil medias obtenidas en base al uso de los modelos climáticos comunes para precipitación diaria máxima anual en relación al periodo de impacto 2071-2100, escenario RCP 4.5 y T = 100 años para el modelo SQRT-R en la Península y Baleares, y para el modelo GEV-L en toda la zona de estudio.

Tabla 5.13. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) en rejilla rotada y en rejilla regular en la Península y Baleares, resultantes del ajuste del modelo SQRT-R para precipitación diaria máxima anual en base a la mayoría de modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R : rejilla rotada (0.11°)						SQRT-R : rejilla regular (0.125°)					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2011-2040	-9	17	-9	20	-10	21	-7	15	-7	18	-7	20
RCP 4.5: 2041-2070	-9	24	-7	31	-8	34	-8	23	-7	29	-7	33
RCP 4.5: 2071-2100	-9	26	-6	33	-4	37	-6	24	-3	31	-3	34
RCP 8.5: 2011-2040	-8	22	-8	27	-9	29	-6	22	-7	26	-7	29
RCP 8.5: 2041-2070	-8	25	-6	31	-5	35	-6	24	-4	31	-2	35
RCP 8.5: 2071-2100	-11	35	-6	43	-4	47	-9	34	-4	42	-2	45



Tabla 5.14. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) en rejilla rotada y en rejilla regular en toda la zona de estudio, resultantes del ajuste del modelo GEV-L para precipitación diaria máxima anual en base a la mayoría de modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	GEV-L : rejilla rotada (0.11°)						GEV-L : rejilla regular (0.125°)					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2011-2040	-10	20	-23	57	-35	142	-8	18	-20	50	-29	101
RCP 4.5: 2041-2070	-10	26	-23	74	-32	155	-9	25	-20	57	-28	123
RCP 4.5: 2071-2100	-13	31	-19	80	-27	177	-10	29	-11	62	-17	136
RCP 8.5: 2011-2040	-10	23	-22	67	-35	157	-7	22	-17	55	-28	110
RCP 8.5: 2041-2070	-12	32	-17	74	-25	170	-9	29	-14	63	-21	115
RCP 8.5: 2071-2100	-13	38	-25	92	-33	211	-9	37	-18	76	-23	168

Precipitación convectiva diaria máxima anual

El rango de las tasas de cambio en cuantil medias para precipitación convectiva diaria máxima anual para la Península y Baleares considerando los modelos climáticos comunes (Tabla 5.15) es más amplio para el modelo GEV-L (-37%, 230%) que para el modelo SQRT-R (-16%, 61%). Lo mismo ocurre con la media de dichos valores, que aumenta con el periodo de impacto y el periodo de retorno para ambos modelos estadísticos (y también para el escenario RCP 8.5 frente al RCP 4.5), y cuyo rango es (4%, 34%) para el modelo GEV-L y (3%, 19%) para el modelo SQRT-R.

La identificación del porcentaje de celdas en la Península y Baleares con cambio significativo para la mayoría de modelos climáticos comunes se muestra en la Tabla 5.16. Esta tabla presenta resultados para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R, así como para $\alpha = 0.10$ y 0.33 para el modelo GEV-L. Ambos modelos estadísticos identifican un número reducido de celdas con cambios en cuantil significativos negativos, asociadas a zonas puntuales mayormente localizadas en el sur, sureste y norte peninsular. Para $\alpha = 0.10$, el porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos positivos aumenta con el periodo de impacto, y también con el escenario, para ambos modelos estadísticos, y es mayor para el modelo SQRT-R (3% a 68%) que para el GEV-L (0*% a 16%) (0*% indica un porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0). Dichas diferencias aumentan con el periodo de retorno, ya que el porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos positivos aumenta con el periodo de retorno para el modelo SQRT-R y disminuye con el periodo de retorno para el modelo GEV-L, de manera similar y por las mismas razones que en el caso de la precipitación diaria máxima anual. La Tabla 5.17 muestra los rangos de las tasas de cambio medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R para la Península y Baleares, así como para el modelo GEV-L para toda la zona de estudio. De forma consistente con los resultados asociados a las tasas de cambio medias, el rango de las tasas de cambio medias significativas para el modelo GEV-L (6%, 230%) es más amplio que para el modelo SQRT-R (-16%, 61%).



Tabla 5.15. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación convectiva diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	Valor	SQRT-R			GEV-L		
		T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	mín	-16	-16	-16	-17	-27	-37
	med	3	4	5	4	8	16
	máx	27	30	31	31	79	156
RCP 4.5: 2041-2070	mín	-9	-7	-8	-11	-19	-26
	med	7	9	10	8	14	24
	máx	28	33	36	36	72	139
RCP 4.5: 2071-2100	mín	-16	-14	-13	-16	-26	-37
	med	8	11	13	9	17	28
	máx	34	38	40	36	80	149
RCP 8.5: 2011-2040	mín	-11	-11	-10	-12	-20	-31
	med	4	6	6	5	10	19
	máx	34	38	40	37	72	157
RCP 8.5: 2041-2070	mín	-8	-7	-7	-9	-20	-29
	med	8	12	13	9	17	27
	máx	43	52	55	48	107	202
RCP 8.5: 2071-2100	mín	-15	-12	-11	-19	-18	-25
	med	11	16	19	12	22	34
	máx	50	57	61	56	132	230

Para el modelo SQRT-R, las zonas donde se localizan principalmente las celdas con cambios significativos positivos en los cuantiles corresponden al centro y noreste peninsular, y a las Islas Baleares, extendiéndose a gran parte del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, y en mayor medida para el escenario RCP 8.5 que para el RCP 4.5, excepto a amplias zonas del sur, sureste, norte y noroeste peninsular. Estos resultados coinciden con los presentados en la **sección 4** en señalar al Pirineo oriental como la zona donde aumentarán en mayor medida las precipitaciones máximas de carácter convectivo, y en no predecir cambios significativos para este tipo de precipitación en el sureste peninsular, donde los fenómenos convectivos suelen ser el origen de los mayores eventos de precipitación. Sin embargo, los cambios en cuantil obtenidos sí predicen incrementos significativos en zonas costeras del noreste y levante peninsular, así como en las Islas Baleares (donde ya se predecían en la **sección 4** cambios relevantes en la varianza), principalmente para el escenario RCP 8.5, zonas en las que las precipitaciones convectivas tienen también un papel muy relevante en la generación de las precipitaciones máximas.

La identificación del número de regiones en la Península y Baleares con cambios significativos para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R se muestra en la **Tabla 5.18**. El número de regiones con cambios en cuantil significativos negativos consistentes es reducido (de 0 a 3 regiones), mientras que el número de regiones con cambios en cuantil significativos positivos consistentes es de 17 a 26 regiones.



Tabla 5.16. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-“) respecto a la precipitación convectiva diaria máxima anual para la mayoría de modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$)						GEV-L ($\alpha = 0.10$)						GEV-L ($\alpha = 0.33$)					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
RCP 4.5: 2011-2040	3	0*	8	0*	10	0	1	0	1	0	0*	0	10	0*	6	0*	5	0*
RCP 4.5: 2041-2070	11	0	25	0	33	0	4	0	2	0	1	0	25	0*	13	0*	9	0*
RCP 4.5: 2071-2100	18	0	35	0	43	0	8	0	3	0	2	0	32	0*	19	0*	13	0*
RCP 8.5: 2011-2040	4	0*	11	0	15	0	2	0	1	0	1	0	13	0*	8	0*	7	0*
RCP 8.5: 2041-2070	19	0	39	0	48	0	9	0	3	0	2	0	30	0	17	0	12	0*
RCP 8.5: 2071-2100	33	0*	59	0	68	0	16	0	5	0	3	0	45	0*	24	0*	16	0*

Tabla 5.17. Tasas de cambio en cuantil medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ (expresadas en %) resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación convectiva diaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$): Península y Baleares						GEV-L ($\alpha = 0.10$): zona de estudio					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2011-2040	-16	27	-7	30	4	31	7	31	20	63	34	119
RCP 4.5: 2041-2070	4	28	6	33	5	36	7	36	13	58	39	104
RCP 4.5: 2071-2100	5	34	4	38	3	40	6	36	20	80	40	149
RCP 8.5: 2011-2040	-11	34	4	38	5	40	6	37	25	72	39	157
RCP 8.5: 2041-2070	5	43	5	52	3	55	9	48	16	73	20	202
RCP 8.5: 2071-2100	-11	50	2	57	3	61	8	56	20	132	29	230

Tabla 5.18. Número de regiones en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-“) respecto a la precipitación convectiva diaria máxima anual para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes. (Número de regiones con cambios consistentes entre paréntesis).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$)					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	+	-	+	-	+	-
RCP 4.5: 2011-2040	21 (20)	3 (2)	22 (21)	4 (3)	23 (21)	2 (0)
RCP 4.5: 2041-2070	23 (21)	3 (1)	25 (25)	0 (0)	25 (25)	0 (0)
RCP 4.5: 2071-2100	26 (25)	2 (1)	27 (26)	1 (0)	27 (26)	1 (0)
RCP 8.5: 2011-2040	18 (17)	1 (0)	21 (21)	0 (0)	22 (22)	0 (0)
RCP 8.5: 2041-2070	26 (25)	1 (0)	26 (26)	0 (0)	26 (26)	0 (0)
RCP 8.5: 2071-2100	27 (24)	3 (0)	27 (26)	1 (0)	27 (26)	1 (0)

Los mapas de tasas de cambio en cuantil medias para precipitación convectiva diaria máxima anual indicando significancia para $\alpha = 0.10$ en base a los resultados de la mayoría de modelos

climáticos comunes (a nivel de celda para el modelo GEV-L, y tanto a nivel de celda como de región para el modelo SQRT-R) se muestran en las Figuras 5.17 a 5.20. Los mapas de tasas de cambio medias para toda la zona de estudio, indicando cambios en cuantil significativos a nivel de celda para $\alpha = 0.33$ para el modelo GEV-L se incluyen en el Anexo nº 7 (Figuras A7.3 y A7.4).

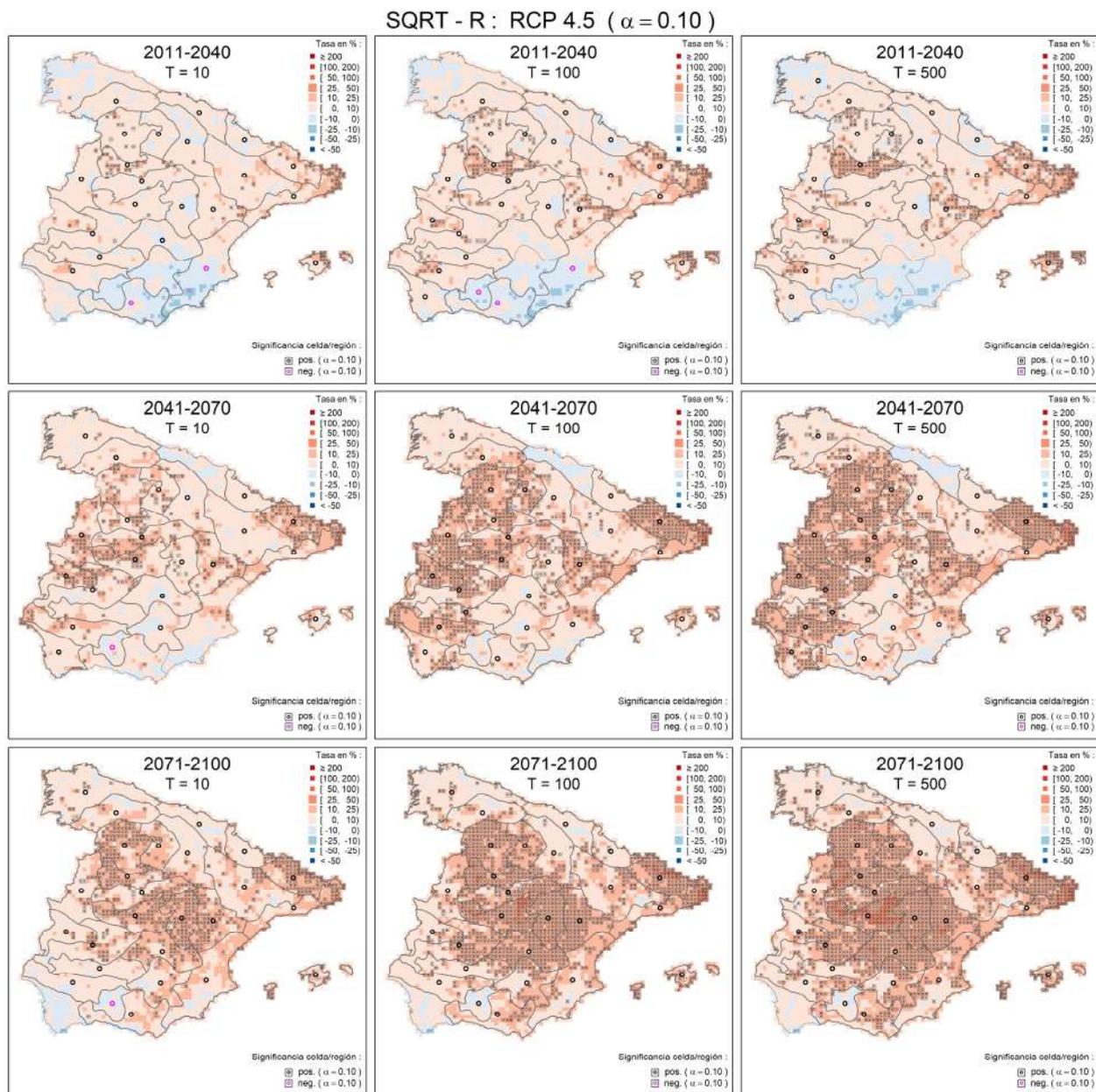


Figura 5.17. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5.

SQRT - R : RCP 8.5 ($\alpha = 0.10$)

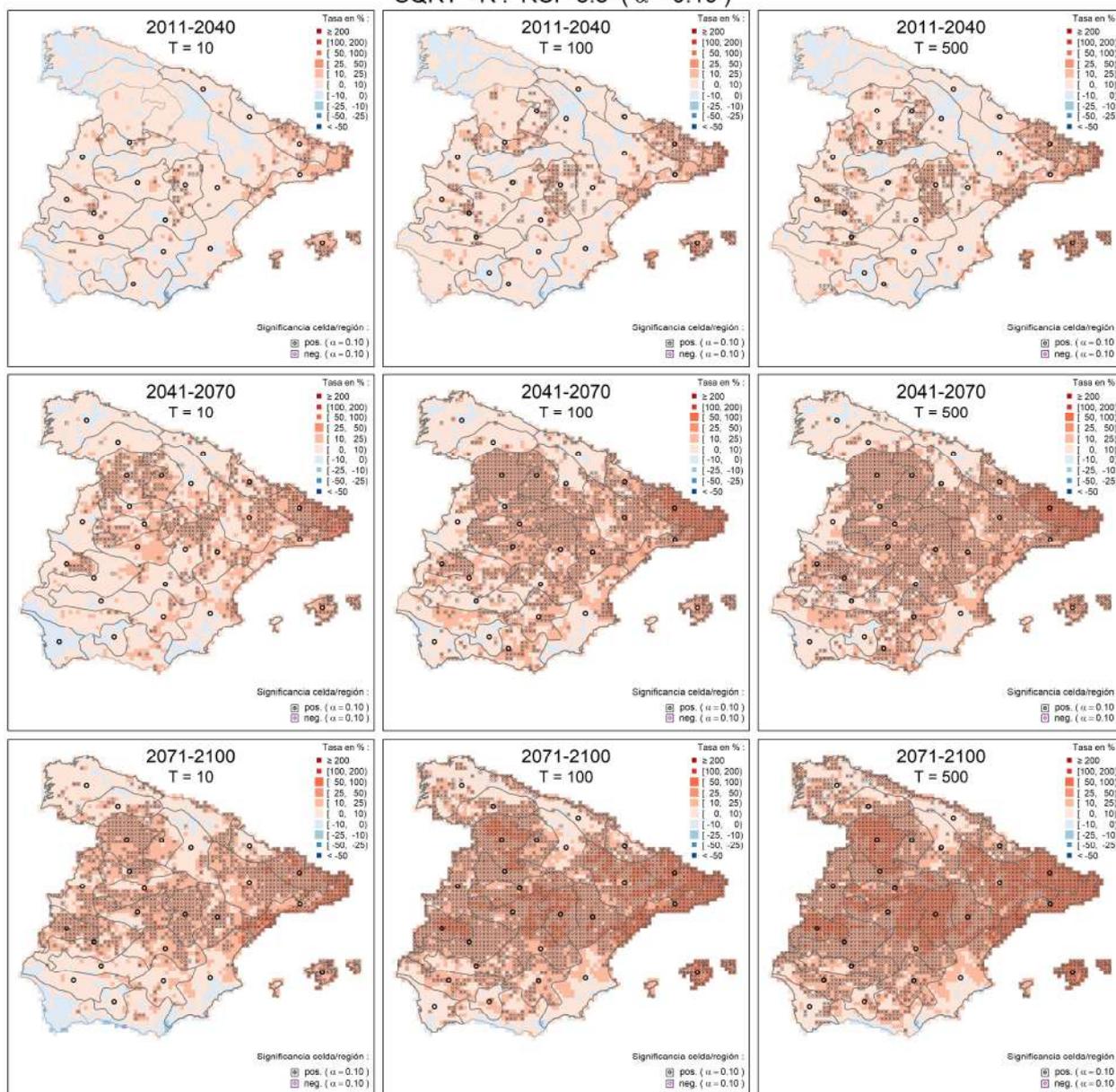


Figura 5.18. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5.

GEV - L : RCP 4.5 ($\alpha = 0.10$)

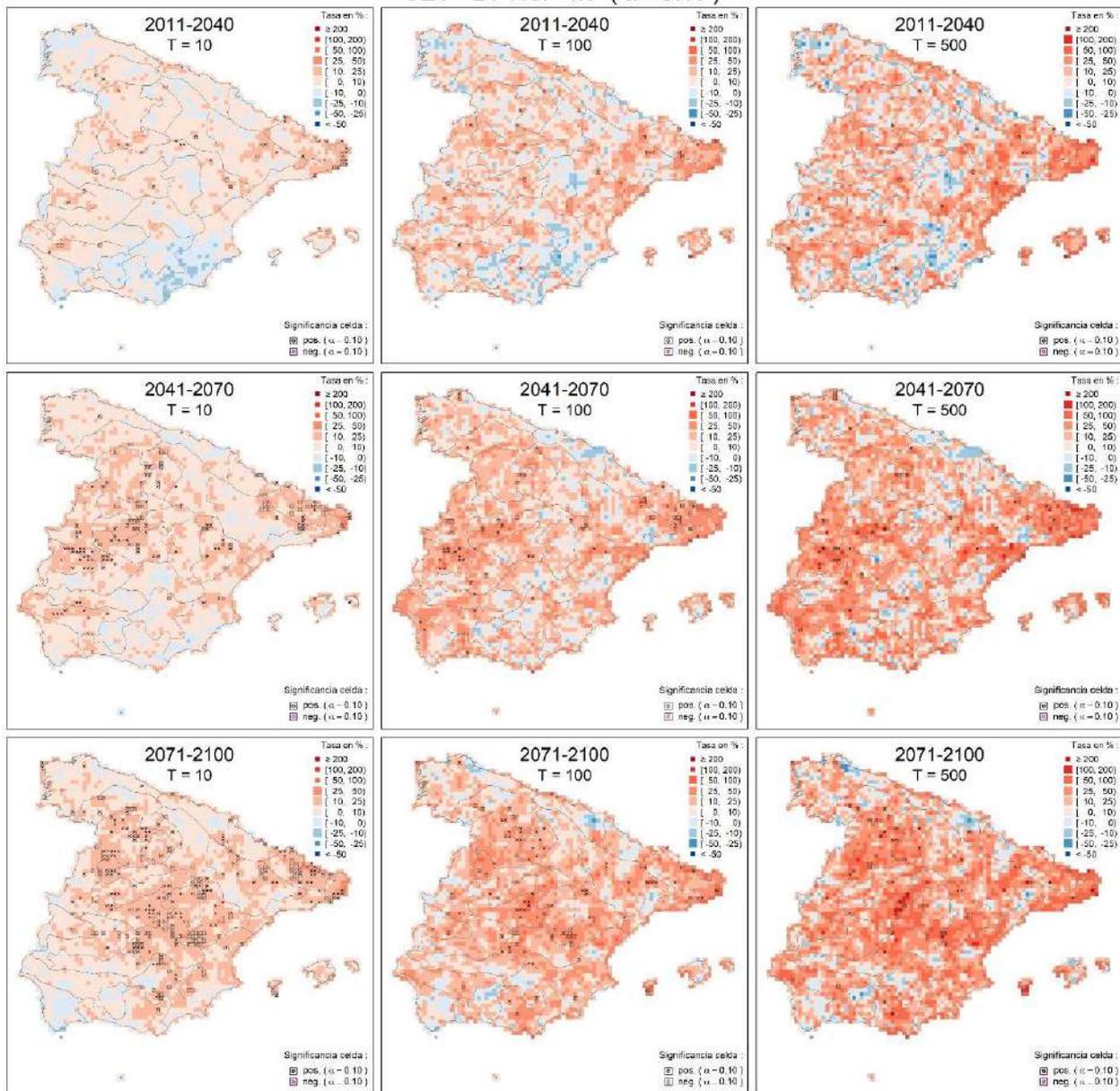


Figura 5.19. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

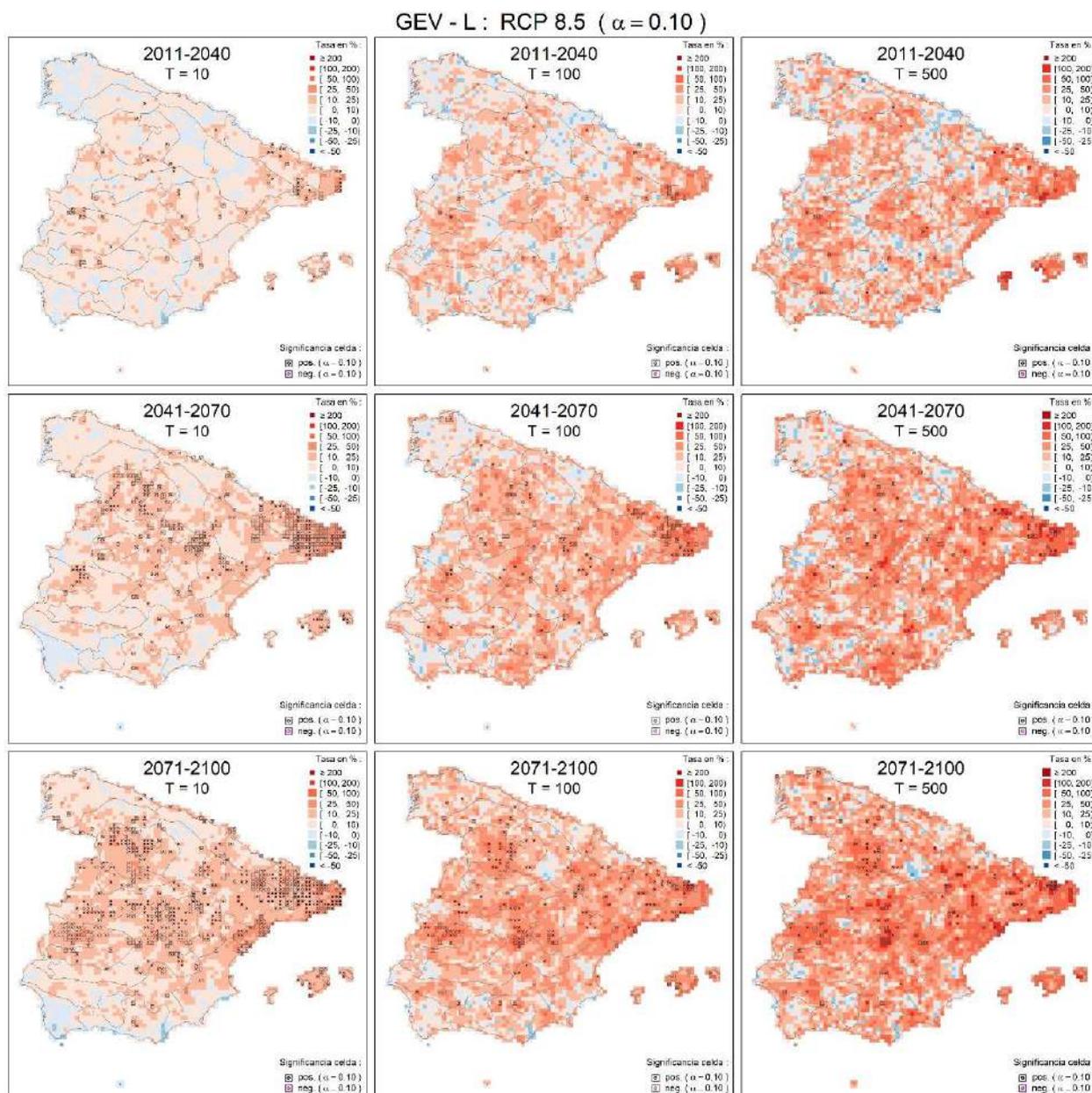


Figura 5.20. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

Precipitación horaria máxima anual

El rango de las tasas de cambio en cuantil medias para precipitación horaria máxima anual para la Península y Baleares considerando los modelos climáticos comunes (Tabla 5.19) es más amplio para el modelo GEV-L (-55%, 414%) que para el modelo SQRT-R (-19%, 75%). Lo mismo ocurre con la media de dichos valores, que aumenta con el periodo de impacto y el periodo de retorno para ambos modelos estadísticos (y también, en general, con el escenario RCP 8.5 respecto al RCP 4.5), y cuyo rango es (10%, 70%) para el modelo GEV-L y (9%, 38%) para el modelo SQRT-R.



La identificación del porcentaje de celdas en la Península y Baleares con cambio significativo para la mayoría de modelos climáticos comunes se muestra en la [Tabla 5.20](#). Esta tabla presenta resultados para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R, así como para $\alpha = 0.10$ y 0.33 para el modelo GEV-L. Ambos modelos estadísticos identifican un número reducido de celdas con cambios en cuantil significativos negativos, en zonas muy puntuales del norte y sur peninsular asociadas fundamentalmente al primer periodo de impacto. Para $\alpha = 0.10$, el porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos positivos aumenta con el periodo de impacto y también, en general, con el escenario para ambos modelos estadísticos, y es mayor para el modelo SQRT-R (27% a 98%) que para el GEV-L (7% a 67%). Dichas diferencias aumentan con el periodo de retorno, ya que el porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos positivos aumenta con el periodo de retorno para el modelo SQRT-R y disminuye con el periodo de retorno para el modelo GEV-L, de manera similar y por las mismas razones que en el caso de la precipitación diaria y convectiva diaria máxima anual. La [Tabla 5.21](#) muestra los rangos de las tasas de cambio medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R para la Península y Baleares, así como para el modelo GEV-L para toda la zona de estudio. De forma consistente con los resultados asociados a las tasas de cambio medias, el rango de las tasas de cambio medias significativas para el modelo GEV-L (-51%, 414%) es más amplio que para el modelo SQRT-R (-10%, 75%).

Para el modelo SQRT-R, las zonas donde se localizan principalmente las celdas con cambios significativos positivos en los cuantiles para $T = 10$ años y el primer periodo de impacto corresponden al centro (en mayor medida en la parte occidental que en la oriental) y noreste peninsular, alcanzando también a algunas zonas del sur y sureste. Estas zonas se extienden a prácticamente la totalidad del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, con ligeras diferencias en el patrón espacial entre el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5. En relación a los resultados obtenidos para la precipitación diaria máxima anual, se observa cómo los cambios significativos para la precipitación horaria afectan a una mayor extensión de territorio, destacando un mayor número de celdas con cambios en el sur y sureste peninsular e Islas Baleares para ambos escenarios, en el noroeste peninsular para el escenario RCP 4.5 y en la zona central occidental para el escenario RCP 8.5. Asimismo, las tasas de cambio son, en general, de mayor magnitud para la precipitación horaria que para la diaria. Para realizar estos análisis se ha confirmado que, tanto para la precipitación diaria máxima anual como para la precipitación horaria máxima anual, las tasas de cambio y celdas significativas obtenidas con los modelos climáticos indicados en la [Tabla 5.1](#) (11 modelos climáticos para la precipitación diaria máxima anual y 5 para la horaria máxima anual) son muy similares a las que se obtendrían utilizando únicamente los cuatro modelos climáticos comunes para ambas variables, por lo que los resultados obtenidos para las dos variables serían comparables, al menos, de forma aproximada.

Estos resultados son, en general, coherentes con los presentados en la [sección 4](#). Se prevé para la precipitación horaria máxima anual un patrón espacial de cambios similar al de la precipitación diaria, aunque produciéndose los cambios de una manera más intensa y generalizada. Como ya se indicó en dicha sección, los resultados obtenidos apuntan, en general, a un mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a un incremento de la torrencialidad.



La identificación del número de regiones en la Península y Baleares con cambios significativos para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R se muestra en la [Tabla 5.22](#). No se identifica ninguna región con cambios en cuantil significativos negativos consistentes, mientras que el número de regiones con cambios en cuantil significativos positivos consistentes es de 22 a 27 regiones.

Los mapas de tasas de cambio en cuantil medias para precipitación horaria máxima anual indicando significancia para $\alpha = 0.10$ en base a los resultados de la mayoría de modelos climáticos comunes (a nivel de celda para el modelo GEV-L y tanto a nivel de celda como de región para el modelo SQRT-R) se muestran en las [Figuras 5.21 a 5.24](#). Los mapas de tasas de cambio medias para toda la zona de estudio, indicando cambios en cuantil significativos a nivel de celda para $\alpha = 0.33$ para el modelo GEV-L se incluyen en el [Anexo nº 7 \(Figuras A7.5 y A7.6\)](#).

Tabla 5.19. Tasas de cambio en cuantil medias (expresadas en %) para la Península y Baleares, resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación horaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	Valor	SQRT-R			GEV-L		
		T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	mín	-13	-13	-14	-20	-41	-51
	med	10	12	13	11	22	39
	máx	51	58	61	60	180	351
RCP 4.5: 2041-2070	mín	-10	-8	-7	-17	-33	-50
	med	15	18	20	15	28	47
	máx	46	53	56	53	149	336
RCP 4.5: 2071-2100	mín	-5	-5	-5	-10	-35	-53
	med	20	24	25	20	34	55
	máx	48	52	55	56	150	383
RCP 8.5: 2011-2040	mín	-18	-18	-19	-23	-41	-51
	med	9	10	11	10	19	35
	máx	38	39	41	45	141	325
RCP 8.5: 2041-2070	mín	-7	-6	-6	-12	-36	-53
	med	16	19	21	17	29	48
	máx	48	55	57	53	154	357
RCP 8.5: 2071-2100	mín	-2	6	7	-12	-38	-55
	med	29	35	38	29	47	70
	máx	62	71	75	81	186	414



Tabla 5.20. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación horaria máxima anual para la mayoría de modelos climáticos comunes. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$)						GEV-L ($\alpha = 0.10$)						GEV-L ($\alpha = 0.33$)					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
RCP 4.5: 2011-2040	30	0*	46	0	52	0	17	0	10	0*	8	0*	46	1	32	1	27	1
RCP 4.5: 2041-2070	50	0	65	0	70	0	29	0	13	0	9	0	60	0*	39	1	31	1
RCP 4.5: 2071-2100	71	0	84	0	88	0	43	0	19	0	13	0	75	0*	47	0*	38	0*
RCP 8.5: 2011-2040	27	0*	38	0	44	0	16	0*	9	0*	7	0*	43	1	28	2	24	2
RCP 8.5: 2041-2070	58	0	72	0	76	0	34	0	15	0	11	0*	66	0*	41	1	32	1
RCP 8.5: 2071-2100	90	0	96	0	98	0	67	0	29	0	18	0	90	0*	61	0*	46	0*

Tabla 5.21. Tasas de cambio en cuantil medias significativas (sin inconsistencias) para $\alpha = 0.10$ (expresadas en %) resultantes del ajuste de los modelos SQRT-R y GEV-L para precipitación horaria máxima anual en base a los modelos climáticos comunes.

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$): Península y Baleares						GEV-L ($\alpha = 0.10$): zona de estudio					
	T = 10		T = 100		T = 500		T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2011-2040	-10	51	3	58	1	61	1	60	-41	180	-51	351
RCP 4.5: 2041-2070	2	46	2	53	2	56	3	53	14	149	29	326
RCP 4.5: 2071-2100	5	48	3	52	5	55	4	56	21	144	32	316
RCP 8.5: 2011-2040	-8	38	1	39	1	41	-12	45	-32	141	-39	317
RCP 8.5: 2041-2070	3	48	4	55	4	57	6	53	16	154	-32	357
RCP 8.5: 2071-2100	6	62	7	71	7	75	9	81	21	186	38	414

Tabla 5.22. Número de regiones en la Península y Baleares que presenta cambio en cuantil significativo positivo (“+”) o negativo (“-”) respecto a la precipitación horaria máxima anual para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en base a la mayoría de modelos climáticos comunes. (Número de regiones con cambios consistentes entre paréntesis).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$)					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	+	-	+	-	+	-
RCP 4.5: 2011-2040	24 (23)	1 (0)	25 (25)	0 (0)	25 (25)	0 (0)
RCP 4.5: 2041-2070	27 (26)	1 (0)	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)
RCP 4.5: 2071-2100	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)
RCP 8.5: 2011-2040	26 (24)	2 (0)	26 (22)	4 (0)	26 (22)	4 (0)
RCP 8.5: 2041-2070	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)
RCP 8.5: 2071-2100	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)	27 (27)	0 (0)

SQRT - R : RCP 4.5 ($\alpha = 0.10$)

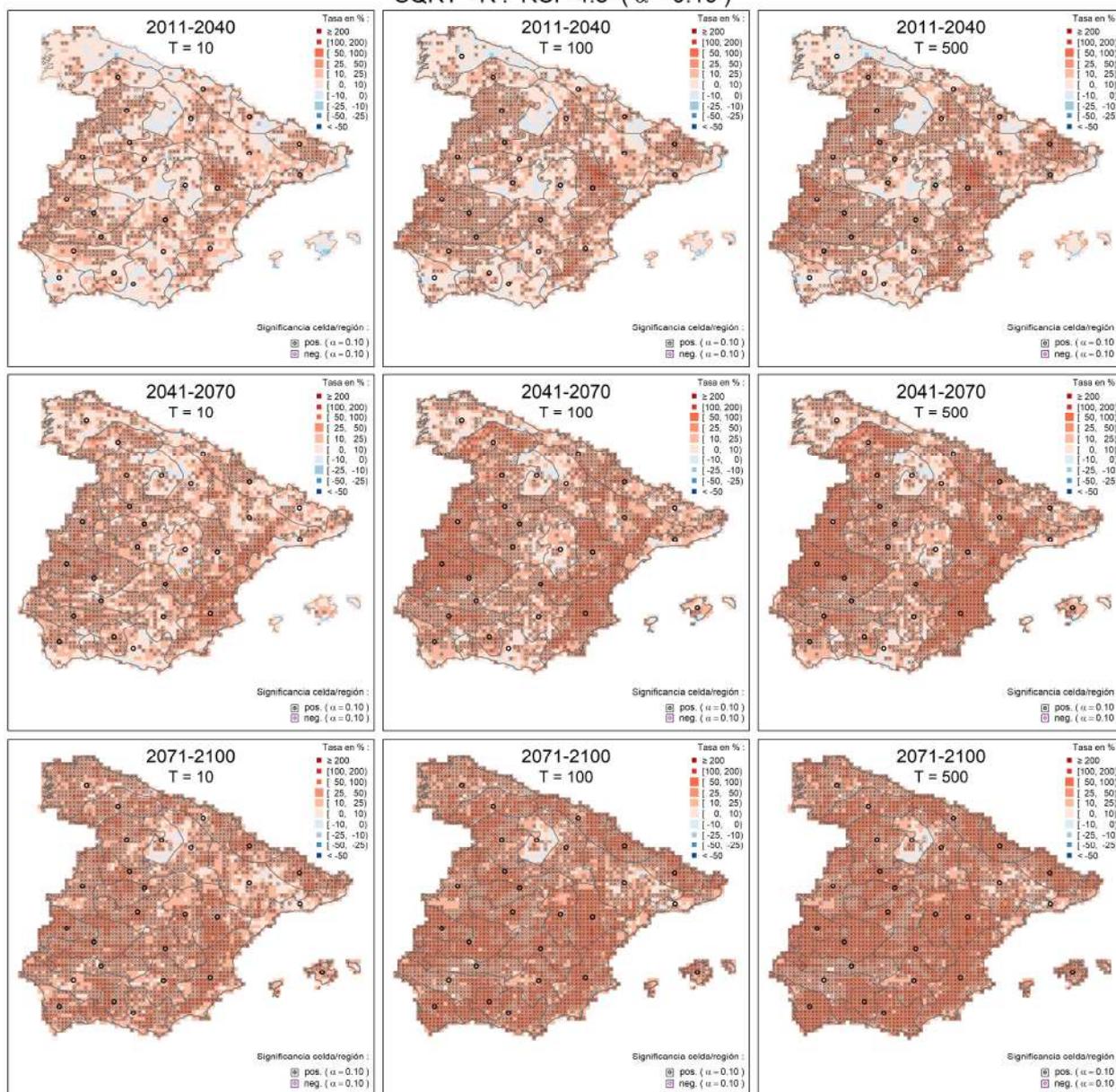


Figura 5.21. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 4.5.

SQRT - R : RCP 8.5 ($\alpha = 0.10$)

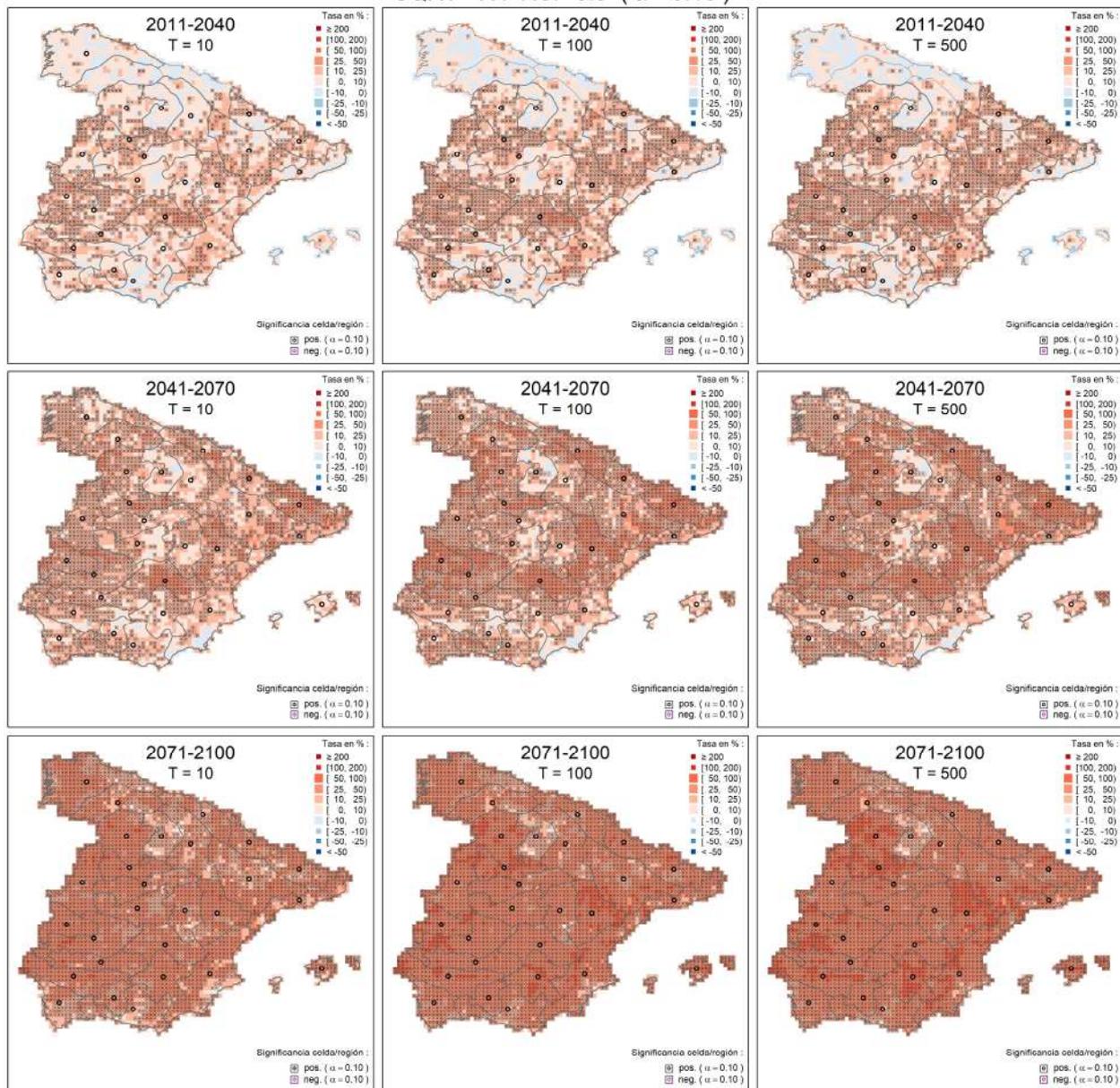


Figura 5.22. Tasas de cambio en cuantil medias en la Península y Baleares para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo SQRT-R en RCP 8.5.

GEV - L : RCP 4.5 ($\alpha = 0.10$)

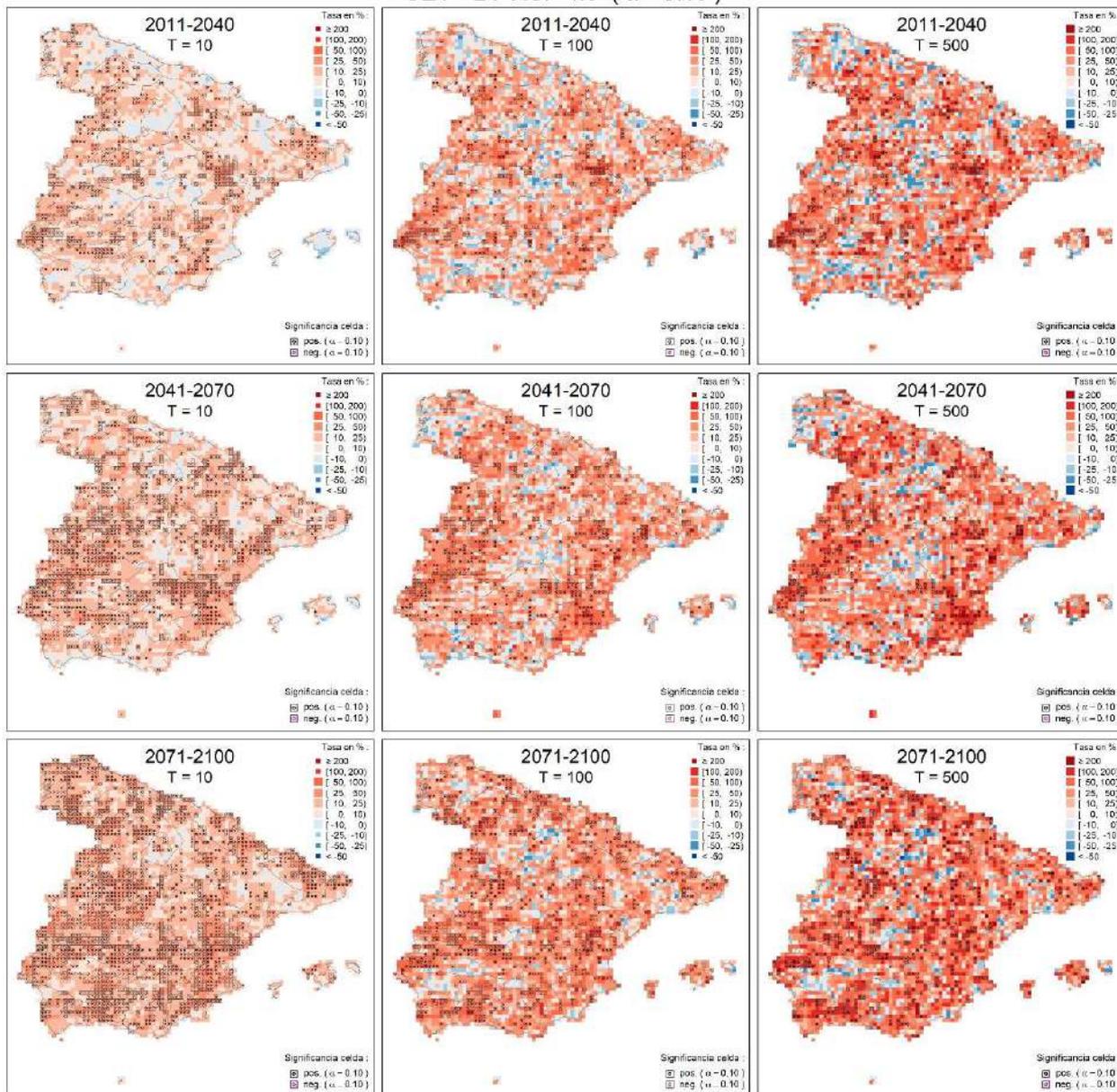


Figura 5.23. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

GEV - L : RCP 8.5 ($\alpha = 0.10$)

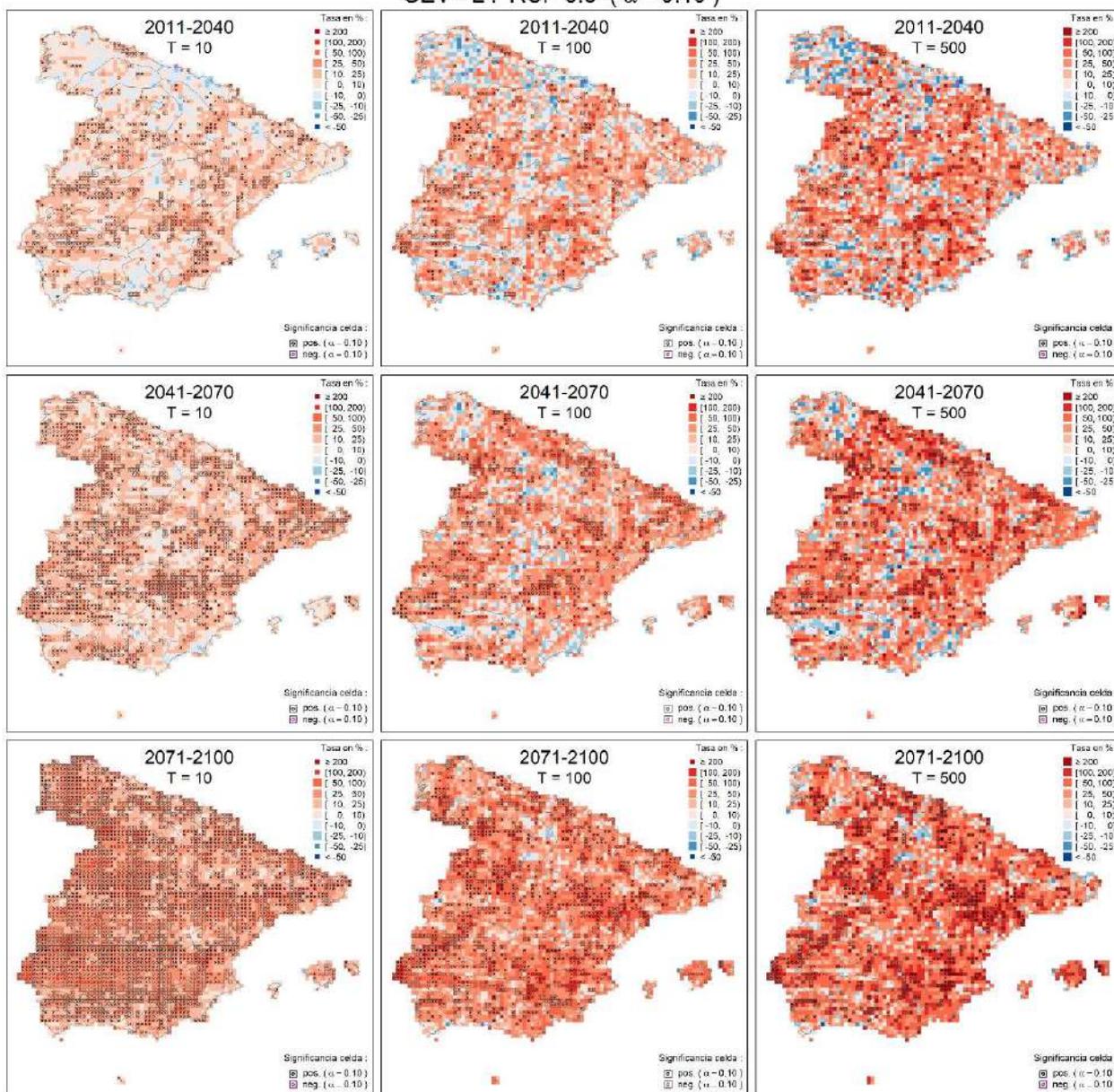


Figura 5.24. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.10$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

Cambios en el factor de torrencialidad

El análisis de los cambios en el factor de torrencialidad se lleva a cabo únicamente para el modelo SQRT-R debido a su mejor comportamiento. El porcentaje de celdas en la Península y Baleares con cambios en cuantil medios significativos para precipitación diaria máxima anual y/o precipitación horaria máxima anual, obtenido para el modelo SQRT-R en base al uso de los modelos climáticos comunes a ambas variables, se muestra en la [Tabla 5.23](#). Dichos porcentajes de celdas aumentan con el periodo de retorno, así como con el periodo de impacto, con valores que oscilan entre el 4% y el 66% en el caso de cambio significativo en ambas variables, y que abarcan entre el 25% y el 96% en el caso de cambio significativo solo en una de ellas. El cambio relativo en el factor de torrencialidad para el modelo SQRT-R en la Península y Baleares presenta



mayores valores positivos que negativos, siendo el rango (-21%, 50%). El valor máximo aumenta con el periodo de retorno (Tabla 5.24).

Tabla 5.23. Porcentaje de celdas en la Península y Baleares con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$): Península y Baleares					
	Cambios significativos en ambas variables			Cambios significativos en una o ambas variables		
	T = 10	T = 100	T = 500	T = 10	T = 100	T = 500
RCP 4.5: 2011-2040	5	11	14	26	39	44
RCP 4.5: 2041-2070	14	28	33	46	61	66
RCP 4.5: 2071-2100	21	36	43	67	80	83
RCP 8.5: 2011-2040	4	8	11	25	35	39
RCP 8.5: 2041-2070	12	24	28	49	63	67
RCP 8.5: 2071-2100	38	60	66	85	94	96

Tabla 5.24. Cambios relativos en el factor de torrencialidad (expresados en %) en la Península y Baleares, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$): Península y Baleares					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2011-2040	-16	37	-20	39	-21	40
RCP 4.5: 2041-2070	-16	38	-17	42	-18	46
RCP 4.5: 2071-2100	-18	38	-20	42	-21	44
RCP 8.5: 2011-2040	-13	32	-15	34	-16	35
RCP 8.5: 2041-2070	-14	36	-16	40	-18	42
RCP 8.5: 2071-2100	-16	45	-16	49	-16	50

A continuación, se muestran los mapas asociados con los cambios relativos en el factor de torrencialidad para el modelo SQRT-R en relación a los escenarios RCP 4.5 (Figura 5.25) y RCP 8.5 (Figura 5.26). El número de celdas con cambios significativos en la precipitación diaria y/o horaria máxima anual y, por lo tanto, que proporciona información para identificar patrones de cambio en el factor de torrencialidad, aumenta al aumentar el periodo de retorno y el periodo de impacto, conforme a lo indicado en la Tabla 5.23. Las zonas donde en mayor medida no se pronostican cambios (i.e., donde se encuentra la mayor parte de las celdas para las que no existe cambio en cuantil significativo para precipitación diaria ni horaria máxima anual) se encuentran en el noroeste y sur de la Península y en Baleares para los dos primeros periodos de impacto para el escenario RCP 4.5 y para el primer periodo de impacto para el escenario RCP 8.5, y en el sur de la Península y en Baleares para el segundo periodo de impacto para el escenario RCP 8.5.

Las celdas con cambios relativos en el factor de torrencialidad positivos se encuentran distribuidas a lo largo de la Península y Baleares, presentando generalmente mayores cambios a medida que aumenta el periodo de retorno y el periodo de impacto, y encontrándose los

mayores valores ubicados en las zonas norte, centro, centro-suroeste, sureste y este peninsular para el escenario RCP 4.5 (con cambios de hasta el 46%); así como en las zonas norte, oeste y sur peninsular para el escenario RCP 8.5 (con cambios de hasta el 50%).

En general, el número de celdas con cambios relativos en el factor de torrencialidad negativos es menor que el asociado con cambios positivos, encontrándose mayormente en la zona oeste, centro y noreste peninsular (con algunas celdas puntuales en el noroeste, sur, costa este y Baleares) para el escenario RCP 4.5 (con cambios de hasta el -21%); así como en la zona centro, noreste y este peninsular (con algunas celdas puntuales en el noroeste, oeste, sur y Baleares) para el escenario RCP 8.5 (con cambios de hasta el -18%).

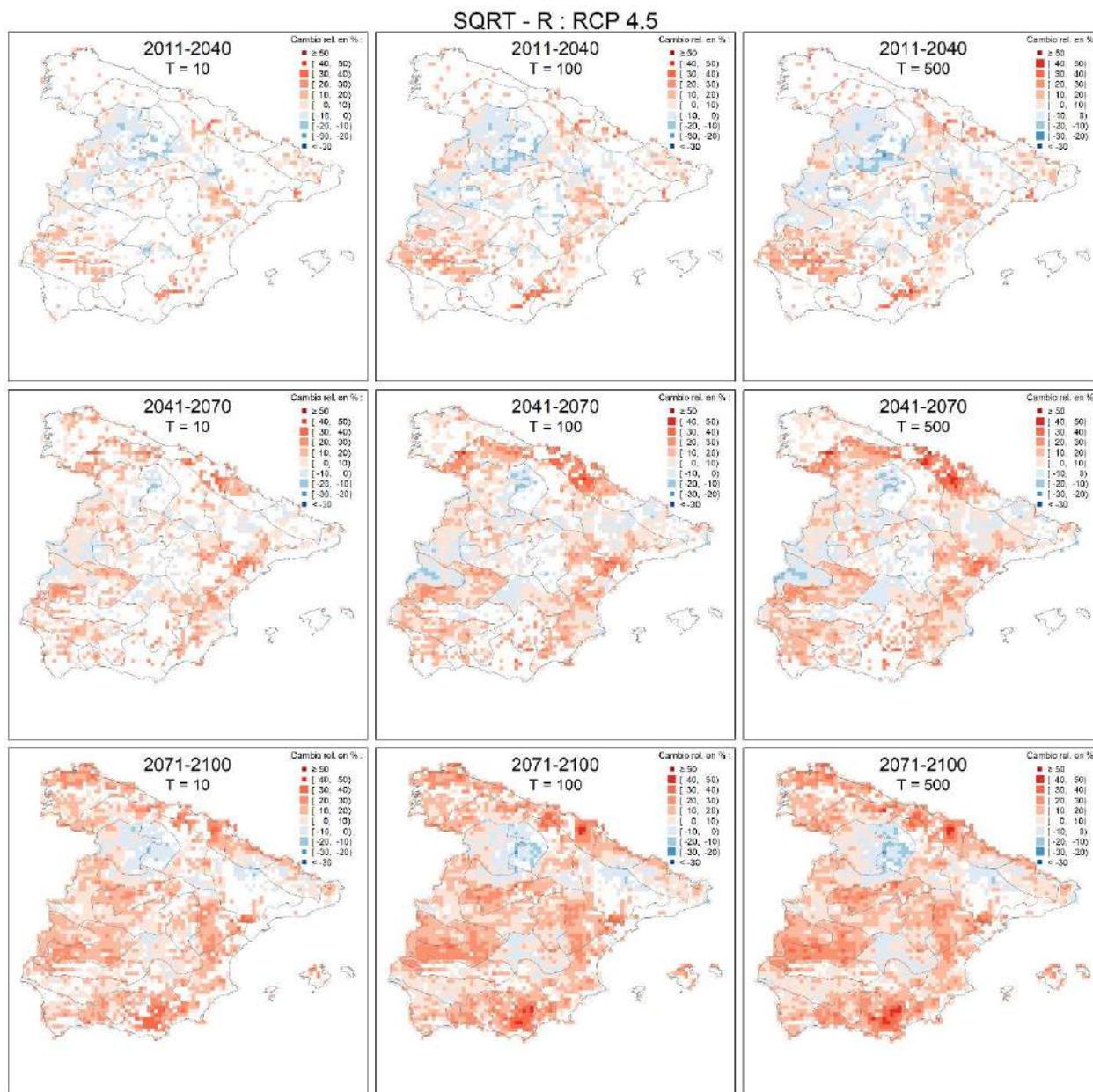


Figura 5.25. Cambios relativos en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 4.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.

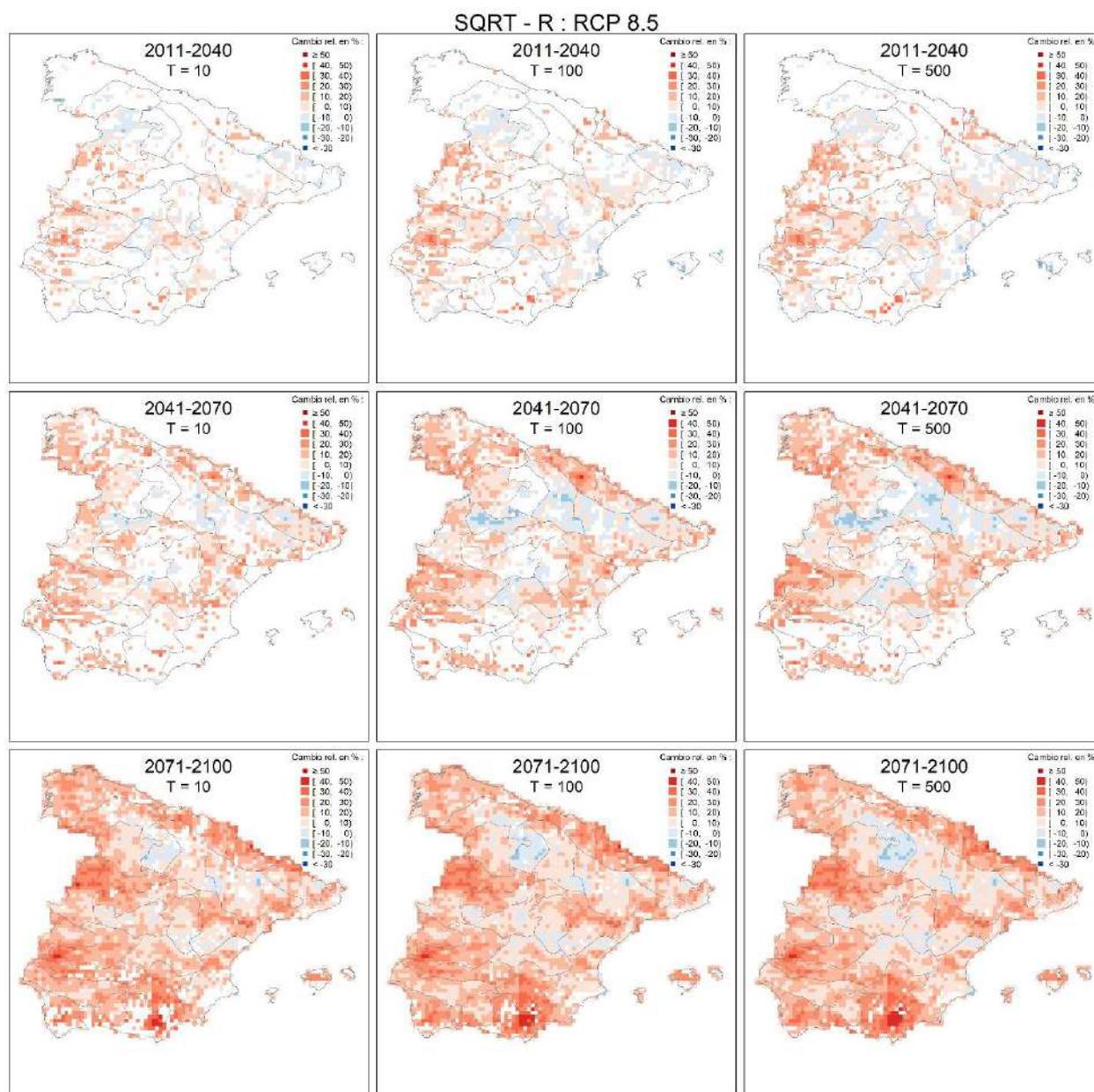


Figura 5.26. Cambios relativos en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 8.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.

Debido a que los resultados mostrados en las Figuras 5.25 y 5.26 están basados en el uso de sólo cuatro modelos climáticos comunes disponibles para las variables precipitación diaria y horaria máxima anual, y teniendo en cuenta que se observa cierto patrón regional en dichos cambios, se ha decidido elaborar mapas de cambio relativo en el factor de torrencialidad de manera regional con el fin de obtener un valor representativo del cambio medio en la región, que puede proporcionar una estimación aproximada de los cambios en dicho factor a lo largo de la Península y Baleares. De esta forma, el cambio relativo regional en el factor de torrencialidad se ha calculado como la media de los cambios relativos en el factor de torrencialidad en las celdas pertenecientes a cada región, considerando igual a cero el cambio relativo en las celdas sin



resultados (i.e., donde el cambio en cuantil de precipitación diaria y horaria máxima anual no es significativo para ninguna de las dos variables).

El cambio relativo regional en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares presenta mayores valores positivos que negativos, siendo el rango (-7%, 23%), y aumentando el valor máximo con el periodo de retorno y, en general, con el periodo de impacto (Tabla 5.25).

Tabla 5.25. Cambios relativos regionales en el factor de torrencialidad (expresados en %) en la Península y Baleares, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables.
(** Porcentaje menor que 0 que se redondea a 0).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$): Península y Baleares					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2011-2040	-2	5	-6	9	-7	10
RCP 4.5: 2041-2070	-1	10	-3	18	-4	22
RCP 4.5: 2071-2100	-4	15	-6	20	-7	22
RCP 8.5: 2011-2040	-1	6	-1	9	-1	11
RCP 8.5: 2041-2070	0**	11	-3	16	-6	19
RCP 8.5: 2071-2100	0**	20	-3	22	-5	23

Los mapas de cambio relativo regional en el factor de torrencialidad para el modelo SQRT-R se muestran en las Figuras 5.27 y 5.28, donde, como se ha indicado, se observa una mayoría de valores positivos. Destaca la presencia de regiones con cambios mayores del 10% cuyo número y/o magnitud de cambio aumenta, generalmente, con el periodo de retorno y el periodo de impacto. Dichas regiones se encuentran mayormente ubicadas en las zonas noroeste, centro y sur de la Península para el escenario RCP 4.5 (con cambios de hasta el 22%); y en el noreste, oeste y suroeste de la Península para el escenario RCP 8.5 (con cambios de hasta el 23%) (también presentan valores próximos al 10% para este escenario la costa este y Baleares en el último periodo de impacto y $T = 100$ y 500 años).

Se observan cambios relativos regionales negativos en determinadas regiones localizadas en el centro de la Península y en Baleares para el escenario RCP 4.5 (con cambios de hasta el -7%); así como en algunas regiones del norte de la Península y en Baleares para el escenario RCP 8.5 (con cambios de hasta el -6%). Se obtiene un cambio relativo regional con valor igual a "0%" en Baleares para "RCP 4.5: 2011-2040" y $T = 10$ años (región rayada en la Figura 5.27) debido a que en ese caso no existe ninguna celda con cambios significativos para precipitación diaria y/o horaria máxima anual en la región.

En general, el aumento de la torrencialidad está en línea con los resultados obtenidos anteriormente en relación a la estimación de las tasas de cambio en cuantil, mediante los que se identificó, en general, una mayor magnitud en el caso de la precipitación horaria máxima anual que en el de la precipitación diaria máxima anual, así como con los resultados obtenidos en relación al análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza (sección 4), que apuntaban a una intensificación de los cambios significativos positivos para la precipitación de menor duración, principalmente para los últimos periodos de impacto y el escenario más pesimista. Destaca el mayor aumento en la torrencialidad en las regiones "0101", "0103", "0107", "0202", "0203", "0207", "0402", "0403", "0501", "0503", "0505", "0601", "0603", "0701", "0905",



“0907” y “0909” para “RCP 8.5: 2071-2100”, para las que se identificó cambio en la mediana y/o en la varianza significativo positivo para la precipitación horaria máxima anual; así como cambio en la mediana significativo negativo para la precipitación diaria máxima anual en el caso de la región “0701”.

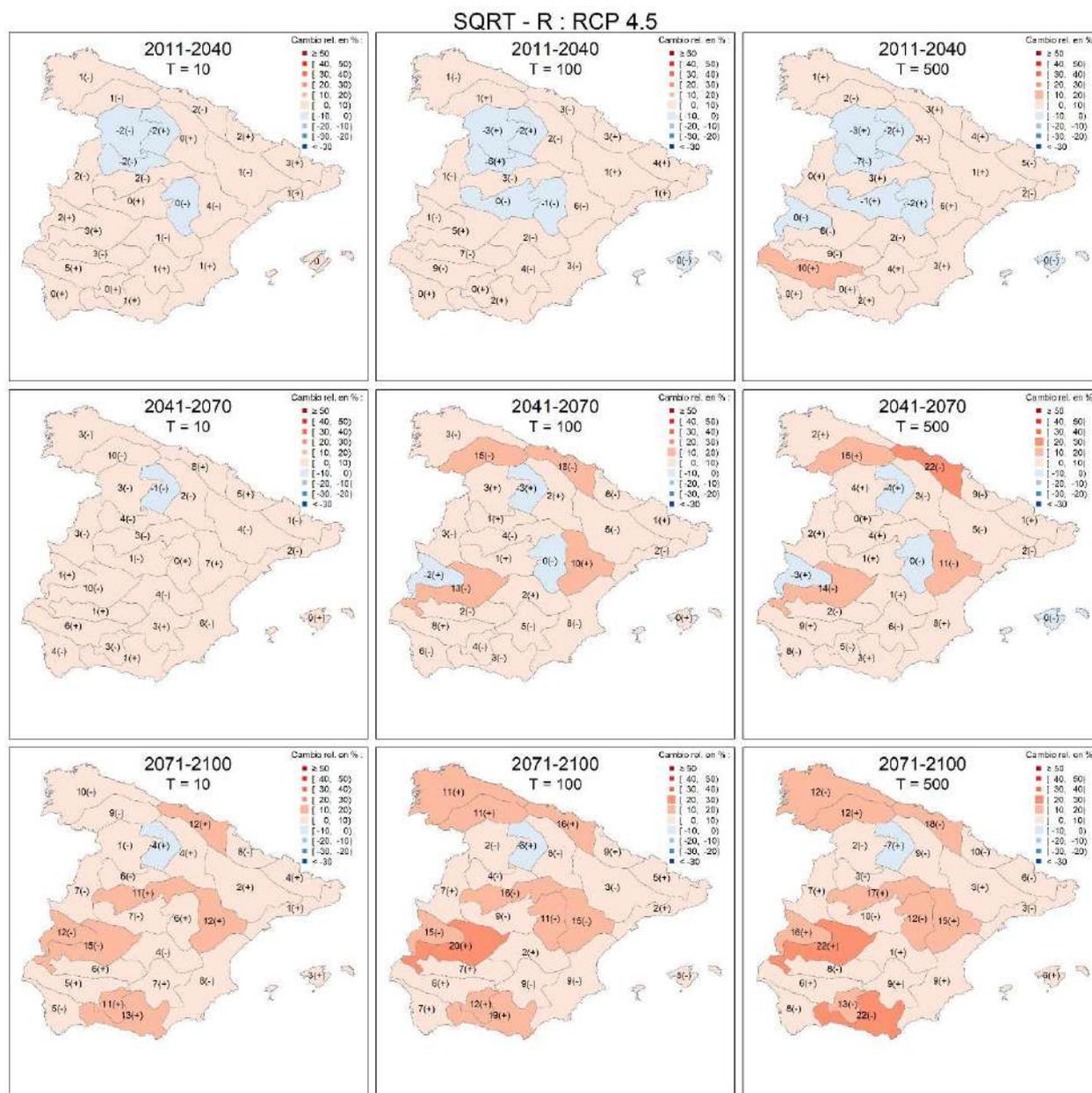


Figura 5.27. Cambios relativos regionales en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 4.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables. (El signo entre paréntesis indica que el valor con decimales es mayor “(+)” o menor “(-)” que el valor tras el redondeo; las regiones rayadas están asociadas con valores del “0%” al no existir celdas con cambios significativos para ninguna de las dos variables).

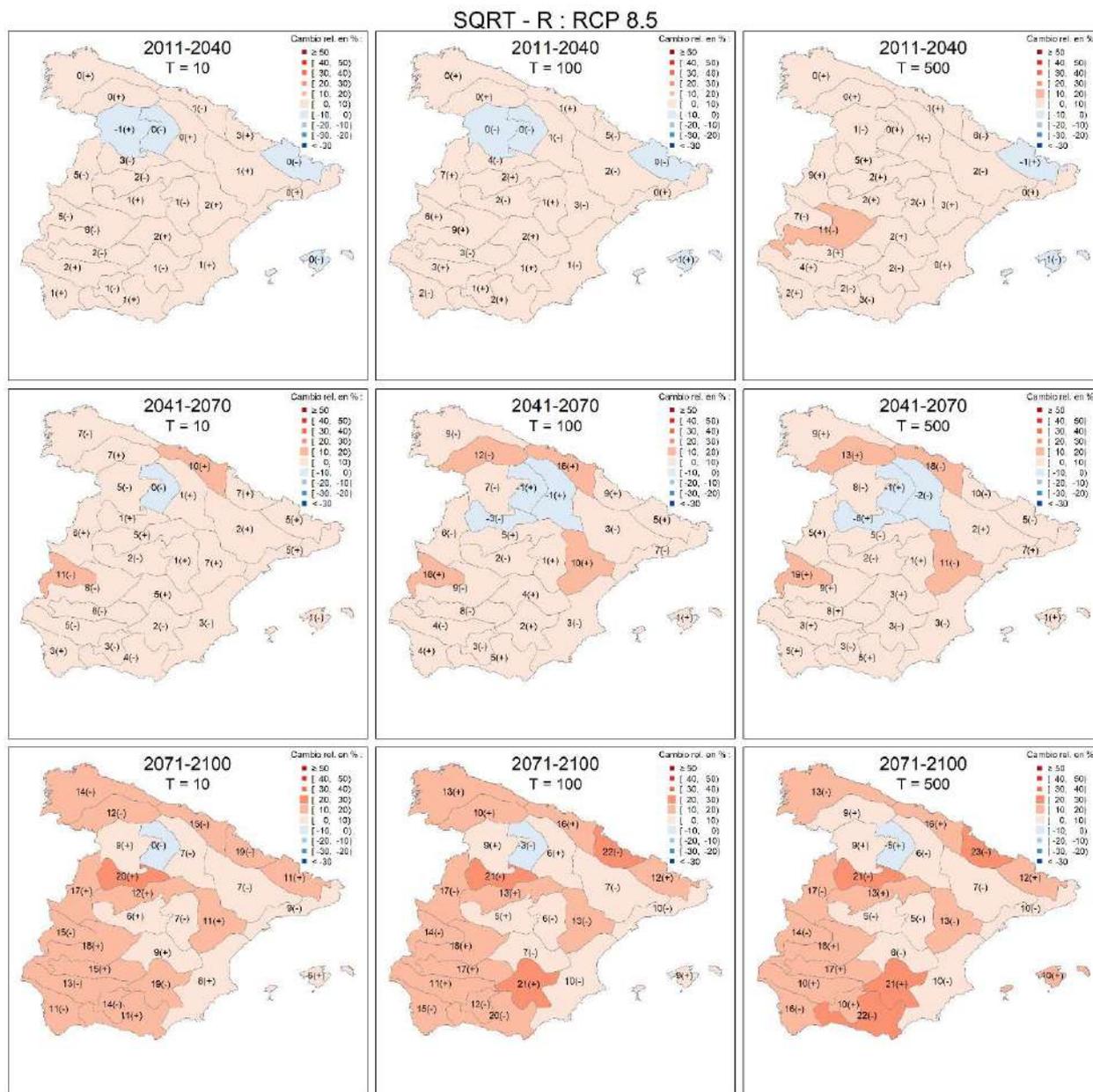


Figura 5.28. Cambios relativos regionales en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares para RCP 8.5, asociados con cambios en cuantil medios significativos (para $\alpha = 0.10$) para precipitación diaria y/o horaria máxima anual, para el modelo SQRT-R en base a los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables. (El signo entre paréntesis indica que el valor con decimales es mayor “(+)” o menor “(-)” que el valor tras el redondeo).

5.4. Conclusiones del análisis

Debido al diferente conjunto de modelos climáticos disponible para analizar cada variable, se ha decidido centrar el estudio de las tasas de cambio en cuantificar y analizar con un mayor detalle la precipitación diaria máxima anual, complementando sus resultados con los obtenidos de forma cualitativa para la precipitación horaria máxima anual y la precipitación convectiva diaria máxima anual.

De forma adicional, se han calculado los cambios en el factor de torrencialidad (relación entre la intensidad de precipitación horaria y diaria) a través de las tasas de cambio en cuantil para



precipitación diaria y horaria máxima anual obtenidas en base al uso de los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables, obteniéndose una visión general de dichos cambios de manera regional. Esta información puede permitir disponer de una primera aproximación a los posibles cambios en la estructura temporal de la precipitación y las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) bajo el efecto del cambio climático. La estimación de la posible modificación del factor de torrencialidad, junto con la de los cuantiles de precipitación diaria máxima anual, permitiría disponer de una primera aproximación a la posibles curvas IDF futuras si se adopta la expresión matemática para dichas curvas incluida en la Norma 5.2 - IC de Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras (MF 2016), y se asume que dicha forma funcional seguiría siendo válida en el futuro.

El resumen de los resultados para las variables de estudio consideradas, en relación al rango de las tasas de cambio en cuantil medias y medias significativas, del porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo para los modelos SQRT-R y GEV-L, así como del número de regiones con cambio en cuantil significativo para el modelo SQRT-R en la Península y Baleares, considerando los modelos climáticos comunes, se muestra en la [Tabla 5.26](#).

Las variables de estudio consideradas muestran un comportamiento similar: (i) el rango de las tasas de cambio en cuantil medias y medias significativas es más amplio para el modelo GEV-L que para el modelo SQRT-R. Los valores medios de dichas tasas aumentan con el periodo de impacto, el periodo de retorno y también, en general, con el escenario para ambos modelos estadísticos; (ii) el porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo positivo es mayor para el modelo SQRT-R que para el modelo GEV-L, aumentando dichas diferencias con el periodo de retorno y también, en general, con el escenario. El porcentaje de celdas con cambio significativo negativo es muy reducido para ambos modelos estadísticos; y (iii) el número de regiones con cambios en cuantil significativos negativos para el modelo SQRT-R es reducido (encontrándose el mayor número asociado a la precipitación convectiva diaria máxima anual), mientras que la mayoría de regiones presenta cambios en cuantil significativos positivos consistentes.

Tabla 5.26. Rango de las tasas de cambio en cuantil medias y medias significativas, del porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo positivo para los modelos SQRT-R y GEV-L, así como del número de regiones con cambio en cuantil significativo consistente para el modelo SQRT-R en la Península y Baleares, en base a los modelos climáticos comunes para las variables de estudio consideradas. (* Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0. El signo “+” indica resultados significativos positivos y el signo “-” negativos).

Modelo estadístico	Análisis	Precipitación diaria máxima anual	Precipitación convectiva diaria máxima anual	Precipitación horaria máxima anual
SQRT-R	Tasas medias	(-11%, 47%)	(-16%, 61%)	(-19%, 75%)
	Tasas medias significativas	(-10%, 47%)	(-16%, 61%)	(-10%, 75%)
	Porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo positivo ($\alpha = 0.10$)	(10%, 85%)	(3%, 68%)	(27%, 98%)
	Nº de regiones con cambio en cuantil significativo ($\alpha = 0.10$)	(0, 1) (-) (17, 27) (+)	(0, 3) (-) (17, 26) (+)	0 (-) (22, 27) (+)
GEV-L	Tasas medias	(-35%, 211%)	(-37%, 230%)	(-55%, 414%)
	Tasas medias significativas	(-18%, 165%)	(6%, 230%)	(-51%, 414%)
	Porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo positivo ($\alpha = 0.10$)	(1%, 34%)	(0*%, 16%)	(7%, 67%)



Las tasas de cambio no pueden considerarse directamente relacionadas con el cambio climático, sino que en gran parte son debidas a la incertidumbre inherente a la estimación de los cuantiles (en mayor medida los de más alto periodo de retorno) a partir de muestras de tamaño reducido. Es, por tanto, necesario analizar la significancia estadística de los cambios para identificar en qué casos son de suficiente magnitud como para que pueda afirmarse con cierto rigor que se deben a un cambio en la población estadística como consecuencia de un cambio en el clima.

En definitiva, el modelo GEV-L da lugar a cuantiles más extremos y rangos de las tasas de cambio medias más amplios, mientras que identifica un menor porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos, presentando mayor dispersión espacial, siendo este porcentaje menor a medida que aumenta el periodo de retorno. El modelo SQRT-R, en cambio, da lugar a cuantiles menos extremos y rangos de las tasas de cambio medias más estrechos, mientras que identifica un mayor porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo que presenta una mayor concentración por zonas, siendo este porcentaje mayor a medida que aumenta el periodo de retorno. Las zonas que presentan mayores tasas de cambio medias positivas están generalmente asociadas con cambios en cuantil significativos positivos.

El especial comportamiento del modelo GEV-L, con una reducción del número de celdas con cambio significativo según aumenta el periodo de retorno, está relacionado con la gran incertidumbre asociada a la estimación de cuantiles (especialmente para altos periodos de retorno), a partir de muestras de escasa longitud, mediante dicho modelo estadístico. En definitiva, al incrementarse la incertidumbre, la señal de cambio climático se pierde, quedando enmascarada por la incertidumbre asociada al estadístico, por lo que ya no es posible identificar los cambios asociados a la modificación del clima. En consecuencia, el modelo GEV-L no permite identificar con rigor los cambios en los cuantiles como consecuencia del cambio climático, al menos, para periodos de retorno altos. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el modelo estadístico concreto que se utilice para la obtención de las tasas de cambio de los cuantiles tiene una importancia crítica en los resultados.

Se recomienda el uso de los mapas de tasas de cambio obtenidos en este trabajo mediante el modelo SQRT-R, que proporciona tasas de cambio más robustas, con menor heterogeneidad espacial que el modelo GEV-L, lo que facilita su aplicación en la práctica, así como un mayor número de celdas con cambios significativos a medida que aumenta el periodo de retorno, lo que proporciona resultados más consistentes y que, en cualquier caso, dejarían del lado de la seguridad. Asimismo, el modelo SQRT-R es consistente con el empleado en la obtención de los mapas de precipitación máxima diaria derivados del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” (DGC 1999). Adicionalmente, se recomienda la utilización únicamente de aquellas tasas de cambio consideradas como significativas, ya que son las que pueden considerarse relacionadas con el impacto del cambio climático; asumiendo, en principio, que no se producirían cambios en aquellas celdas donde el cambio no es estadísticamente significativo.

En la actualidad se está llevando a cabo en el CEDEX una revisión y actualización del mencionado trabajo, así como de las curvas IDF, que podría conducir a reconsiderar el modelo estadístico empleado para la caracterización de las precipitaciones máximas, por lo que, en un futuro próximo, podría ser necesaria la obtención de unas nuevas tasas de cambio en cuantil en base al nuevo modelo estadístico.



Las escasas celdas que presentan cambios significativos negativos para alguna de las variables consideradas están ubicadas principalmente en zonas puntuales del sur, sureste y norte peninsular.

En cuanto a las celdas con cambios significativos positivos identificados mediante el modelo SQRT-R, para la precipitación diaria máxima anual se localizan en mayor medida en el centro, noroeste y noreste peninsular (con ciertas diferencias en el patrón espacial proporcionado por el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5), extendiéndose por el resto del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, excepto a zonas del este, sur y cantábrico. El patrón espacial para la precipitación convectiva máxima anual es similar, localizándose fundamentalmente los cambios en el centro y noreste peninsular, e Islas Baleares, extendiéndose también en este caso a gran parte del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, y en mayor medida para el escenario RCP 8.5 que para el RCP 4.5, excepto a amplias zonas del sur, sureste, norte y noroeste peninsular. Estos resultados coinciden con los presentados en la [sección 4](#) en señalar al Pirineo oriental como la zona donde aumentarán en mayor medida las precipitaciones máximas de carácter convectivo. Por último, en el caso de la precipitación horaria máxima anual, para $T = 10$ años y el primer periodo de impacto, las celdas con cambios se ubican principalmente en el centro (en mayor medida en la parte occidental que en la oriental) y noreste peninsular, alcanzando también a algunas zonas del sur y sureste. Estas zonas se extienden a prácticamente la totalidad del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, con ligeras diferencias en el patrón espacial entre el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados obtenidos indican que los cambios afectarán a una mayor extensión de territorio que en el caso de la precipitación diaria, destacando un mayor número de celdas con cambios en el sur y sureste peninsular e Islas Baleares para ambos escenarios, en el noroeste peninsular para el escenario RCP 4.5 y en la zona central occidental para el escenario RCP 8.5. Asimismo, las tasas de cambio son, en general, de mayor magnitud para la precipitación horaria que para la diaria. Estos resultados parecen apuntar, en general, como ya se indicó en la [sección 4](#), a un mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a una mayor torrencialidad.

Los cambios en el factor de torrencialidad para el modelo SQRT-R, obtenidos en base al uso de los cuatro modelos climáticos comunes a la precipitación diaria y horaria máxima anual, apoyan lo anteriormente mencionado.

El cambio relativo en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares presenta mayores valores positivos que negativos, aumentando el valor máximo con el periodo de retorno y siendo el rango (-21%, 50%), así como un mayor número de celdas con cambios positivos que negativos. Las celdas con cambios relativos positivos se encuentran distribuidas a lo largo de la Península, presentando generalmente mayores cambios a medida que aumenta el periodo de retorno y el periodo de impacto. Las zonas donde en mayor medida no se pronostican cambios (i.e., donde se encuentra la mayor parte de las celdas para las que no existe cambio en cuantil significativo para precipitación diaria ni horaria máxima anual) se encuentran en el noroeste y sur de la Península y en Baleares.

El cambio relativo regional en el factor de torrencialidad presenta un comportamiento similar, siendo el rango (-7%, 23%). Destaca la presencia de regiones con cambios mayores al 10%,



cuyo número y/o magnitud aumenta generalmente con el periodo de retorno y el periodo de impacto, principalmente ubicadas en las zonas noroeste, centro y sur de la Península para el escenario RCP 4.5, y en el norte, oeste y sur de la Península para el escenario RCP 8.5 (también presentan valores próximos al 10% para este escenario la costa este y Baleares en el último periodo de impacto y $T = 100$ y 500 años). Se observan cambios relativos regionales negativos en determinadas regiones localizadas en el centro de la Península y en Baleares para el escenario RCP 4.5, así como en la zona norte de la Península y en Baleares para el escenario RCP 8.5.

Es importante destacar diversas fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación de las tasas de cambio en cuantil del presente estudio:

- (i) La evaluación de la significancia estadística de las tasas de cambio medias mediante el procedimiento basado en simulaciones de Monte Carlo presenta incertidumbre debido a la necesidad de generar series sintéticas en base a un proceso aleatorio para el que se usa una longitud de datos relativamente corta (i.e., 30 años, que es la longitud de datos asociada al periodo de control), siendo complicada la obtención de resultados idénticos al repetir el proceso. El número de simulaciones a ejecutar se ha establecido en 4500, como balance entre la gran demanda computacional asociada a la estimación de resultados para todos los casos analizados, y el uso de un número suficiente de simulaciones para obtener resultados aceptablemente robustos.
- (ii) La disponibilidad de modelos climáticos afecta a la estimación de las tasas de cambio en cuantil medias y de su significancia, así como a la estimación de las tasas de cambio en cuantil asociadas a los percentiles 10 y 90, ya que los diferentes modelos climáticos proporcionan una gran variabilidad de resultados. En este sentido, se ha decidido utilizar el mayor número de modelos climáticos disponible para cada variable de estudio con objeto de contar con la mayor cantidad de información posible para la estimación de las tasas de cambio, aunque esto conlleva que los resultados obtenidos para las diferentes variables no son estrictamente comparables. La identificación de cambios significativos en base a los resultados de la “mayoría” de modelos climáticos, criterio también utilizado para la identificación de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos, implica la identificación de únicamente las celdas/regiones en las que la mayor parte de los modelos climáticos coincide en su pronóstico, por lo que depende de los modelos climáticos disponibles y de la variabilidad de sus resultados. No obstante, existe, en general, cierta coincidencia en los resultados proporcionados por los distintos conjuntos de modelos en cuanto a las zonas geográficas donde aparecen en mayor medida los cambios significativos, aunque con ciertas diferencias a nivel local de celda.
- (iii) Hay que destacar la gran variabilidad de resultados entre los distintos modelos, lo que indica la elevada incertidumbre asociada a los resultados. Adicionalmente, hay que destacar la existencia de posibles inconsistencias en el valor de las tasas de cambio medias en relación a los diferentes periodos de impacto. En la práctica, puede ser necesario realizar ajustes en las tasas de determinadas celdas de tal forma que se garantice dicha coherencia. Sin embargo, las inconsistencias en relación a los escenarios de emisión no son necesariamente problemáticas, ya que aunque sería lógico esperar una mayor tasa de cambio para un escenario más pesimista, el efecto del cambio climático sobre cuantiles de precipitación



puede estar afectado por diversos factores. Estas inconsistencias son el reflejo de las limitaciones que presentan los modelos climáticos para representar correctamente el comportamiento de un fenómeno tan complejo como las precipitaciones máximas y dan, asimismo, una idea sobre la elevada incertidumbre asociada a las predicciones en relación a su posible evolución futura, circunstancia que es necesario tener en cuenta a la hora de la posible aplicación práctica de dichas predicciones.



CEDEX

6. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LOS CUANTILES DE PRECIPITACIÓN DIARIA MÁXIMA ANUAL ACUMULADA EN LA RED FLUVIAL

6.1. Introducción

En esta sección se lleva a cabo el análisis de los cambios en los cuantiles de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial. Para ello se parte de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas (para $\alpha = 0.10$) estimadas a través del método SQRT-R (sección 5), modelo estadístico empleado en la elaboración del estudio “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” (DGC 1999), sobre cuyos mapas de cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada se aplicarán dichas tasas de cambio. Los cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada se encuentran disponibles únicamente para la Península, por lo que el presente análisis se lleva a cabo para las cuencas españolas localizadas dentro de la misma. Por coherencia con MITECO (2018), el análisis se realiza para el periodo de impacto 2041-2070, considerando cada uno de los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), y para los tres periodos de retorno utilizados en este estudio ($T = 10, 100$ y 500 años).

6.2. Metodología

6.2.1. Elaboración de mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual futura

Los mapas de tasas de cambio en cuantil medias significativas en rejilla regular (sección 5) se aplican sobre los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual observada (DGC 1999) con el fin de obtener los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual futura.

Para ello, los mapas de tasas de cambio en cuantil medias significativas se remuestran para que presenten la misma proyección y el mismo tamaño de celda que los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual observada. El método de remuestreo utilizado es el de vecino más cercano (“*nearest neighbour*”), de esta forma se minimizan los cambios en los valores de las celdas. El tamaño de celda de todos los mapas utilizados en este análisis es de 0.5 km por ser la resolución del mapa de direcciones de la red de drenaje sobre el que se basa la estimación de la precipitación acumulada.

Los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual futura se obtienen en base a la siguiente ecuación:

$$x_T^{\text{fut}} = \left(\frac{\bar{C} [\%]}{100} + 1 \right) x_T^{\text{obs}}, \quad (6.1)$$

siendo x_T^{obs} el cuantil de precipitación diaria máxima anual asociado al periodo de retorno T estimado en la celda en base a las observaciones (i.e., el cuantil de precipitación diaria máxima anual estimado en base al periodo histórico en DGC (1999)), x_T^{fut} el cuantil de precipitación diaria máxima anual futura asociado al periodo de retorno T estimado en la celda para un determinado escenario y para el periodo de impacto considerado, y $\bar{C} [\%]$ la tasa de cambio en cuantil de



precipitación diaria máxima anual media significativa en dicha celda en tanto por ciento para ese periodo de impacto, escenario y periodo de retorno.

De este modo, aquellas celdas que presentan una tasa de cambio en cuantil media significativa positiva experimentan un incremento del cuantil de precipitación diaria máxima anual, mientras que aquellas celdas que presentan una tasa de cambio en cuantil media significativa negativa experimentan una disminución, no habiendo alteración en aquellas celdas para las que la tasa de cambio en cuantil media no es significativa (a las que se asigna $\bar{C} = 0$). Por ejemplo, para $\bar{C} = 100$, el cuantil futuro sería el doble del cuantil observado en la celda (i.e., $x_T^{\text{fut}} = (100/100 + 1) x_T^{\text{obs}} = 2 x_T^{\text{obs}}$), para $\bar{C} = -50$, el cuantil futuro sería la mitad del cuantil observado en la celda (i.e., $x_T^{\text{fut}} = (-50/100 + 1) x_T^{\text{obs}} = x_T^{\text{obs}}/2$), mientras que para $\bar{C} = 0$, el cuantil futuro sería igual al cuantil observado en la celda (i.e., $x_T^{\text{fut}} = x_T^{\text{obs}}$).

Tal como se ha puesto de manifiesto en la sección anterior, los resultados concretos que se obtengan respecto a las tasas de cambio en cuantil significativas están relacionados con la incertidumbre asociada a la estimación de los cuantiles, lo que, entre otras cosas, está relacionado con la longitud de la serie de datos utilizada. De esta forma, las tasas de cambio obtenidas en este estudio serían más apropiadas para corregir cuantiles observados obtenidos a partir de series de datos de una longitud similar a las empleadas para el periodo de control y los periodos de impacto, es decir, unos 30 años. El periodo histórico utilizado en [DGC \(1999\)](#) para la estimación de los cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada es variable: se emplearon estaciones con una longitud mínima de 20 o 30 años de datos en función de su uso para la estimación de la media o de cuantiles regionales adimensionales, respectivamente; es decir, longitudes, en general, similares a las de las series simuladas utilizadas en el presente estudio. El periodo histórico al que corresponden las series de datos reales en las que se basa la estimación de los cuantiles observados no tiene por qué coincidir con el periodo de control, basta con que pueda asumirse que las muestras de datos de ambos periodos proceden de una misma población estadística.

6.2.2. Elaboración de mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada

Los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual futura se utilizan para obtener los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada futura. Esto se realiza en base al mapa de direcciones de la red de drenaje, mediante el cual se identifican las celdas pertenecientes a cada cuenca, agregando su precipitación. El mismo procedimiento se lleva a cabo para obtener los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada observada (i.e., partiendo de los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual observada sin incorporar tasas de cambio).

Los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada futura se comparan con los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada observada para la elaboración de mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada. Las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada (C_a en %) en una celda se calculan en base a la siguiente ecuación:



$$C_a [\%] = \frac{(a_T^{fut} - a_T^{obs})}{a_T^{obs}} 100 \tag{6.2}$$

siendo a_T^{obs} el cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada asociado al periodo de retorno T estimado en la celda en base a las observaciones (i.e., al periodo histórico utilizado en [DGC \(1999\)](#)) y a_T^{fut} el cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada futura asociado al periodo de retorno T estimado en la celda para un determinado escenario y para el periodo de impacto considerado.

Dichos mapas se presentan para cuencas con área mayor que 10 km², permitiendo la identificación de los tramos de la red fluvial que presentan un mayor incremento o disminución en la precipitación acumulada y, por lo tanto, donde podrían darse también los cambios más importantes en la magnitud de los caudales de crecida (i.e., en la transformación lluvia – escorrentía) debido al efecto del cambio climático.

6.3. Resultados y discusión

El rango de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas en rejilla regular tras remuestreo, asociado al periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R en la Península, se muestra en la [Tabla 6.1](#). La mayor parte de las tasas de cambio son positivas (presentando valores de hasta el 35%), con la excepción de valores negativos para un número reducido de celdas localizadas en la zona más al sur de la Península, en la demarcación hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, en relación al escenario RCP 4.5 para $T = 10$ años. Los valores máximos de las tasas de cambio aumentan con el periodo de retorno y escenario.

Tabla 6.1. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas (expresadas en %) en rejilla regular tras remuestreo, asociadas al periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) en la Península. (* *Porcentaje mayor que 0 que se redondea a 0*).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$) : rejilla regular + remuestreo (0.5 km)					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2041-2070	-7	23	0*	29	1	33
RCP 8.5: 2041-2070	3	24	2	31	3	35

El rango de los cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada y futura se muestra en la [Tabla 6.2](#). El efecto de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas es más marcado a medida que aumenta el periodo de retorno y para el escenario más pesimista.



Tabla 6.2. Cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada y futura (expresados en mm) asociados al periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R en la Península. Los valores observados provienen de DGC (1999); los valores futuros provienen de la aplicación de las tasas de cambio en cuantil medias significativas en rejilla regular tras remuestreo (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes).

Periodo	SQRT-R					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
Histórico utilizado en DGC (1999)	41	249	62	401	78	522
RCP 4.5: 2041-2070 ($\alpha = 0.10$)	42	249	64	419	80	550
RCP 8.5: 2041-2070 ($\alpha = 0.10$)	42	249	64	427	80	564

El comportamiento de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada para el periodo de impacto 2041-2070 (Tabla 6.3) es similar al de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual mostradas en la Tabla 6.1. Es decir, éstas son mayormente positivas (presentando valores de hasta el 35%), con la excepción de valores negativos para un número reducido de celdas localizadas en la zona más al sur de la Península en relación al escenario RCP 4.5 para $T = 10$ años. Las capas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada se proporcionan en formato ASCII (ver descripción en Anexo nº 8).

La distribución espacial de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada a lo largo de la red fluvial en la Península con división según demarcaciones hidrográficas (Figura 6.1) se muestra en las Figuras 6.2 a 6.7. La extensión de las zonas donde existe una mayor densidad de tramos con valores más elevados de las tasas de cambio aumenta a medida que aumenta el periodo de retorno. Estas zonas se encuentran localizadas a lo largo de toda la Península, aunque con muy escasa presencia en el sur y en la vertiente cantábrica para ambos escenarios. Las demarcaciones hidrográficas con mayor presencia de tramos con cambios más importantes en relación al escenario RCP 4.5 son la del Guadiana, la del Tajo y la del Duero; mientras que para el escenario RCP 8.5 son el Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña, la del Júcar, la cabecera de la del Segura, la del Guadiana, la del Duero y la del Ebro. En el Anexo nº 9 se incluye una descripción de los tramos fluviales con cambios en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada para cada demarcación hidrográfica, incluyendo mapas detallados con los valores de las tasas de cambio en cada una de las demarcaciones (Figuras A9.1 a A9.90).

Tabla 6.3. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada (expresadas en %) asociadas al periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para la Península. Los valores provienen de la aplicación de las tasas de cambio en cuantil medias significativas en rejilla regular tras remuestreo (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes).

Escenario y periodo de impacto	SQRT-R ($\alpha = 0.10$)					
	T = 10		T = 100		T = 500	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
RCP 4.5: 2041-2070	-6	23	0	29	0	33
RCP 8.5: 2041-2070	0	24	0	31	0	35



Figura 6.1. Ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas peninsulares.

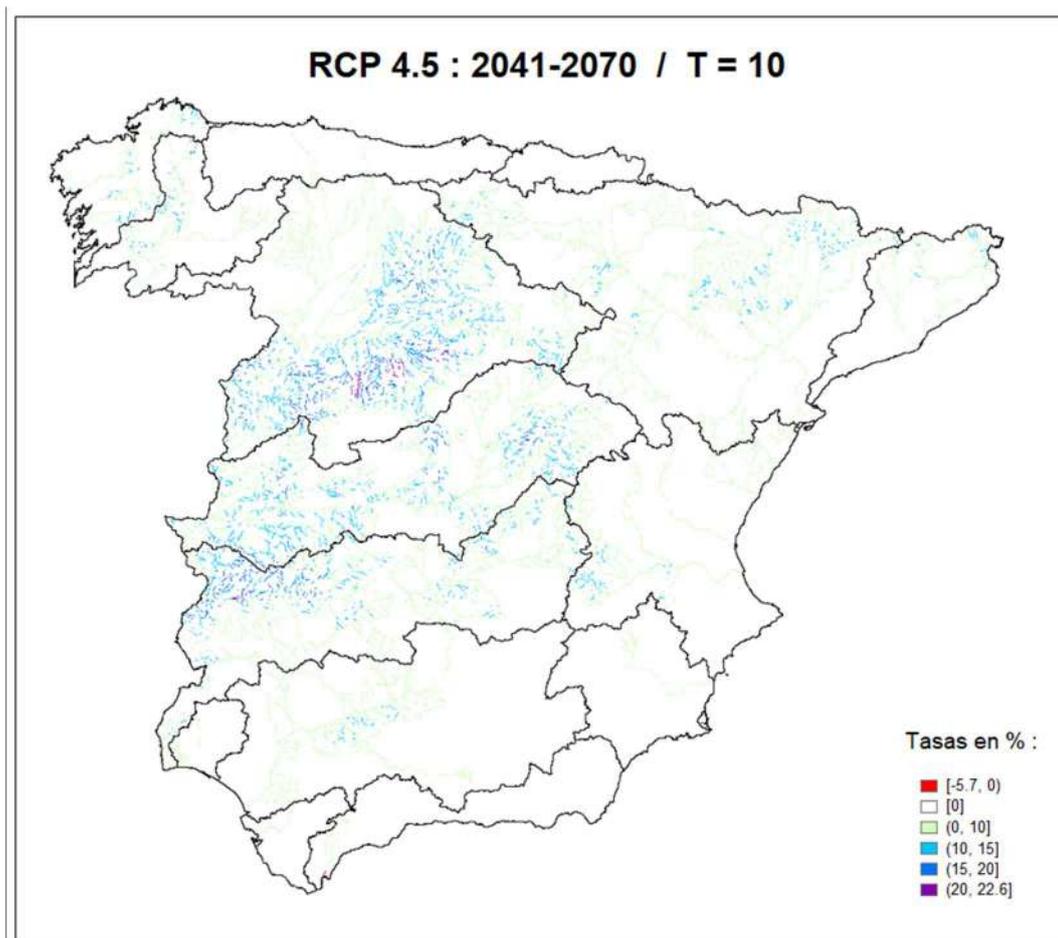


Figura 6.2. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 4.5 y $T = 10$ años.

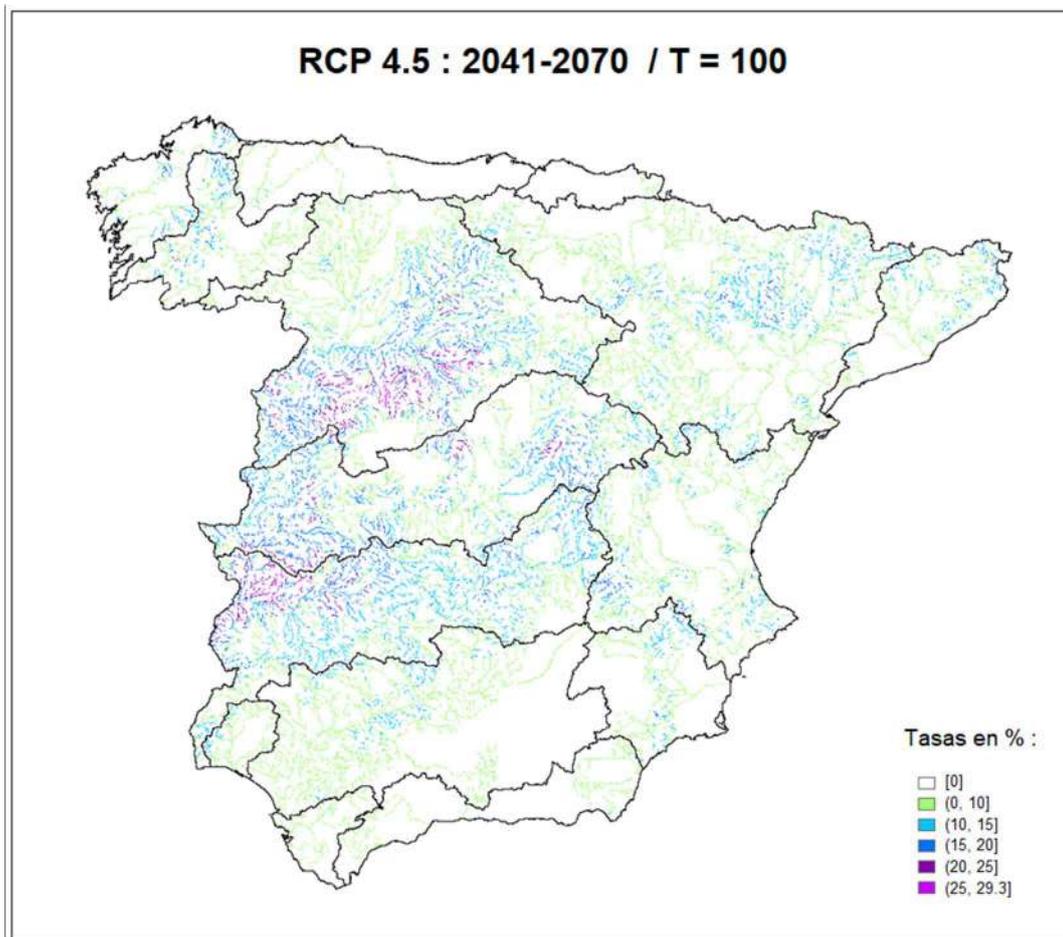


Figura 6.3. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 4.5 y $T = 100$ años.

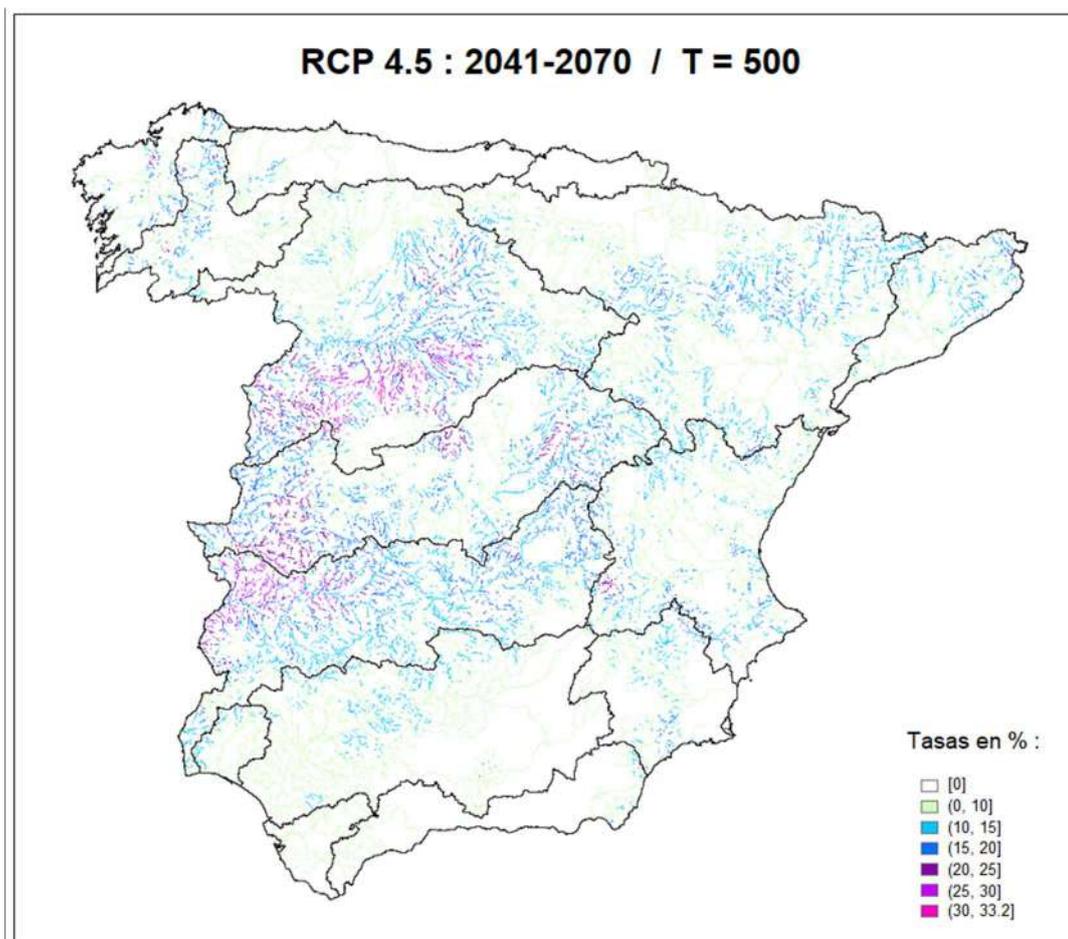


Figura 6.4. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 4.5 y $T = 500$ años.

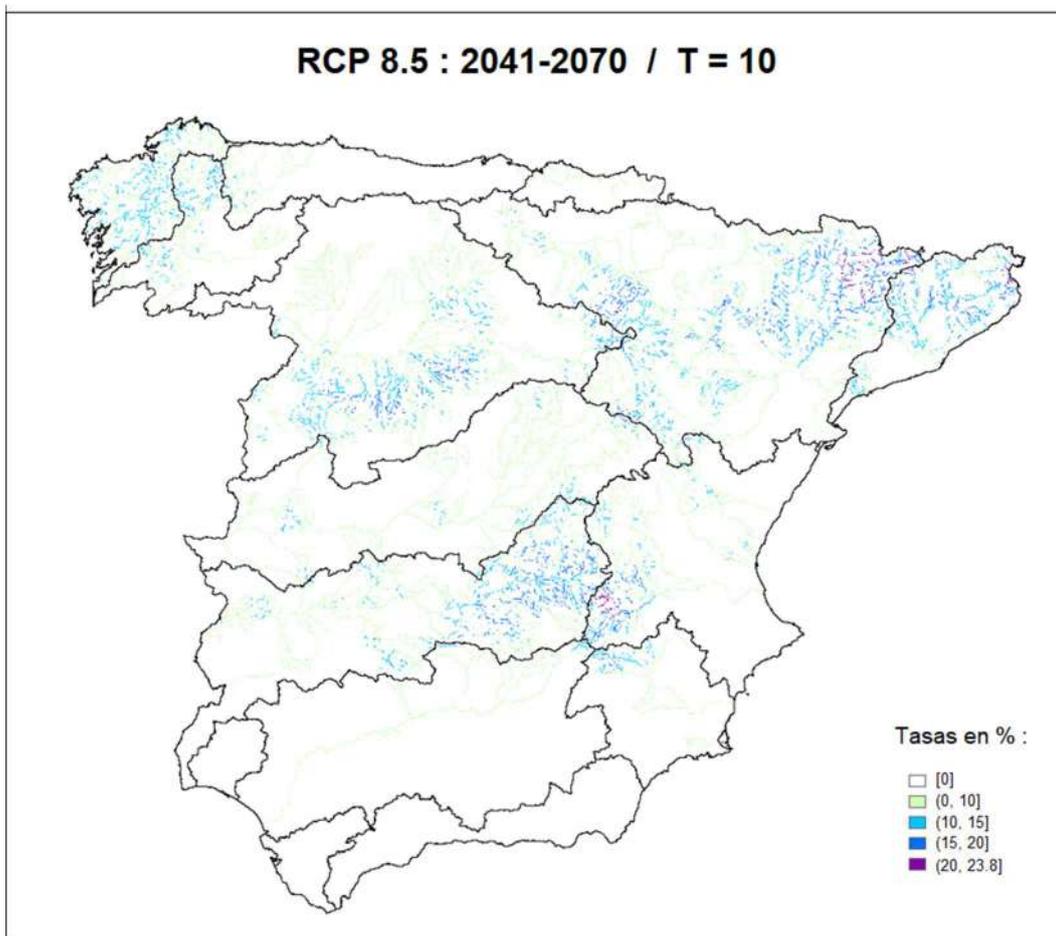


Figura 6.5. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 8.5 y $T = 10$ años.

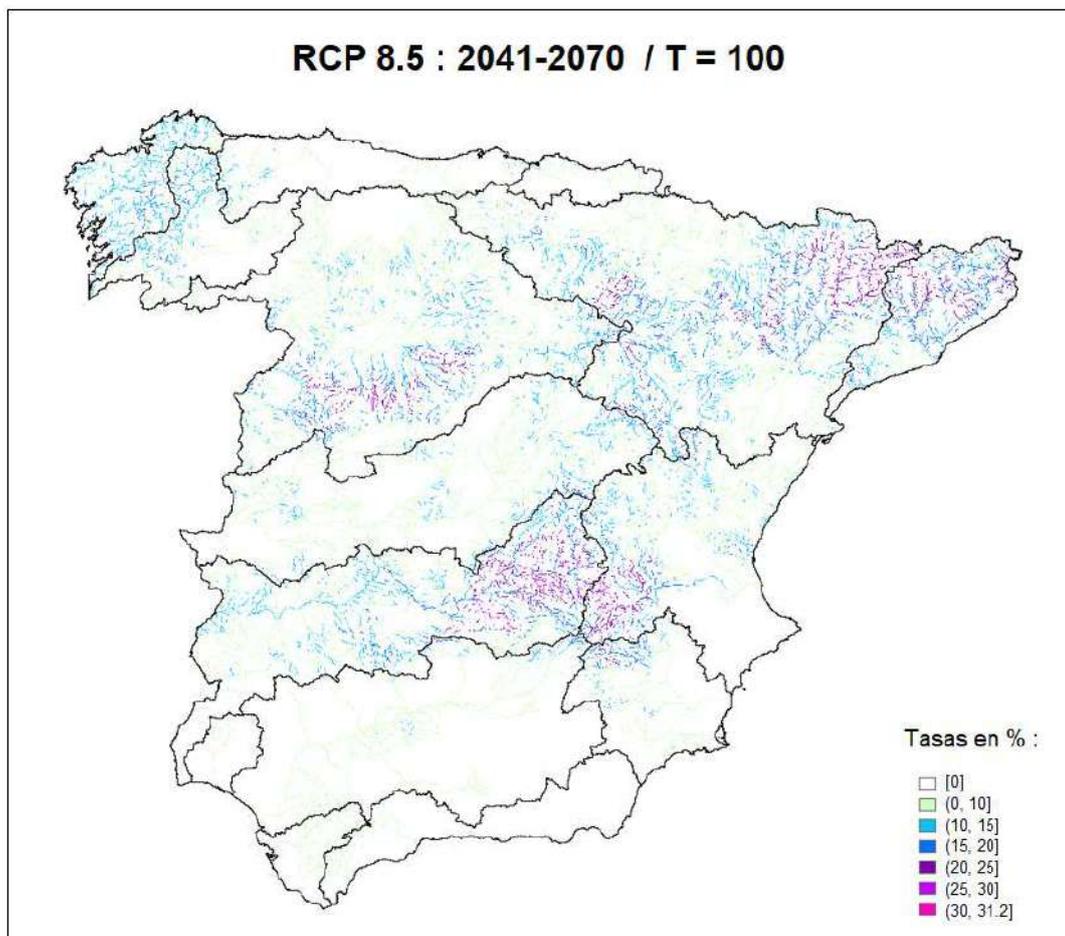


Figura 6.6. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 8.5 y $T = 100$ años.

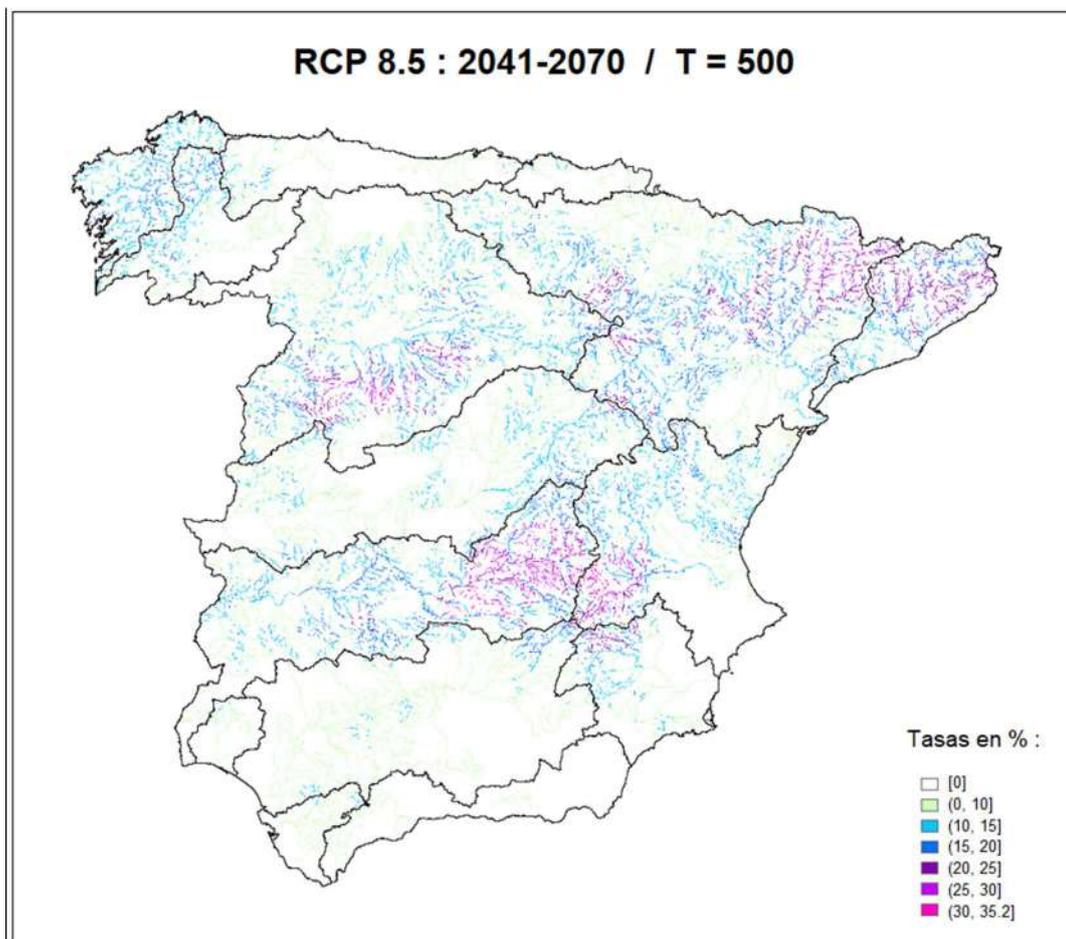


Figura 6.7. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R (para $\alpha = 0.10$ considerando la mayoría de modelos climáticos comunes) para RCP 8.5 y $T = 500$ años.

6.4. Conclusiones del análisis

La utilización de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas obtenidas a través del modelo SQRT-R permite la obtención de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial coherentes, ya que los cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada disponibles para llevar a cabo el análisis fueron estimados en base a dicho modelo estadístico.

Prácticamente todas las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada a lo largo de la red fluvial en la Península para el periodo de impacto 2041-2070 son positivas, alcanzando valores de hasta el 35%, con la excepción de un pequeño tramo de la red fluvial localizado en el sur de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas que presenta tasas de cambio negativas para $T = 10$ años en relación al escenario RCP 4.5.

Las demarcaciones hidrográficas con mayor presencia de tramos con cambios más importantes en relación al escenario RCP 4.5 son la del Guadiana, la del Tajo y la del Duero, mientras que para el escenario RCP 8.5 son el Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña, la del Júcar, la cabecera de la del Segura, la del Guadiana, la del Duero y la del Ebro.



Como se ha indicado anteriormente, en la actualidad se está llevando a cabo en el CEDEX una revisión y actualización del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” (DGC 1999), que permitirá disponer de nuevos cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada, en base a series de datos actualizadas. Este trabajo, como se expuso, podría conducir a reconsiderar el modelo estadístico empleado para la caracterización de las precipitaciones máximas. En consecuencia, en un futuro próximo podría ser necesaria la obtención de unas nuevas tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial en base a los nuevos mapas de cuantiles y al nuevo modelo estadístico considerado.



CEDEX



7. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo se ha centrado en la evaluación del impacto del cambio climático sobre las precipitaciones máximas anuales, en distintos intervalos temporales, a partir de simulaciones procedentes de modelos climáticos regionales de EURO-CORDEX. Los resultados de este estudio pueden ser útiles para incorporar los efectos del cambio climático en los estudios relacionados con el riesgo hidrológico o el riesgo por inundación como, por ejemplo, para dar respuesta a lo exigido por la Directiva de Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundación en lo relativo a la consideración del cambio climático en la revisión de los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI).

En concreto, el análisis se ha llevado a cabo para la precipitación diaria máxima anual, precipitación convectiva diaria máxima anual, precipitación horaria máxima anual, y precipitación acumulada en 3, 6 y 12 horas máxima anual. Para ello se han analizado cuatro periodos de estudio: el periodo de control (1971-2000), respecto al cual se han evaluado los cambios en los distintos estadísticos y cuantiles, y tres periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100), en base a dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y RCP 8.5.

El ámbito de estudio ha sido el conjunto del territorio español a excepción de las Islas Canarias, ya que no se dispone de datos para este territorio en la información de partida utilizada. Los resultados de los análisis se han obtenido tanto a nivel local para cada una de las 3632 celdas de 0.11 grados en rejilla rotada en que se divide la zona de estudio, y en las que se dispone de las simulaciones de EURO-CORDEX para las distintas variables consideradas, como a nivel regional, para lo que se ha dividido la zona de estudio en 29 regiones climáticas. Estas regiones están compuestas por las 26 regiones climáticas peninsulares empleadas para la elaboración del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España Peninsular” (Ferrer 1996; DGC 1999), como por tres regiones adicionales para las Islas Baleares, Ceuta y Melilla.

El trabajo ha conestado de cuatro fases principales: (i) análisis del comportamiento de las series de precipitación diaria máxima anual procedentes de modelos climáticos regionales en el periodo de control respecto a las series de precipitación diaria máxima anual observadas; (ii) análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza, así como en la estacionalidad, de las series de precipitación máxima anual procedentes de modelos climáticos regionales en los periodos de impacto; (iii) estimación de las tasas de cambio en cuantil medias, y asociadas a los percentiles 10 y 90 para valorar su incertidumbre, de las series de precipitación máxima anual diaria y horaria procedentes de modelos climáticos regionales, evaluación de la significancia estadística de las tasas de cambio en cuantil medias mediante un procedimiento basado en simulaciones de Monte Carlo, así como estimación de los cambios en el factor de torrencialidad; y (iv) análisis de los cambios en los cuantiles de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial.

Respecto al primero de los aspectos estudiados, la comparación entre las series diarias máximas anuales simuladas y observadas se ha realizado mediante el contraste de estadísticos representativos de sus propiedades en las celdas donde existen observaciones. Los estadísticos utilizados son la media, el L-coeficiente de variación (LCV), el L-coeficiente de sesgo (LCS), el coeficiente de variación (CV), el coeficiente de sesgo (CS) y el valor máximo estandarizado



(maxstd). Las series observadas se han tomado de una selección de estaciones pluviométricas de la red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) con un mínimo de 22 años de datos de precipitación diaria máxima anual en el periodo de control. El análisis del valor medio de los estadísticos en la zona de estudio muestra que los valores observados se encuentran dentro del rango de los estadísticos obtenidos mediante los modelos climáticos, aunque un mayor número de modelos sobreestima el LCV, el CV y el maxstd, y subestima la media. El comportamiento general del conjunto de modelos climáticos de estudio en relación a la precipitación diaria máxima anual puede considerarse adecuado en el periodo de control, lo que apoya su utilización en el análisis del efecto del cambio climático. Sin embargo, se ha detectado una subestimación generalizada de la precipitación máxima diaria en algunas regiones del este y sureste peninsular, así como en las Islas Baleares, que podría estar relacionada con una mayor limitación de los modelos climáticos para representar correctamente la precipitación convectiva típica de estas zonas, y que podría suponer que los resultados que se obtengan sobre los efectos del cambio climático en esas regiones sean menos fiables. Asimismo, existe sobrestimación del LCS, CV, CS y mxstd por parte de todos los modelos en la región situada en el valle del Ebro.

No ha sido posible llevar a cabo el análisis del comportamiento general del conjunto de modelos climáticos en relación al resto de variables de estudio debido a la ausencia de datos o a la reducida disponibilidad de estaciones meteorológicas con datos observados de precipitación para intervalos temporales inferiores al día en el periodo de control. Teniendo en cuenta este hecho, así como las limitaciones de los modelos climáticos de EURO-CORDEX para representar correctamente las precipitaciones en intervalos temporales inferiores al día identificadas en la literatura, los resultados obtenidos en relación a la precipitación subdiaria deben ser utilizados con cautela.

Debido a que el buen comportamiento de un modelo climático en el periodo de control no está necesariamente ligado con un buen comportamiento en los periodos de impacto, la evaluación del efecto del cambio climático se ha realizado en base al mayor número de modelos climáticos posible que permita conocer todo el rango de tendencias de evolución del clima que proporcionan los modelos disponibles. No obstante, los resultados obtenidos respecto al contraste del periodo de control se han utilizado para realizar una primera clasificación del conjunto de modelos climáticos de tal forma que, junto con otros criterios, pueda servir de base en el futuro, si fuese necesario, para seleccionar un subconjunto de modelos con los que abordar otros estudios futuros más exigentes desde el punto de vista computacional (como podría ser el caso de la utilización de modelos hidrológicos para obtener series de caudal a partir de los datos de precipitación) y que, por lo tanto, no puedan llevarse a cabo para todo el conjunto de modelos climáticos disponible.

Por otra parte, se ha analizado la capacidad de los modelos climáticos para simular la estacionalidad de las series máximas anuales en el periodo de control, determinando en cada celda el número de veces que el máximo anual es obtenido en un determinado mes dividido por el número de años de datos disponibles, y promediando el valor para cada región y para el conjunto de modelos climáticos. El contraste de la estacionalidad de las series simuladas de precipitación diaria máxima anual con respecto a la estacionalidad observada permite concluir que los modelos climáticos (con la excepción del modelo "7_IPS-WRF" principalmente en las regiones del este peninsular y Baleares, y, en menor medida, otros como el "8_IPS-RCA" y el



“12_MPI-RCA”) muestran una buena representatividad general del ciclo estacional en las diferentes regiones, aunque con algunas diferencias dependiendo de la región climática de que se trate.

El análisis de tendencias en las variables de estudio se ha realizado sobre el periodo completo 2011-2100 para cada escenario (RCP 4.5 y RCP 8.5), y el de cambios en la mediana y en la varianza sobre cada uno de los tres periodos de impacto, también para cada uno de los dos escenarios, comparando éstos con el periodo de control. Las tendencias se han analizado mediante el test de Mann Kendall, y los cambios en mediana y en varianza mediante los test de Wilcoxon y de Fligner Killeen, respectivamente. Cada test se aplica de forma local en cada celda para cada modelo climático de estudio y, posteriormente, se evalúa la significancia regional mediante la aplicación del método de la tasa de falso descubrimiento en cada región, identificando aquellas celdas y regiones para las que la mayoría de modelos climáticos coincide en la identificación de una tendencia, cambio en la mediana o cambio en la varianza significativo positivo o negativo.

Se han obtenido resultados consistentes entre las distintas variables de estudio, a pesar de emplearse conjuntos de modelos climáticos diferentes para contar con la mayor información posible para cada variable, y aun no siendo por lo tanto sus resultados estrictamente comparables, debiéndose manejar con cautela. Los resultados obtenidos para la precipitación diaria, horaria y acumulada en 3, 6 y 12 horas máxima anual proporcionan un patrón espacial de cambios similar en el que, en general, las tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos son positivos pero con una intensificación del incremento, aumentando el número de celdas y regiones que los presentan en los distintos periodos de impacto y escenarios según se reduce la duración de la precipitación, y de manera más clara para el RCP 8.5 y el último periodo de impacto. Asimismo, los cambios se intensifican para todas las variables con el escenario más pesimista y los últimos periodos de impacto.

Los incrementos de mediana se ubican principalmente en la zona noroccidental, extendiéndose también hacia el noreste en el caso de los intervalos inferiores al día. Asimismo, aparecen descensos en celdas puntuales del sureste peninsular asociados a las precipitaciones de mayor duración, principalmente en el caso de la precipitación diaria para la que también se identifica descenso en una región. Los incrementos de varianza se producen para todas las variables principalmente en las regiones del centro y sur de la Península, así como en puntos de la zona nororiental en el caso de duraciones de precipitación inferiores al día. Estos resultados parecen apuntar a un mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a un incremento de la torrencialidad. En lo que se refiere a la precipitación convectiva diaria máxima anual, los resultados indicarían que el posible incremento de precipitación máxima en la zona de los Pirineos podría deberse en parte a una intensificación de los fenómenos de carácter convectivo típicos de las zonas montañosas. No se detectan cambios, sin embargo, en la zona del levante y sureste peninsular donde las precipitaciones máximas suelen estar asociadas a este tipo de precipitación. No obstante, como se ha indicado anteriormente, los resultados proporcionados por los modelos climáticos en estas regiones podrían ser menos fiables, y, por lo tanto, será necesario tomarlos con una mayor precaución.



El contraste del valor medio del número estandarizado medio de ocurrencias del máximo obtenido a través de los modelos climáticos de estudio para cada periodo de impacto y escenario con respecto al valor medio obtenido para el periodo de control muestra que los patrones estacionales futuros son muy similares a los del periodo de control en todos los casos, registrándose las mayores diferencias entre periodos de estudio, en la mayor parte de las regiones, en los meses de otoño e invierno, principalmente en el caso de las regiones de la vertiente atlántica. Estos resultados parecen indicar que no son esperables cambios relevantes en el patrón estacional de ocurrencia de las máximas precipitaciones diarias como consecuencia del cambio climático. No obstante, en la mayor parte de las regiones de la vertiente atlántica se aprecia, en algunos casos, un ligero retraso, de uno o dos meses, en el mes en el que se registra el mayor número de eventos, correspondiente a las estaciones de otoño o invierno.

En lo que se refiere a la tercera fase del estudio, la estimación de los cuantiles de precipitación máxima anual necesarios para la obtención de las tasas de cambio en cuantil se ha llevado a cabo mediante el ajuste de dos modelos estadísticos: (i) la distribución SQRT-ET_{max} ajustada por momentos ordinarios y CV regional (denominado en este trabajo como modelo SQRT-R) y (ii) la distribución GEV ajustada por L-momentos de manera local (denominado en este trabajo como modelo GEV-L). Las tasas de cambio en cuantil en una celda se han obtenido para tres periodos de retorno (T = 10, 100 y 500 años) a través de la relación entre el cuantil estimado para cada periodo de impacto y escenario y el cuantil estimado en el periodo de control (a partir de un determinado modelo climático). Los mapas de tasas de cambio medias para cada modelo estadístico se obtienen como media de las tasas de cambio asociadas al conjunto de modelos climáticos para cada periodo de impacto y escenario en cada celda. Además de la media, en el caso de la precipitación diaria máxima anual, también se han estimado los valores asociados a los percentiles 10 y 90 con el objetivo de caracterizar la variabilidad de las tasas de cambio en el conjunto de modelos climáticos, lo que constituye una medida de su incertidumbre asociada.

Las tasas de cambio no pueden considerarse directamente relacionadas con el cambio climático, sino que en gran parte son debidas a la incertidumbre inherente a la estimación de los cuantiles (en mayor medida los de más alto periodo de retorno) a partir de muestras de tamaño reducido. Es, por tanto, necesario analizar la significancia estadística de los cambios para identificar en qué casos son de suficiente magnitud como para que pueda afirmarse con cierto rigor que se deben a un cambio en la población estadística como consecuencia de un cambio en el clima. La evaluación de la significancia estadística de los cambios en cuantil medios se ha llevado a cabo a nivel local en cada una de las celdas que forman la zona de estudio, así como a nivel regional (para el modelo SQRT-R) en base al uso de las regiones climáticas, a través de la estimación de los intervalos de confianza asociados a los cuantiles del periodo de control, mediante la realización de simulaciones de Monte Carlo, y de su posterior comparación con los cuantiles para los periodos de impacto y escenarios, siguiendo la metodología propuesta por el CEDEX y que ya fue empleada en [MITECO \(2018\)](#). De este modo, el cambio asociado a aquellos cuantiles que para un periodo de impacto y escenario estén fuera de los intervalos de confianza de los cuantiles para el periodo de control, para un determinado nivel de significancia seleccionado, puede considerarse significativo. La significancia regional se ha determinado mediante la aplicación del método de la tasa de falso descubrimiento en cada región climática considerada. La evaluación de la significancia se ha realizado para un nivel de significancia de 0.10 en el caso del modelo



SQRT-R, y de 0.10 y 0.33 en el caso del modelo GEV-L. El primer nivel de significancia indica con rigor si los cambios son estadísticamente significativos, siendo 0.10 un nivel de significancia utilizado habitualmente en la aplicación práctica de los test estadísticos. La estimación de resultados adicionales para $\alpha = 0.33$ se ha llevado a cabo con objeto de relacionar los resultados de este estudio con los obtenidos para la revisión de la EPRI, debido a que dicho valor fue el nivel de significancia utilizado en [MITECO \(2018\)](#), debido a la gran incertidumbre asociada a la estimación de cuantiles para altos periodos de retorno mediante el ajuste de la distribución GEV de manera local.

El ajuste del modelo SQRT-R ha dado lugar a la necesidad de identificar modelos climáticos para los que el CV regional se encontrara dentro del rango de aplicación del ajuste de ese modelo, de forma que dichos modelos climáticos comunes pudieran ser empleados por ambos modelos estadísticos permitiendo la comparación de sus resultados en la mayor parte del territorio (en la Península y Baleares). Esta circunstancia ha limitado la disponibilidad de modelos climáticos, siendo esto especialmente problemático en el caso de la precipitación horaria máxima anual, lo que ha dificultado la comparación de resultados de las variables consideradas. Como consecuencia, el estudio se ha centrado en cuantificar y analizar con un mayor detalle la precipitación diaria máxima anual, como variable básica en los estudios de crecidas, complementando sus resultados con los obtenidos de forma cualitativa para la precipitación convectiva diaria y horaria máxima anual, para valorar los cambios en la distribución temporal de la precipitación, así como para conocer en qué medida los cambios en la precipitación se deben a cambios en aquellas de origen convectivo. Al igual que en el caso del análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza, el conjunto de modelos climáticos utilizado difiere para cada variable, por lo que los resultados obtenidos para cada una de ellas no son estrictamente comparables. A este respecto, se ha comprobado que los resultados del análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza para la precipitación diaria máxima anual son similares al utilizar los diferentes conjuntos de modelos climáticos de ambos análisis.

La precipitación diaria, convectiva diaria y horaria máxima anual muestran un comportamiento similar en relación al análisis asociado a la estimación de las tasas de cambio en cuantil: (i) el rango de las tasas de cambio en cuantil medias y medias significativas es más amplio para el modelo GEV-L que para el modelo SQRT-R. Los valores medios de dichas tasas aumentan con el periodo de impacto, el periodo de retorno y también, en general, con el escenario para ambos modelos estadísticos; (ii) el porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo positivo es mayor para el modelo SQRT-R que para el modelo GEV-L, aumentando dichas diferencias con el periodo de retorno y también, en general, con el escenario. El porcentaje de celdas con cambio significativo negativo es muy reducido para ambos modelos estadísticos; y (iii) el número de regiones con cambios en cuantil significativos negativos para el modelo SQRT-R es reducido (encontrándose el mayor número asociado a la precipitación convectiva diaria máxima anual), mientras que la mayoría de regiones presenta cambios en cuantil significativos positivos consistentes.

En definitiva, el modelo GEV-L da lugar a cuantiles más extremos y rangos de las tasas de cambio medias más amplios con una gran heterogeneidad espacial, mientras que identifica un menor porcentaje de celdas con cambios en cuantil significativos, presentando mayor dispersión



espacial, siendo este porcentaje menor a medida que aumenta el periodo de retorno. El modelo SQRT-R, en cambio, da lugar a cuantiles menos extremos y rangos de las tasas de cambio medias más estrechos, mientras que identifica un mayor porcentaje de celdas con cambio en cuantil significativo que presenta una mayor concentración por zonas, siendo este porcentaje mayor a medida que aumenta el periodo de retorno. Las zonas que presentan mayores tasas de cambio medias positivas están generalmente asociadas con cambios en cuantil significativos positivos.

El especial comportamiento del modelo GEV-L, con una reducción del número de celdas con cambio significativo según aumenta el periodo de retorno, está relacionado con la gran incertidumbre asociada a la estimación de cuantiles (especialmente para altos periodos de retorno), a partir de muestras de escasa longitud, mediante dicho modelo estadístico. En definitiva, al incrementarse la incertidumbre, la señal de cambio climático se pierde, quedando enmascarada por la incertidumbre asociada al estadístico, por lo que ya no es posible identificar los cambios asociados a la modificación del clima. En consecuencia, el modelo GEV-L no permite identificar con rigor los cambios en los cuantiles como consecuencia del cambio climático, al menos, para periodos de retorno altos. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el modelo estadístico concreto que se utilice para la obtención de las tasas de cambio de los cuantiles tiene una importancia crítica en los resultados.

Se recomienda el uso de los mapas de tasas de cambio obtenidos en este trabajo mediante el modelo SQRT-R, que proporciona tasas de cambio más robustas, con menor heterogeneidad espacial que el modelo GEV-L, lo que facilita su aplicación en la práctica, así como un mayor número de celdas con cambios significativos a medida que aumenta el periodo de retorno, lo que proporciona resultados más consistentes y que, en cualquier caso, dejarían del lado de la seguridad. Asimismo, el modelo SQRT-R es consistente con el empleado en la obtención de los mapas de precipitación máxima diaria derivados del trabajo “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” (DGC 1999). Adicionalmente, se recomienda la utilización únicamente de aquellas tasas de cambio consideradas como significativas, ya que son las que pueden considerarse relacionadas con el impacto del cambio climático; asumiendo, en principio, que no se producirían cambios en aquellas celdas donde el cambio no es estadísticamente significativo.

Las escasas celdas que presentan cambios significativos negativos para alguna de las variables consideradas están ubicadas principalmente en zonas puntuales del sur, sureste y norte peninsular. En cuanto a las celdas con cambios significativos positivos identificados mediante el modelo SQRT-R, para la precipitación diaria máxima anual se localizan en mayor medida en el centro, noroeste y noreste peninsular (con ciertas diferencias en el patrón espacial proporcionado por el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5), extendiéndose por el resto del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, excepto a zonas del este, sur y cantábrico. El patrón espacial para la precipitación convectiva máxima anual es similar, localizándose fundamentalmente los cambios en el centro y noreste peninsular, e Islas Baleares, extendiéndose también en este caso a gran parte del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, y en mayor medida para el escenario RCP 8.5 que para el RCP 4.5, excepto a amplias zonas del sur, sureste, norte y noroeste peninsular. Estos resultados coinciden con los presentados en la sección 4 en señalar al Pirineo oriental como la zona donde aumentarán en mayor medida las precipitaciones máximas de carácter convectivo. Por último,



en el caso de la precipitación horaria máxima anual, para $T = 10$ años y el primer periodo de impacto, las celdas con cambios se ubican principalmente en el centro (en mayor medida en la parte occidental que en la oriental) y noreste peninsular, alcanzando también a algunas zonas del sur y sureste. Estas zonas se extienden a prácticamente la totalidad del territorio según avanza el siglo XXI y aumenta el periodo de retorno, con ligeras diferencias en el patrón espacial entre el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados obtenidos indican que los cambios afectarán a una mayor extensión de territorio que en el caso de la precipitación diaria, destacando un mayor número de celdas con cambios en el sur y sureste peninsular e Islas Baleares para ambos escenarios, en el noroeste peninsular para el escenario RCP 4.5 y en la zona central occidental para el escenario RCP 8.5. Asimismo, las tasas de cambio son, en general, de mayor magnitud para la precipitación horaria que para la diaria. Al igual que se comentó anteriormente respecto al análisis de cambios en la mediana y en la varianza, estos resultados parecen apuntar a un mayor incremento de las precipitaciones para intervalos temporales más pequeños y, por lo tanto, a una mayor torrencialidad.

El análisis de los cambios en el factor de torrencialidad (relación entre la intensidad de precipitación horaria y diaria) se ha llevado a cabo, únicamente para el modelo SQRT-R debido a su mejor comportamiento, mediante el cálculo del cambio relativo en el factor de torrencialidad en aquellas celdas que presentan cambios en cuantil significativos para la precipitación diaria máxima anual y para la precipitación horaria máxima anual, así como para sólo una de las dos variables, en base al uso de los cuatro modelos climáticos comunes a ambas variables. Debido al escaso número de modelos disponible para realizar este análisis, y teniendo en cuenta que se observa cierto patrón regional en dichos cambios, se ha decidido elaborar mapas de cambio relativo en el factor de torrencialidad de manera regional con el fin de obtener un valor representativo del cambio medio en la región, que puede proporcionar una estimación aproximada de los cambios en dicho factor a lo largo de la Península y Baleares. Estos cambios regionales se han calculado como la media de los cambios relativos en el factor de torrencialidad en las celdas pertenecientes a cada región, considerando igual a cero el cambio relativo en las celdas donde no se dispone de resultados. Esta información puede permitir disponer de una primera aproximación a los posibles cambios en la estructura temporal de la precipitación y las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) bajo el efecto del cambio climático. La estimación de la posible modificación del factor de torrencialidad, junto con la de los cuantiles de precipitación diaria máxima anual, permitiría disponer de una primera aproximación a las posibles curvas IDF futuras si se adopta la expresión matemática para dichas curvas incluida en la Norma 5.2 - IC de Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras (MF 2016), y se asume que dicha forma funcional seguiría siendo válida en el futuro.

Los resultados obtenidos apoyan lo anteriormente mencionado. El cambio relativo en el factor de torrencialidad en la Península y Baleares presenta mayores valores positivos que negativos, aumentando el valor máximo con el periodo de retorno y siendo el rango (-21%, 50%), así como un mayor número de celdas con cambios positivos que negativos. Las celdas con cambios relativos positivos se encuentran distribuidas a lo largo de la Península, presentando generalmente mayores cambios a medida que aumenta el periodo de retorno y el periodo de impacto. Las zonas donde en mayor medida no se pronostican cambios (i.e., donde se encuentra la mayor parte de las celdas para las que no existe cambio en cuantil significativo para



precipitación diaria ni horaria máxima anual) se encuentran en el noroeste y sur de la Península y en Baleares. El cambio relativo regional en el factor de torrencialidad presenta un comportamiento similar, siendo el rango (-7%, 23%). Destaca la presencia de regiones con cambios mayores del 10%, cuyo número y/o magnitud aumenta generalmente con el periodo de retorno y el periodo de impacto, principalmente ubicadas en las zonas noroeste, centro y sur de la Península para el escenario RCP 4.5, y en el norte, oeste y sur de la Península para el escenario RCP 8.5 (también presentan valores próximos al 10% para este escenario la costa este y Baleares en el último periodo de impacto y $T = 100$ y 500 años). Se observan cambios relativos regionales negativos en determinadas regiones localizadas en el centro de la Península y en Baleares para el escenario RCP 4.5, así como en la zona norte de la Península y en Baleares para el escenario RCP 8.5.

Los resultados obtenidos en relación a las tasas de cambio en cuantil medias significativas son consistentes con los obtenidos mediante el análisis de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza. No obstante, se observa cómo el número de celdas con cambio significativo en cuantil es mucho mayor (principalmente para los periodos de retorno más altos) que el que presenta cambios en la mediana y en la varianza. Esto está asociado con tres factores principales: (i) el uso de test de diferente naturaleza, siendo los primeros, test estadísticos formales, y los segundos, test basados en simulaciones de Monte Carlo; (ii) el uso de diferentes modelos climáticos en los dos análisis debido a limitaciones del modelo SQRT-R; y más importante, (iii) a la identificación de cambios significativos en base a los resultados de la “mayoría” de modelos climáticos. El escaso número de celdas y regiones con tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos identificados no significa que los modelos climáticos considerados en el estudio no pronostiquen cambios significativos en dichos estadísticos, sino que existen diferencias entre los distintos modelos respecto a la ubicación geográfica de los cambios, de tal forma que únicamente en un número reducido de celdas y regiones hay coincidencia en el pronóstico de la mayoría de modelos climáticos. Sin embargo, los incrementos en mediana, varianza y sesgo de las poblaciones se traducen en un mayor incremento de los cuantiles, especialmente de los de periodo de retorno más alto, lo que provoca que las zonas en las que los cambios en cuantil son significativos para cada modelo climático se vayan extendiendo (especialmente para un modelo estadístico como el SQRT-R en el que la menor flexibilidad de la función de distribución, al contar únicamente con dos parámetros, y el carácter regional del ajuste confieren una incertidumbre reducida a la estimación de los cuantiles). No obstante, se destaca que la identificación de resultados significativos en base a la mayoría de modelos climáticos se hace necesaria debido a la gran variabilidad de resultados proporcionados por los diferentes modelos climáticos.

Es importante destacar diversas fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación de las tasas de cambio en cuantil del presente estudio:

- (i) La evaluación de la significancia estadística de las tasas de cambio medias mediante el procedimiento basado en simulaciones de Monte Carlo presenta incertidumbre debido a la necesidad de generar series sintéticas en base a un proceso aleatorio para el que se usa una longitud de datos relativamente corta (i.e., 30 años, que es la longitud de datos asociada al periodo de control), siendo complicada la obtención de resultados idénticos al repetir el proceso. El número de simulaciones a ejecutar se ha establecido en 4500, como balance



entre la gran demanda computacional asociada a la estimación de resultados para todos los casos analizados, y el uso de un número suficiente de simulaciones para obtener resultados aceptablemente robustos.

- (ii) La disponibilidad de modelos climáticos afecta a la estimación de las tasas de cambio en cuantil medias y de su significancia, así como a la estimación de las tasas de cambio en cuantil asociadas a los percentiles 10 y 90, ya que los diferentes modelos climáticos proporcionan una gran variabilidad de resultados. En este sentido, se ha decidido utilizar el mayor número de modelos climáticos disponible para cada variable de estudio con objeto de contar con la mayor cantidad de información posible para la estimación de las tasas de cambio, aunque esto conlleva que los resultados obtenidos para las diferentes variables no son estrictamente comparables. Como se ha expuesto, la identificación de cambios significativos en base a los resultados de la “mayoría” de modelos climáticos, criterio también utilizado para la identificación de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos, implica la identificación de únicamente las celdas/regiones en las que la mayor parte de los modelos climáticos coincide en su pronóstico, por lo que depende de los modelos climáticos disponibles y de la variabilidad de sus resultados. No obstante, existe, en general, cierta coincidencia en los resultados proporcionados por los distintos conjuntos de modelos en cuanto a las zonas geográficas donde aparecen en mayor medida los cambios significativos, aunque con ciertas diferencias a nivel local de celda.
- (iii) Hay que destacar la gran variabilidad de resultados entre los distintos modelos, lo que indica la elevada incertidumbre asociada a los resultados. Adicionalmente, hay que destacar la existencia de posibles inconsistencias en el valor de las tasas de cambio medias en relación a los diferentes periodos de impacto. En la práctica, puede ser necesario realizar ajustes en las tasas de determinadas celdas de tal forma que se garantice dicha coherencia. Sin embargo, las inconsistencias en relación a los escenarios de emisión no son necesariamente problemáticas, ya que aunque sería lógico esperar una mayor tasa de cambio para un escenario más pesimista, el efecto del cambio climático sobre cuantiles de precipitación puede estar afectado por diversos factores. Estas inconsistencias son el reflejo de las limitaciones que presentan los modelos climáticos para representar correctamente el comportamiento de un fenómeno tan complejo como las precipitaciones máximas y dan, asimismo, una idea sobre la elevada incertidumbre asociada a las predicciones en relación a su posible evolución futura, circunstancia que es necesario tener en cuenta a la hora de la posible aplicación práctica de dichas predicciones.

Por último, para realizar el análisis de los cambios en los cuantiles de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial se parte de las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual medias significativas (para $\alpha = 0.10$) estimadas a través del método SQRT-R. Estas tasas de cambio significativas se aplican sobre los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual observada (para lo que se toman los resultados del estudio “Máximas lluvias diarias en la España peninsular” (DGC 1999)) con el fin de obtener los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual futura. El contraste de los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial futura con los mapas de cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada observada (obtenidos ambos en base al mapa de direcciones



de la red de drenaje, mediante el cual se identifican las celdas pertenecientes a cada cuenca agregando su precipitación) permite elaborar los mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada.

Dado que los cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada se encuentran disponibles únicamente para la Península, se han obtenido resultados solo para las cuencas españolas localizadas dentro de la misma. El análisis se ha realizado para el periodo de impacto 2041-2070, considerando cada uno de los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), y para los tres periodos de retorno utilizados en el estudio ($T = 10, 100$ y 500 años).

Los resultados, teniendo en cuenta las limitaciones y fuentes de incertidumbre anteriormente mencionadas, indican que las tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada son mayormente positivas, alcanzando valores de hasta el 35%, con la excepción de un pequeño tramo de la red fluvial localizado en el sur de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas que presenta tasas de cambio negativas para $T = 10$ años en relación al escenario RCP 4.5. La extensión de las zonas donde existe una mayor densidad de tramos con valores más elevados de las tasas de cambio aumenta a medida que aumenta el periodo de retorno. Las demarcaciones hidrográficas con mayor presencia de tramos con cambios más importantes en relación al escenario RCP 4.5 son la del Guadiana, la del Tajo y la del Duero; mientras que para el escenario RCP 8.5 son el Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña, la del Júcar, la cabecera de la del Segura, la del Guadiana, la del Duero y la del Ebro.

Los mapas de tasas de cambio en cuantil medias, medias significativas y asociadas a los percentiles 10 y 90 para precipitación diaria máxima anual en relación al modelo SQRT-R en la Península y Baleares, y al modelo GEV-L en toda la zona de estudio, así como los mapas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada a lo largo de la red fluvial en la Península para el modelo SQRT-R se proporcionan en formato ASCII como resultado del estudio.

Por último, en la actualidad se está llevando a cabo en el CEDEX una revisión y actualización del trabajo "Máximas lluvias diarias en la España peninsular" (DGC 1999), así como de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), que podría conducir a reconsiderar el modelo estadístico empleado para la caracterización de las precipitaciones máximas, y que permitirá disponer de nuevos cuantiles de precipitación diaria máxima anual observada, en base a series de datos actualizadas. De esta forma, en un futuro próximo, podría ser necesaria la obtención de unas nuevas tasas de cambio en cuantil para las variables de estudio, así como de unas nuevas tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la red fluvial, en base a los nuevos mapas de cuantiles y al nuevo modelo estadístico considerado.



8. EQUIPO DE TRABAJO

El desarrollo de los trabajos objeto de este informe ha estado a cargo del Área de Hidrología del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y en su realización han participado, además del abajo firmante, Ana Isabel Requena Rodríguez, personal de investigación, y Celia García Montañés, Coordinadora de Programa Técnico-Científico. Adicionalmente, han colaborado en la elaboración del **Anexo nº 9** Julio Villaverde Valero, Director de Programa, José Eduardo Moyano Capilla, Técnico Superior, y Lara Incio Caballero, Jefe de Sección Técnica, de dicha Área.

Madrid, mayo de 2021

El Director del trabajo,

Fdo.: Antonio Jiménez Álvarez
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Estudios de Agua y Medio Ambiente



CEDEX



REFERENCIAS

- AEMET (2008). Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. VV.AA. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 978-84-8320470-2.
- AEMET (2016). Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Democrático. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat.
- Barranco LM, Álvarez-Rodríguez J, Olivera F y Potenciano A (2017). *Analysis of downscaled climatic simulations to infer future changes on high precipitation in Spain. International Journal of River Basin Management*, 15(2), 161-173.
- Benjamini Y y Hochberg Y (1995). *Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)*, 57, 289-300.
- Berg P, Christensen OB, Klehmet K, Lenderink G, Olsson J, Teichmann C y Yang W (2019). *Summertime precipitation extremes in a EURO-CORDEX 0.11 ensemble at an hourly resolution. Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(4), 957-971.
- CEDEX (2010). Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1: Evaluación del Impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Informe técnico para el Ministerio de medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- CEDEX (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Informe Técnico del Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento y Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Conover WJ, Johnson ME, y Johnson MM (1981). *A comparative study of tests for homogeneity of variances, with applications to the outer continental shelf bidding data. Technometrics*, 23(4), 351-361.
- DGC (1999). Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Serie monografías, Dirección General de Carreteras (DGC), Ministerio de Fomento.
- Diaconescu EP, Gachon P y Laprise R (2015). *On the remapping procedure of daily precipitation statistics and indices used in regional climate model evaluation. Journal of Hydrometeorology*, 16(6), 2301-2310.
- ESMF (2012). *Earth System Modeling Framework (ESMF) Reference Manual for C. EMSF Joint Specification Team*. <http://www.earthsystemmodeling.org>.
- Ferrer J (1996). El modelo de función de distribución SQRT-ET_{max} en el análisis regional de máximos hidrológicos: aplicación a lluvias diarias. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Garijo C, Mediero L y Garrote L (2018). Utilidad de las proyecciones climáticas generadas por AEMET para estudios de impacto del cambio climático sobre avenidas a escala nacional. *Ingeniería del agua*, 22(3), 153-166.
- Gu H, Zong Z y Hung KC (2004). *A modified superconvergent patch recovery method and its application to large deformation problems. Finite Elements in Analysis and Design*, 40(5-6), 665-687.
- Hipel KW, y McLeod AI (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems. Elsevier*.
- Hosking JRM (2019). *L-Moments. R package, version 2.8*. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=lmom>.
- Hosking JRM y Wallis JR (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments. Cambridge University Press*.
- Kendall MG (1970). *Rank correlation methods. London: Charles Griffin, 1948*.



- Khaliq MN, Ouarda TBMJ, Gachon P, Sushama L y St-Hilaire A (2009). *Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. Journal of Hydrology*, 368(1-4), 117-130.
- Li J, Sharma A, Johnson F (2015). *Evaluating the effect of climate change on areal reduction factors using regional climate model projections. Journal of Hydrology*, 528, 419-434
- Mann HB (1945). *Nonparametric tests against trend. Econometrica*, 13, 245-259.
- MITECO (2018). Incorporación del cambio climático en la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) en el segundo ciclo de aplicación de la Directiva de Inundaciones (2007/60/CE): Metodología general, Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO).
- MF (2016). Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento. Boletín Oficial del Estado (BOE). 10 de marzo de 2016.
- NCL (2017). *NCL: User Guide. The NCAR Command Language (Version 6.4.0) [Software]*. Boulder, Colorado. https://www.ncl.ucar.edu/Document/Manuals/NCL_User_Guide/NCL_User_Guide_v1.1_A4.pdf.
- NCL (2018). *NCL: Regridding using ESMF. The NCAR Command Language (Version 6.5.0) [Software]*. Boulder, Colorado. <https://www.dkrz.de/up/de-services/de-analysis/de-vis/vis-sw/de-ncl/de-docs/de-Regridding.pdf?lang=en>.
- Pohlert T (2020). *Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.2*. <https://CRAN.R-project.org/package=trend>.
- R Core Team (2019). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. <https://www.R-project.org/>.
- Requena AI, Burn DH y Coulibaly P (2019). *Estimates of gridded relative changes in 24-h extreme rainfall intensities based on pooled frequency analysis. Journal of Hydrology*, 577, 123940.
- Sunyer MA, Gregersen IB, Rosbjerg D, Madsen H, Luchner J, Arnbjerg-Nielsen K (2015). *Comparison of different statistical downscaling methods to estimate changes in hourly extreme precipitation using RCM projections from ENSEMBLES. International Journal of Climatology*, 35(9), 2528-2539.
- Westra S et al. (2014). *Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. Reviews of Geophysics*, 52(3), 522-555.
- Wilby RL, Dawson CW y Barrow EM (2002). *SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environmental Modelling & Software*, 17, 145-157.
- Wilby RL, Charles SP, Zorita E, Timbal B, Whetton P y Mearns LO (2004). *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA)*.
- Wilks DS (2006). *On "field significance" and the false discovery rate. Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(9), 1181-1189.

ANEXOS



Anexo nº 1

Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual para cada modelo climático de estudio



Este **Anexo nº 1** incluye las figuras asociadas al contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual para cada uno de los 15 modelos climáticos de estudio (**Figuras A1.1 a A1.15**).



CEDEX

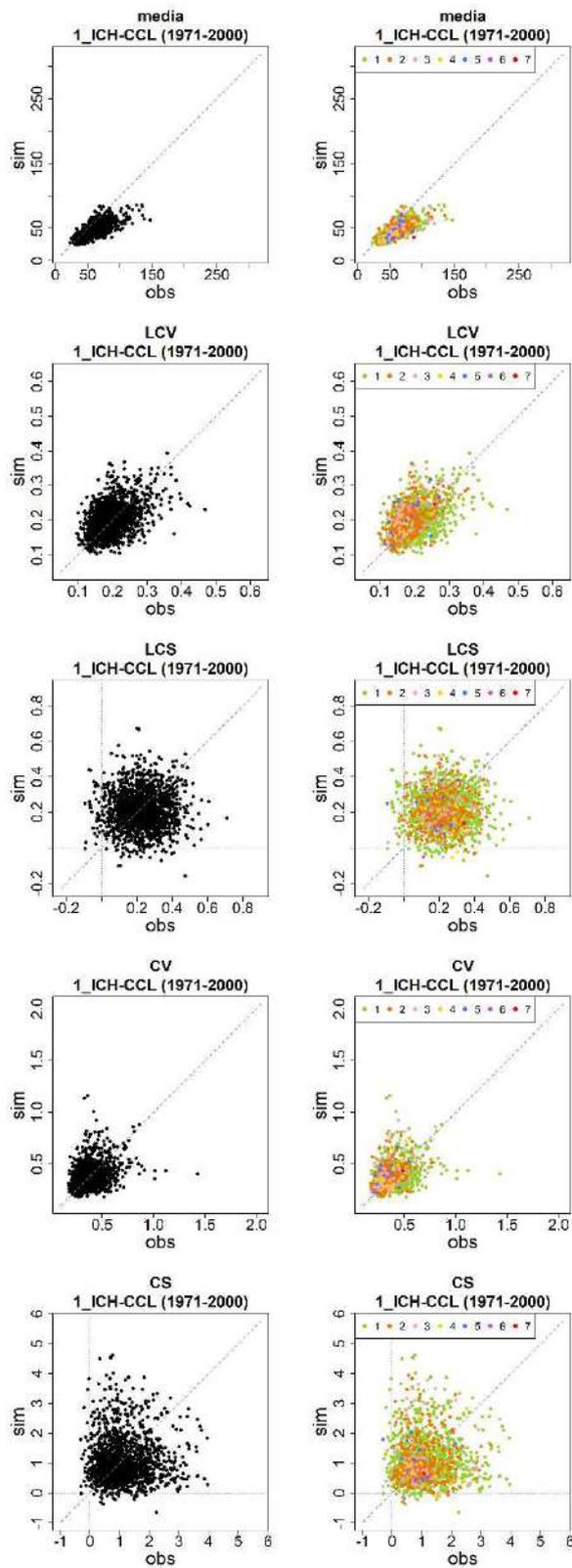


Figura A1.1. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo "1_ICH-CCL".

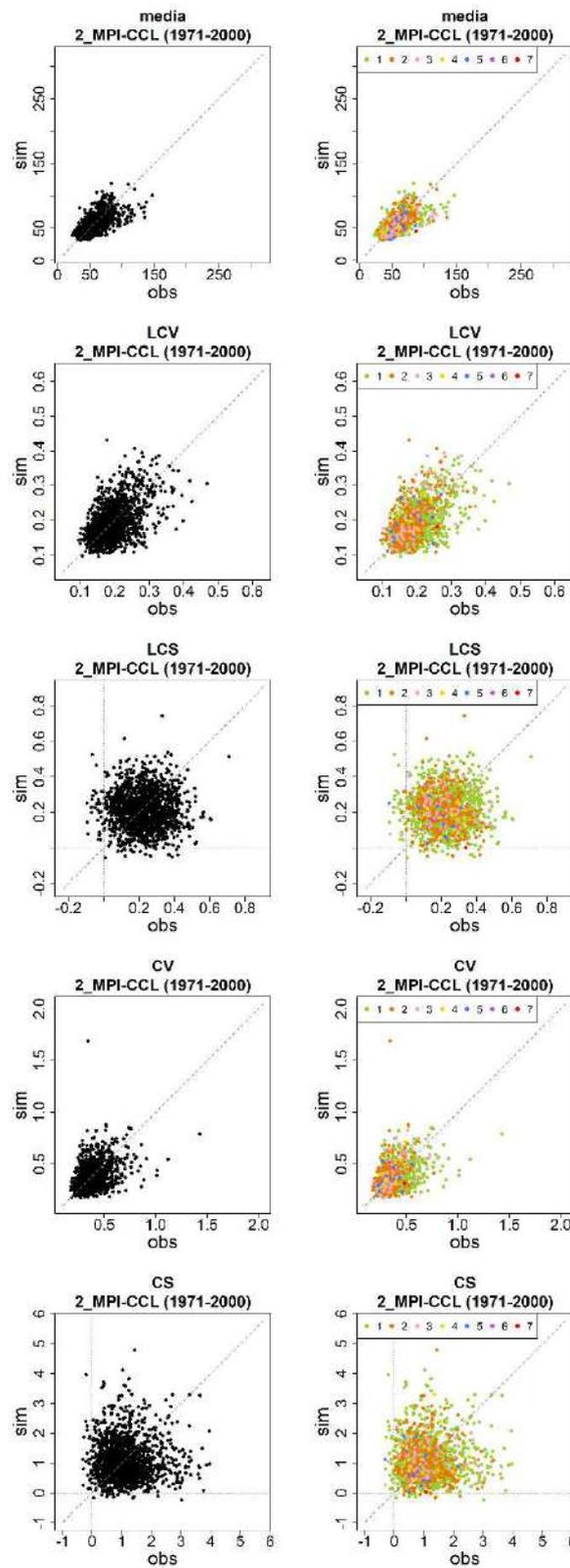


Figura A1.2. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “2_MPI-CCL”.



CEDEX

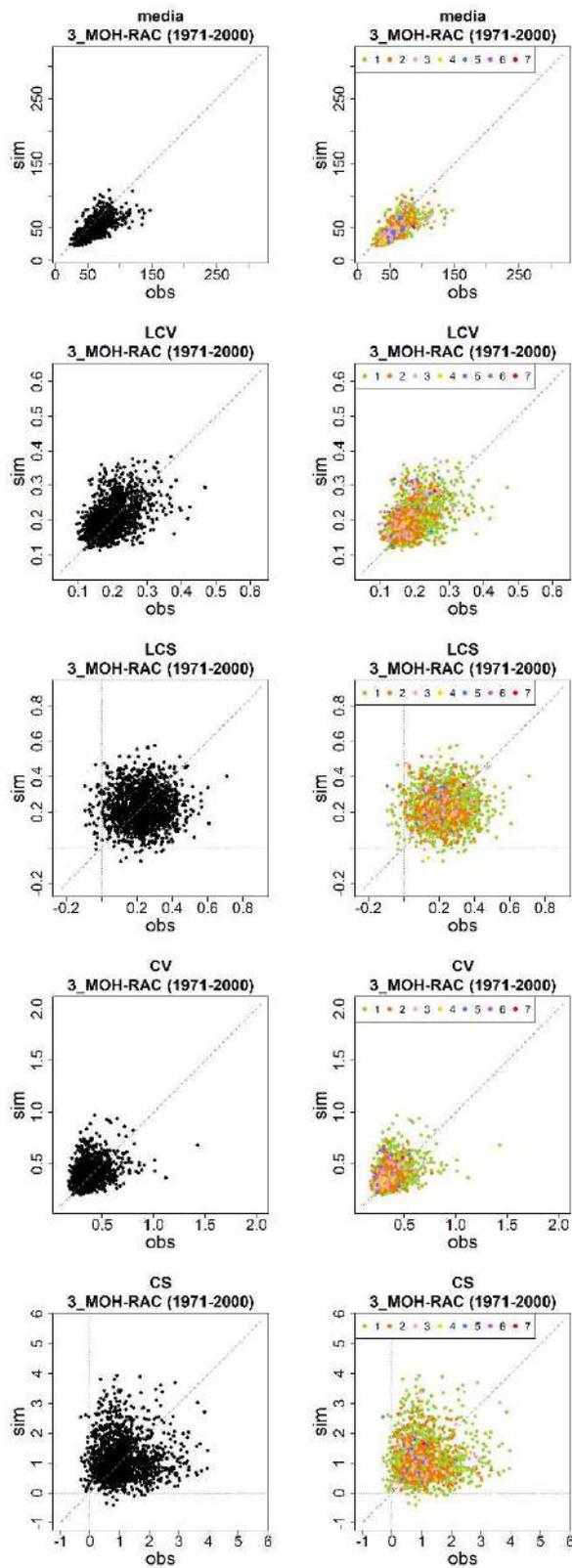


Figura A1.3. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo "3_MOH-RAC".

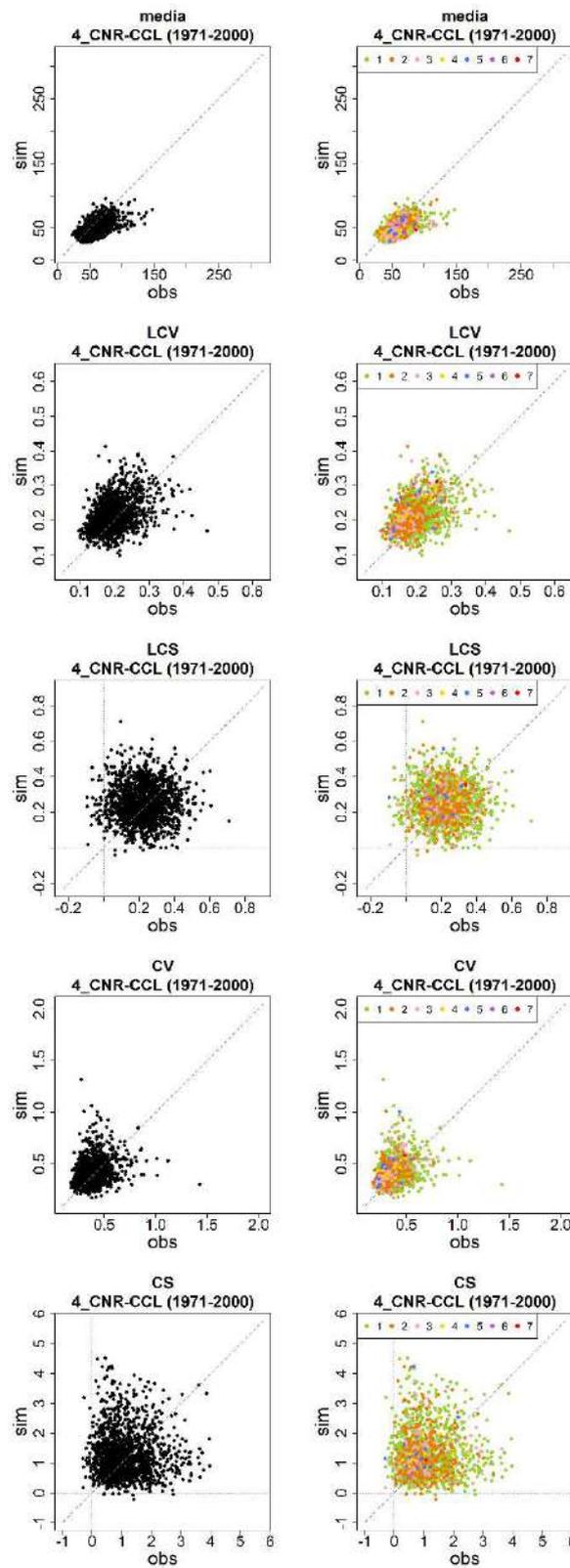


Figura A1.4. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “4_CNR-CCL”.



CEDEX

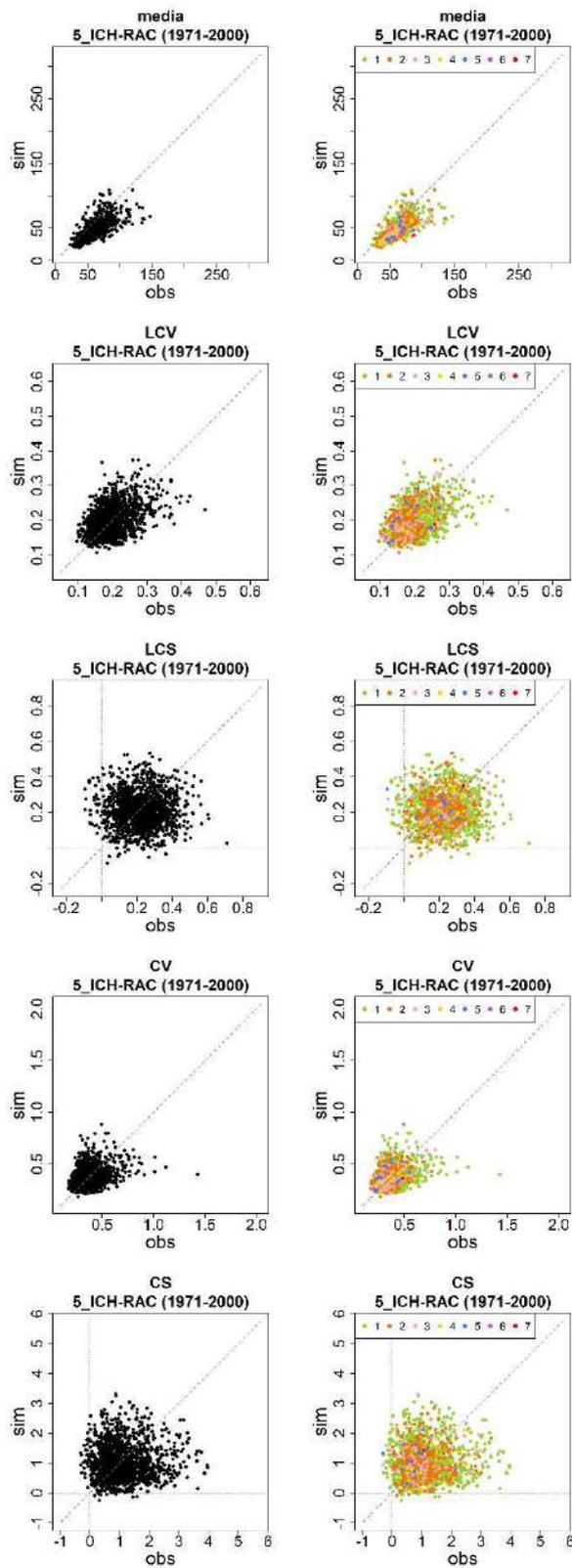


Figura A1.5. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “5_ICH-RAC”.

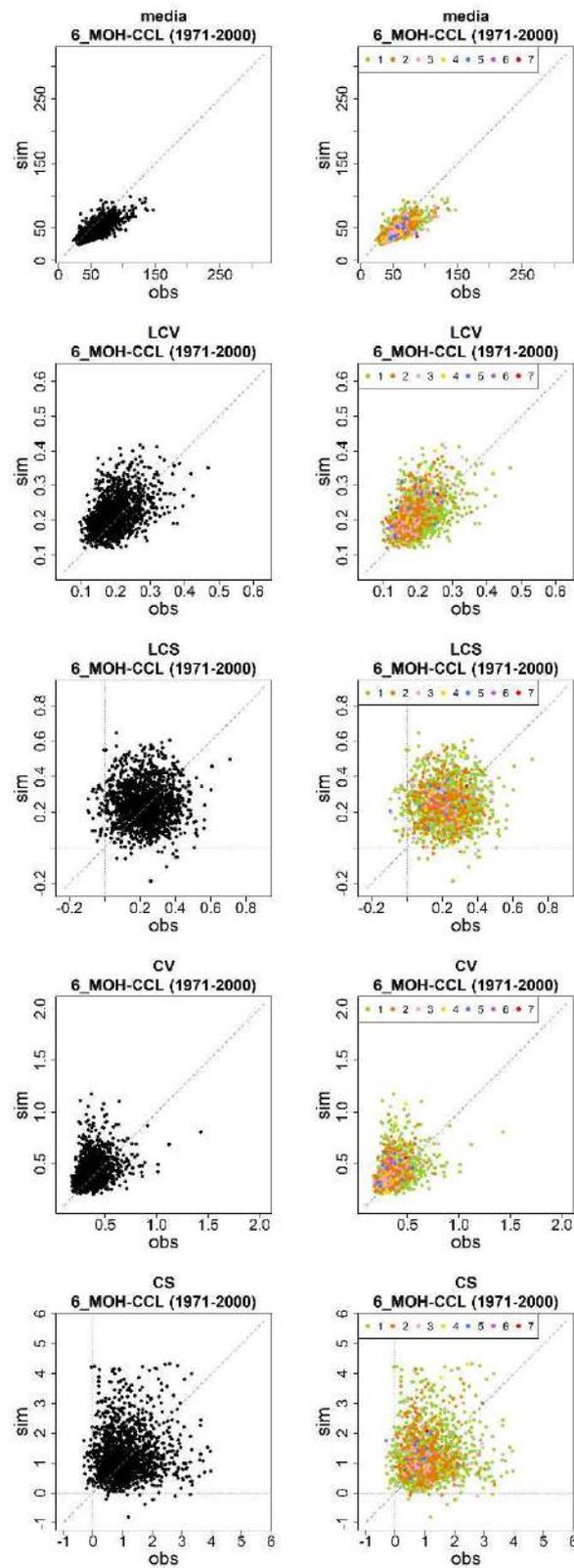


Figura A1.6. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “6_MOH-CCL”.



CEDEX

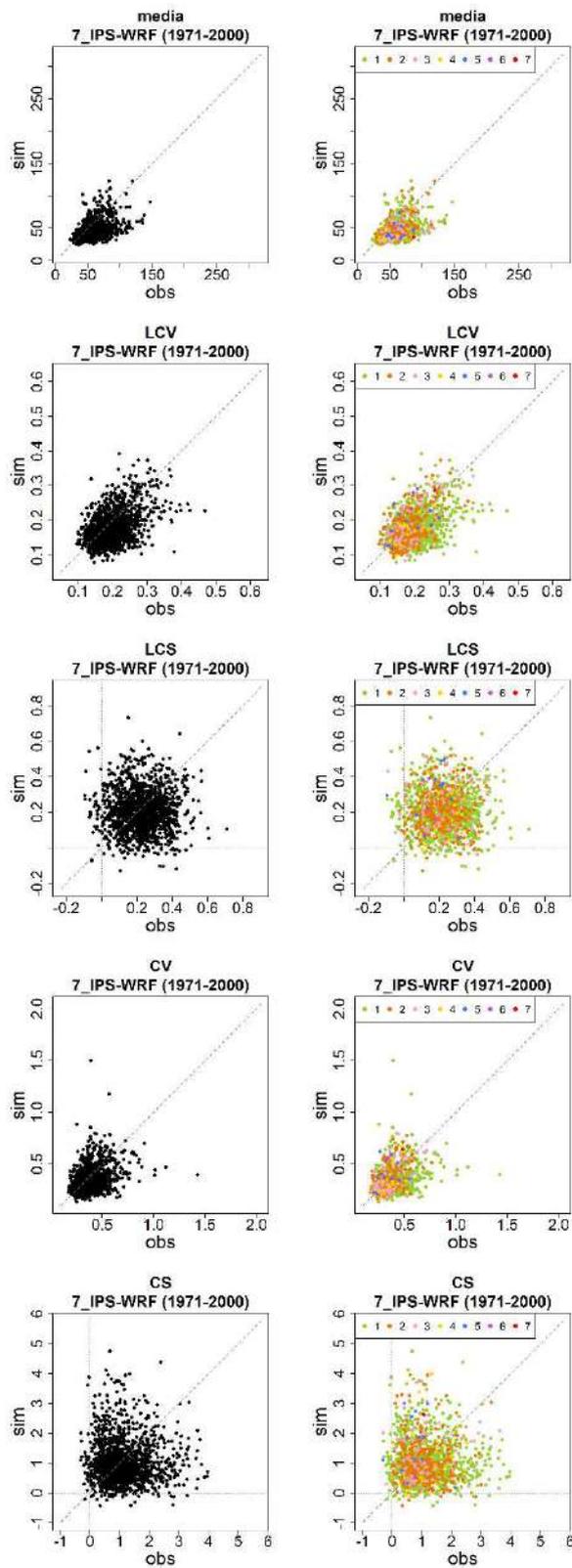


Figura A1.7. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo "7_IPS-WRF".

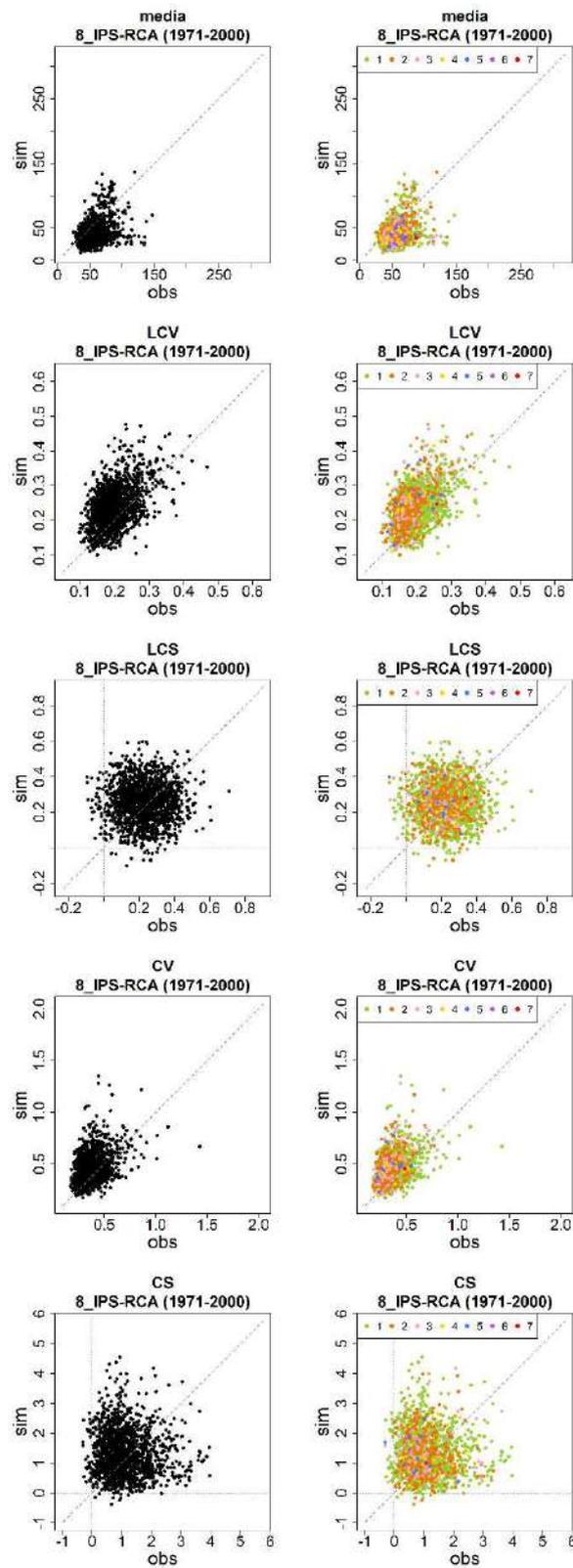


Figura A1.8. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “8_IPS-RCA”.

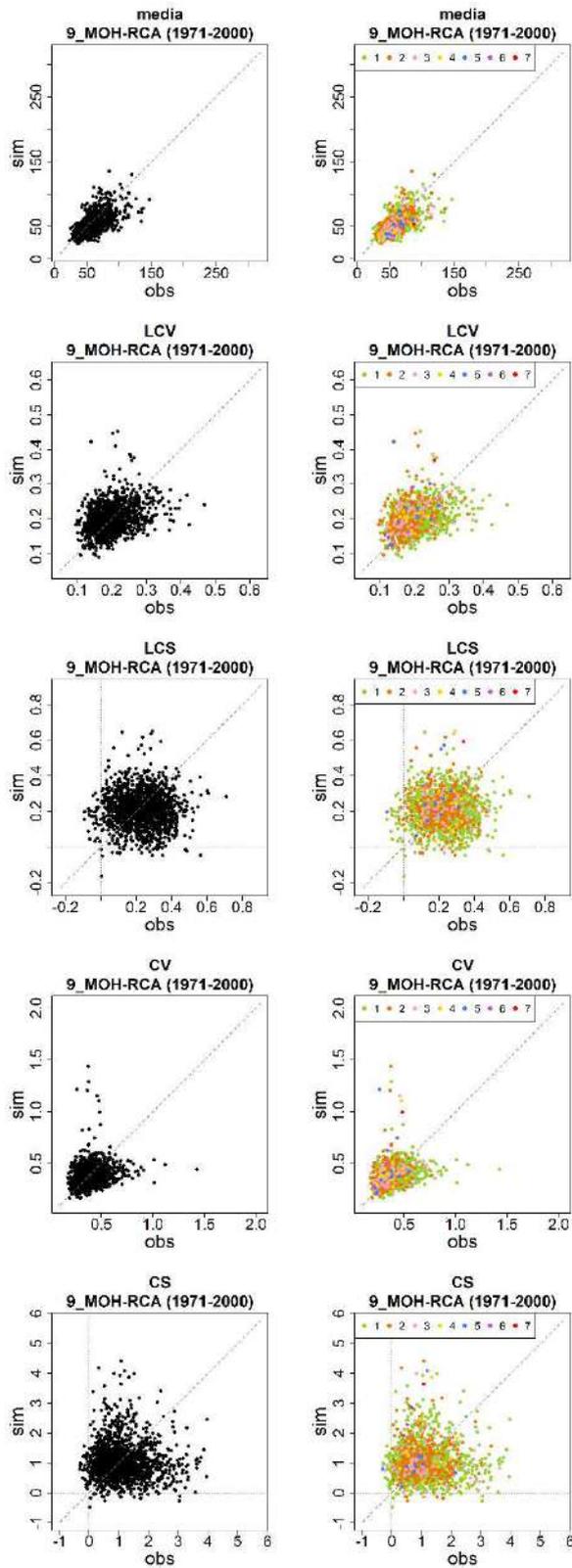


Figura A1.9. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “9_MOH-RCA”.

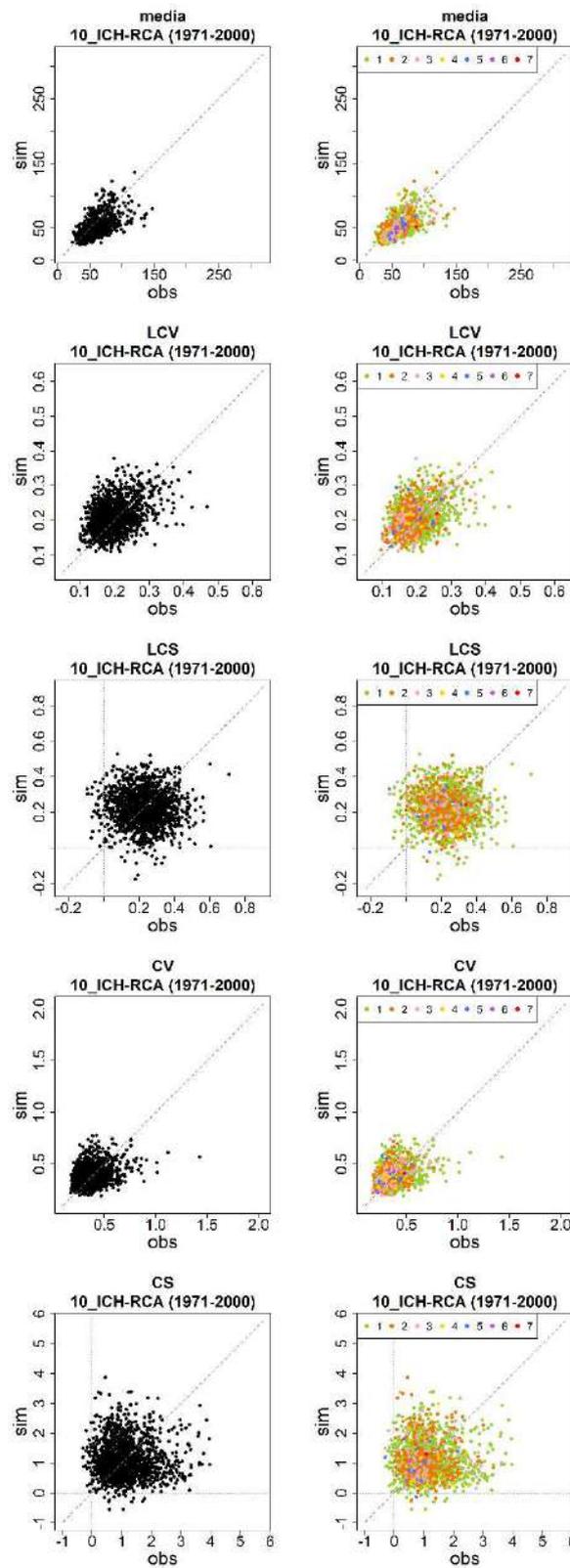


Figura A1.10. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “10_ICH-RCA”.



CEDEX

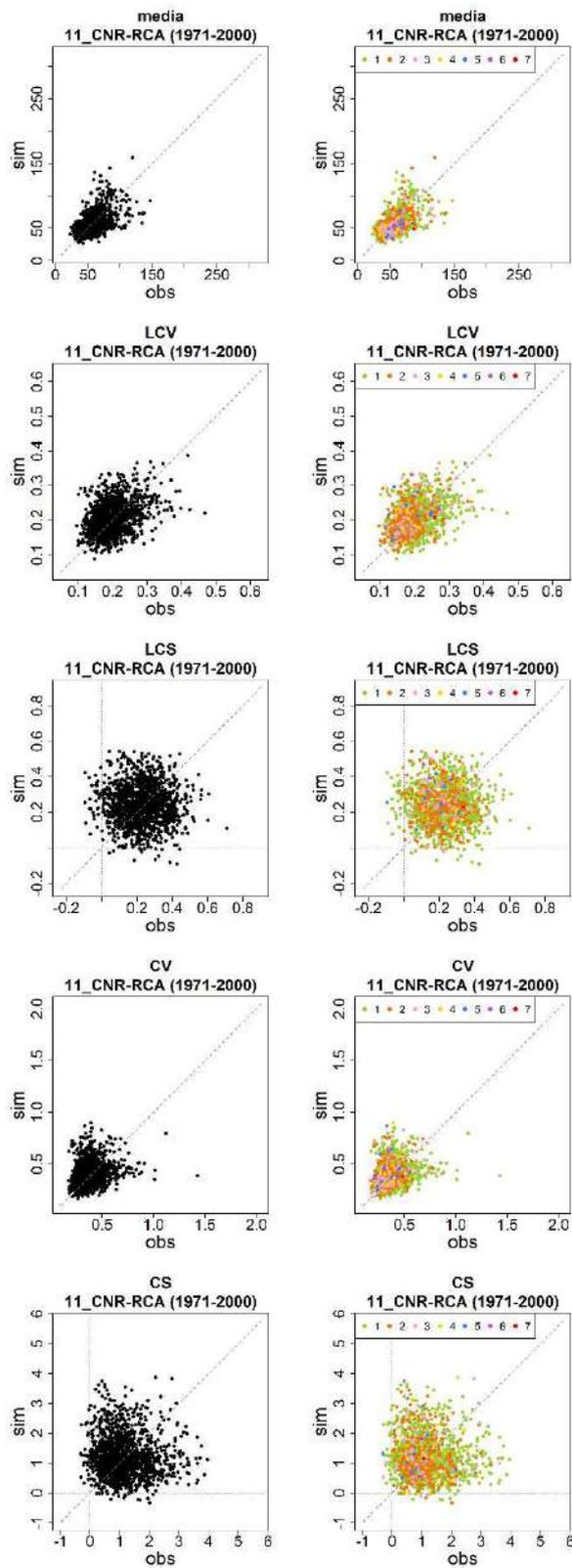


Figura A1.11. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “11_CNR-RCA”.

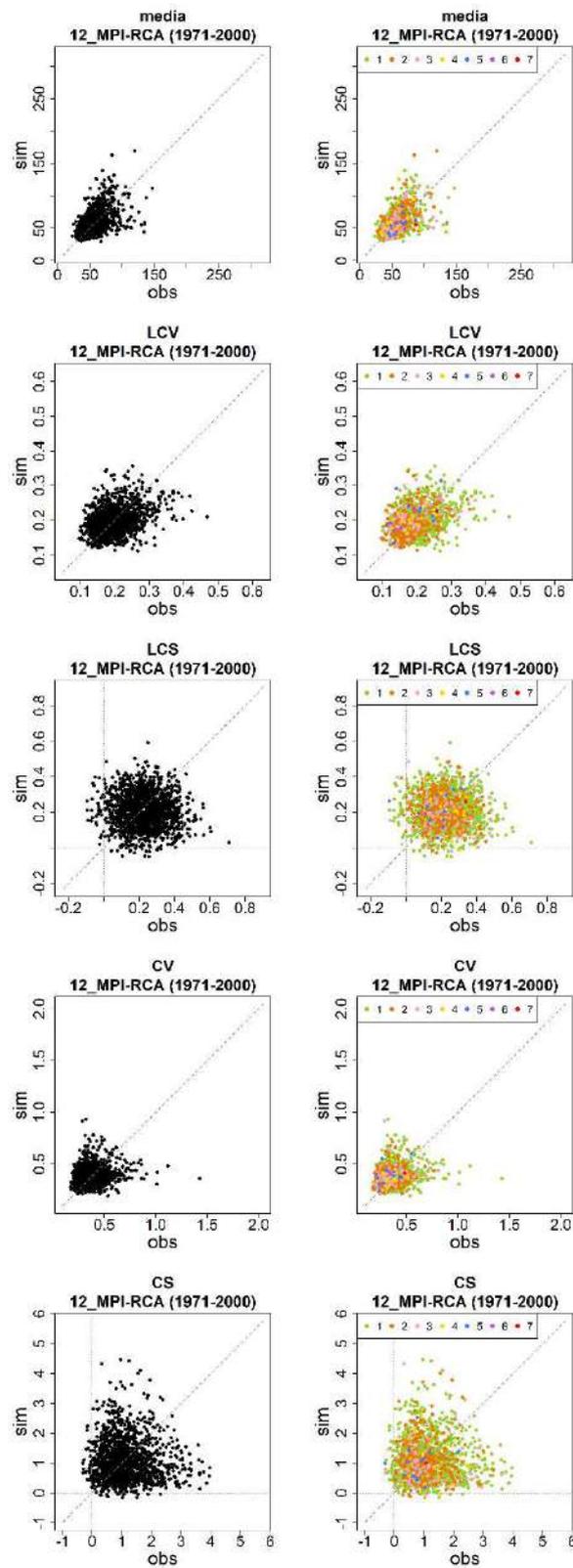


Figura A1.12. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “12_ MPI-RCA”.

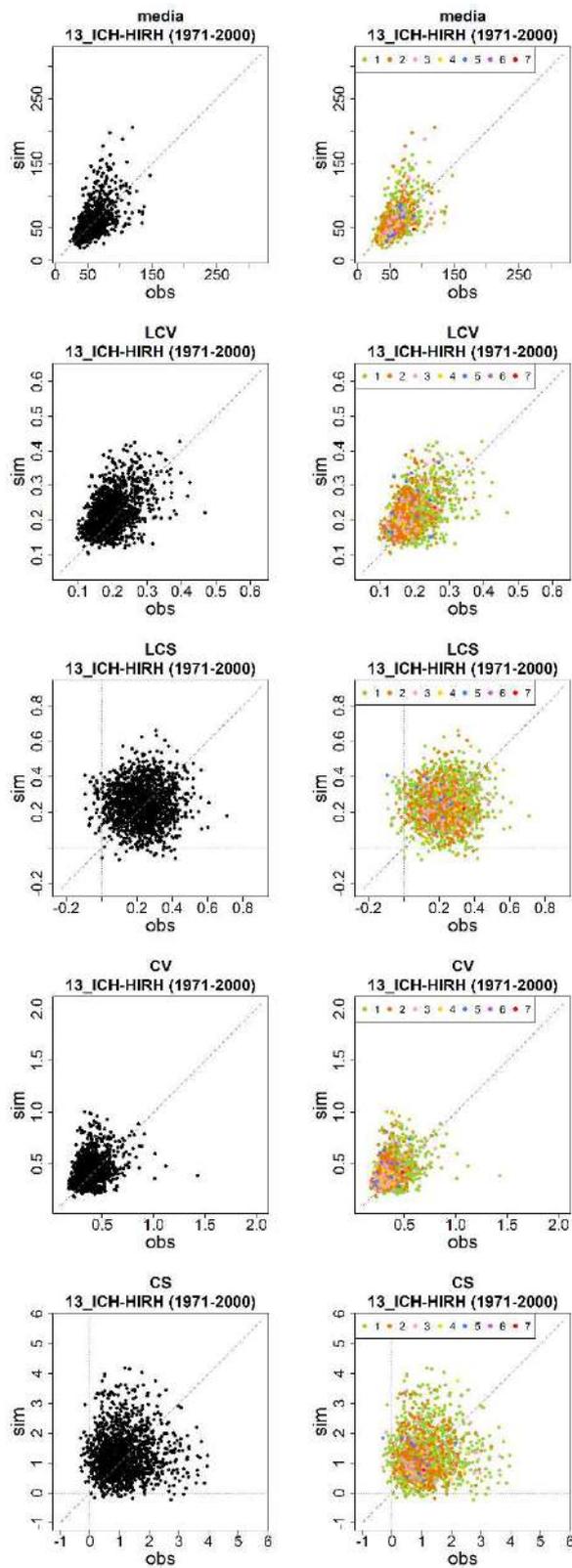


Figura A1.13. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “13_ICH-HIRH”.

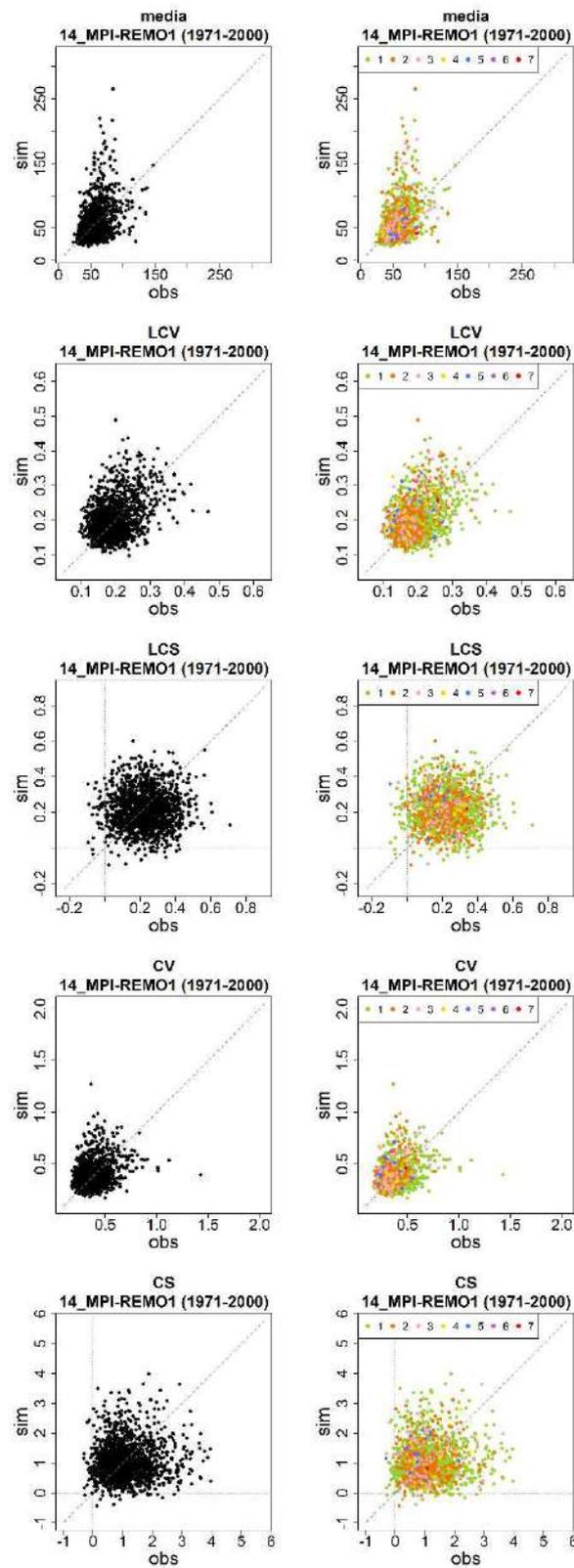


Figura A1.14. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “14_MPI-REMO1”.



CEDEX

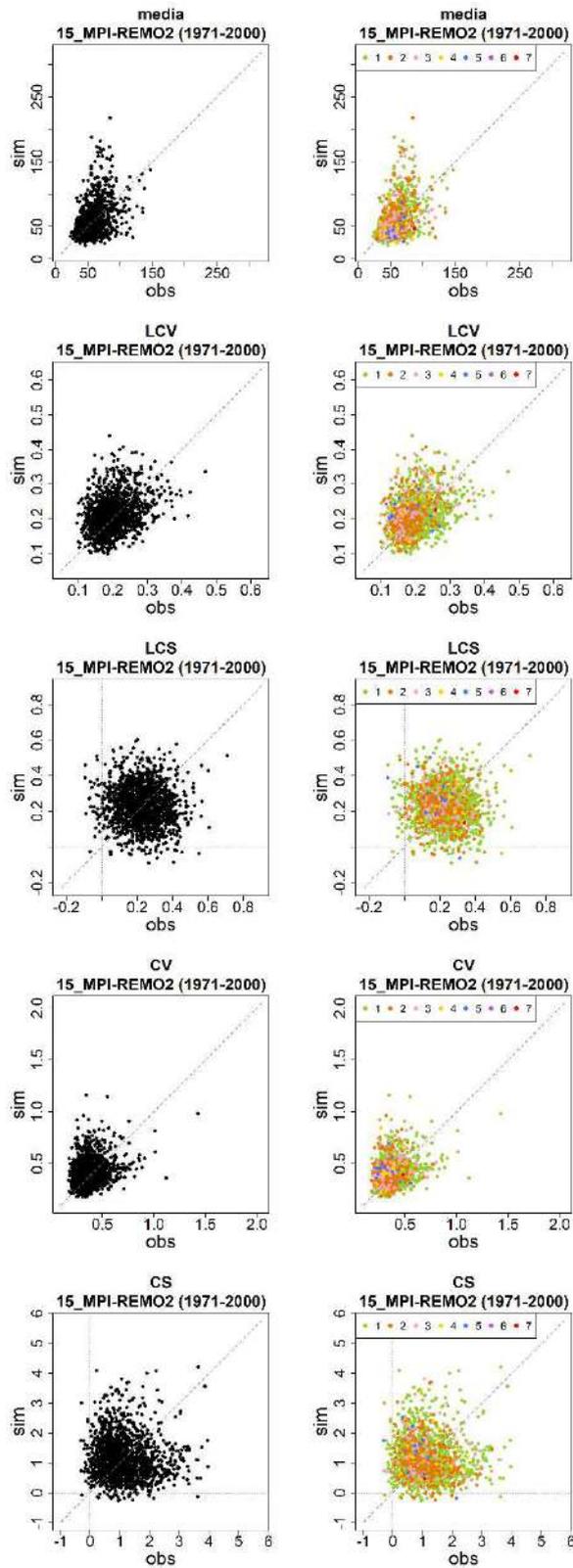


Figura A1.15. Contraste de estadísticos de series observadas y simuladas de precipitación diaria máxima anual (izquierda), indicando resultados según el número de estaciones por celda (derecha), para el modelo “15_MPI-REMO2”.



Anexo nº 2

Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual observada y simulada por los modelos climáticos de estudio para el periodo de control en las regiones climáticas



Este **Anexo nº 2** incluye las figuras asociadas al contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual observada y simulada por los modelos climáticos de estudio en cada una de las regiones climáticas, con excepción de la región “1400” (Ceuta), ya que dicha región no dispone de ninguna estación con la que realizar el contraste. En consecuencia, las figuras se presentan para 28 regiones climáticas (**Figuras A2.1 a A2.28**). Los resultados observados asociados con la región “1300” (Melilla) están basados en los registros de una única estación.



Región 0101

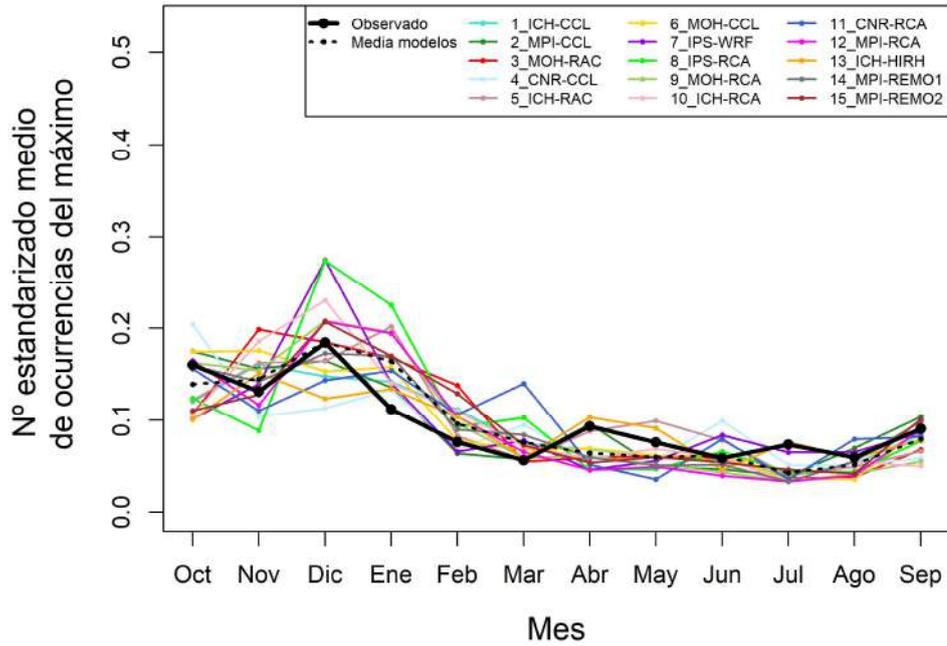


Figura A2.1. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0101".

Región 0103

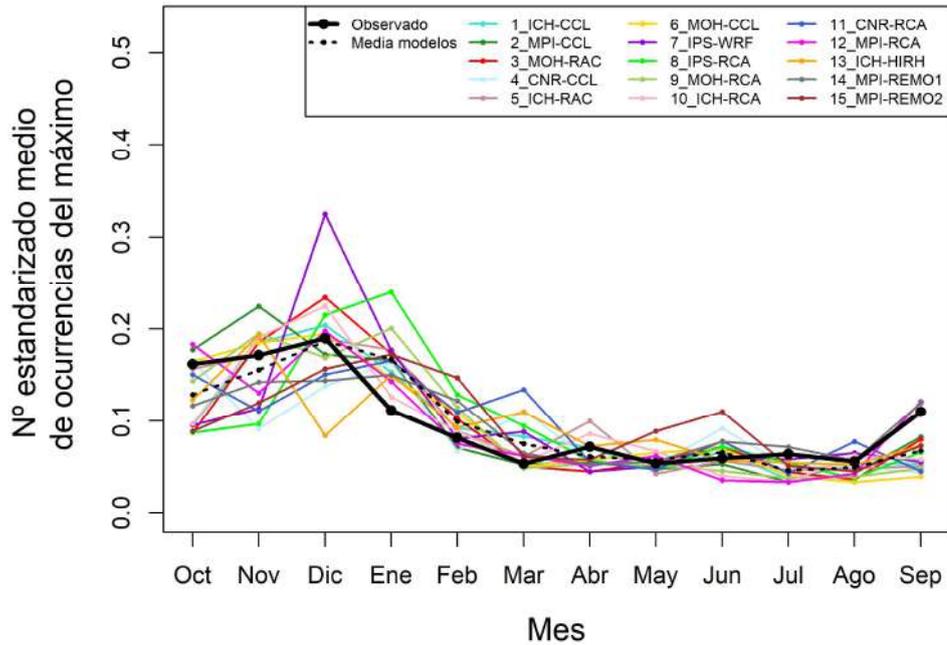


Figura A2.2. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0103".

Región 0107

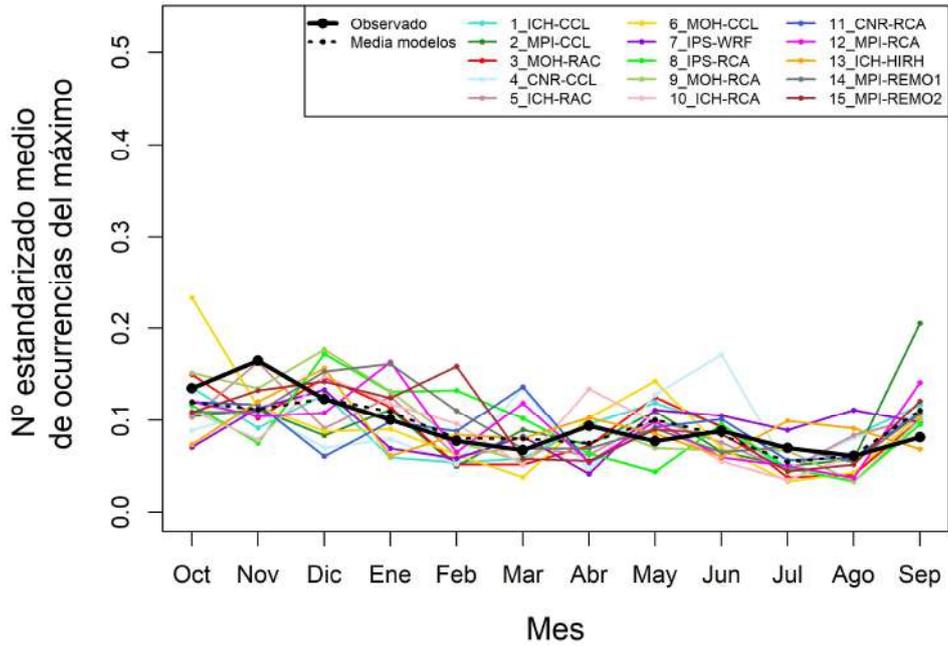


Figura A2.3. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0107".

Región 0202

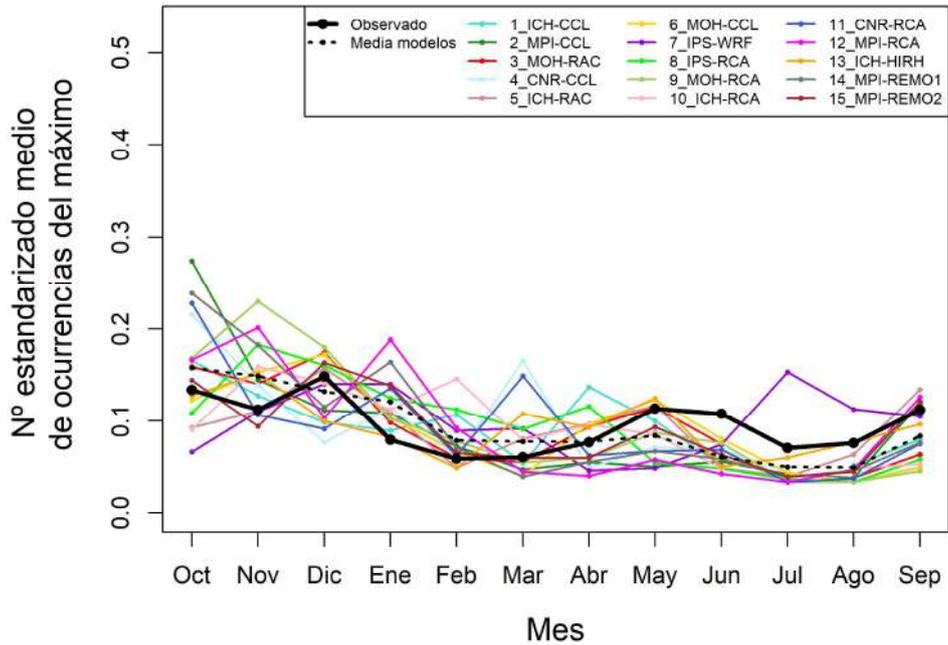


Figura A2.4. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0202".



Región 0203

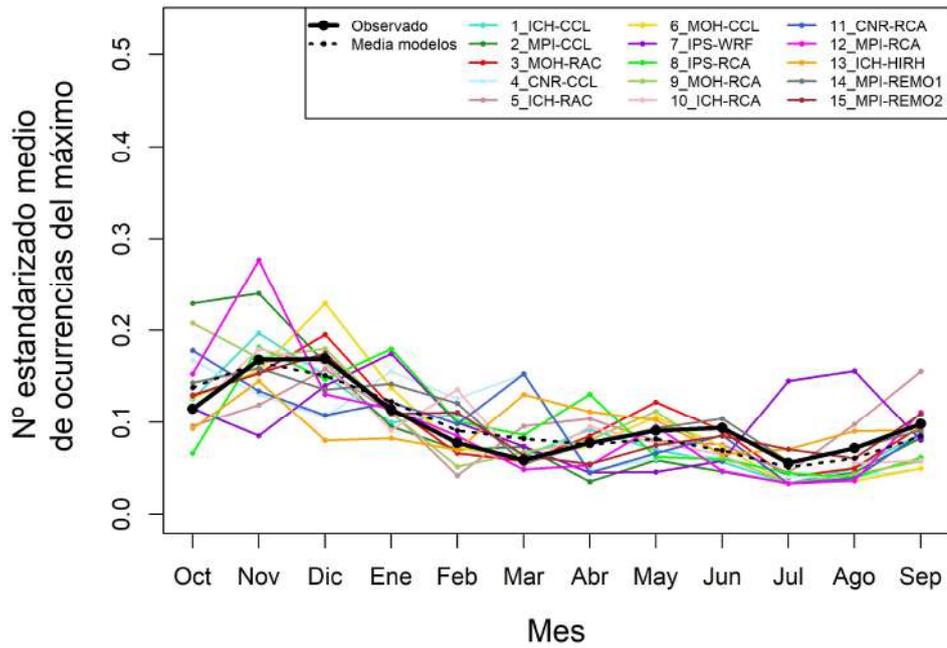


Figura A2.5. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0203".

Región 0204

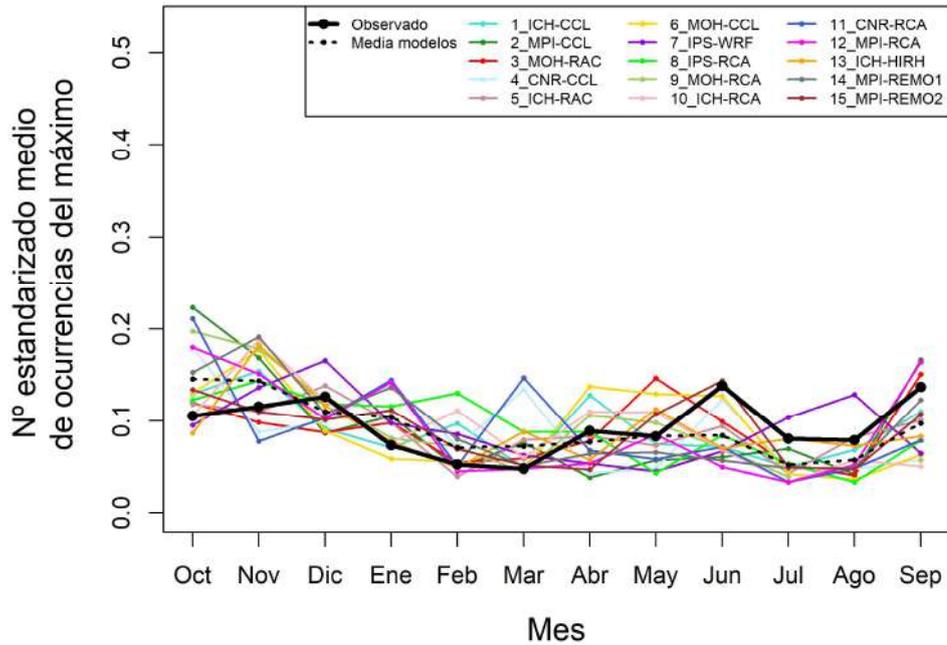


Figura A2.6. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0204".

Región 0205

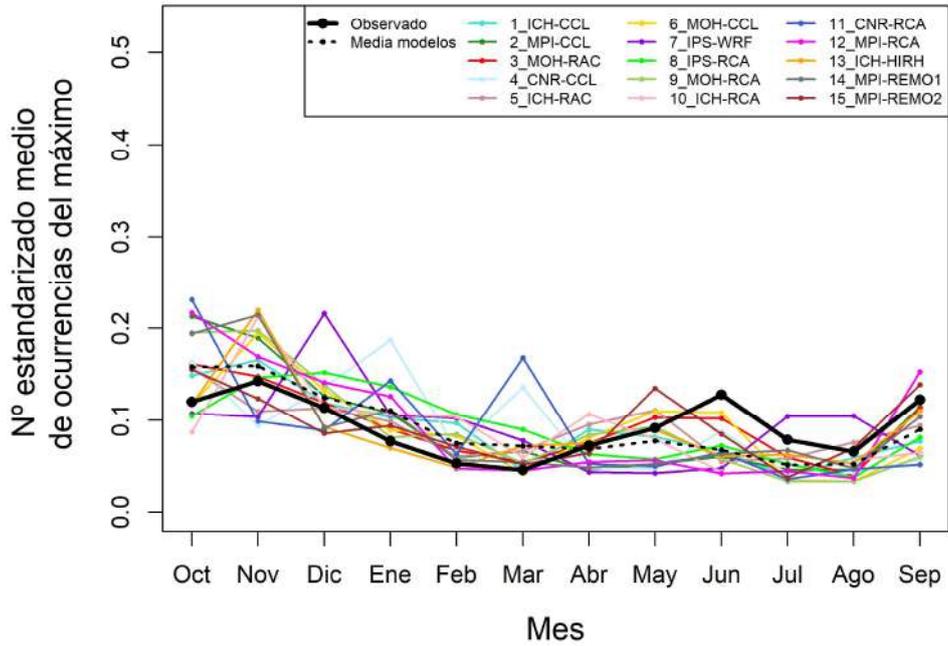


Figura A2.7. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0205".

Región 0207

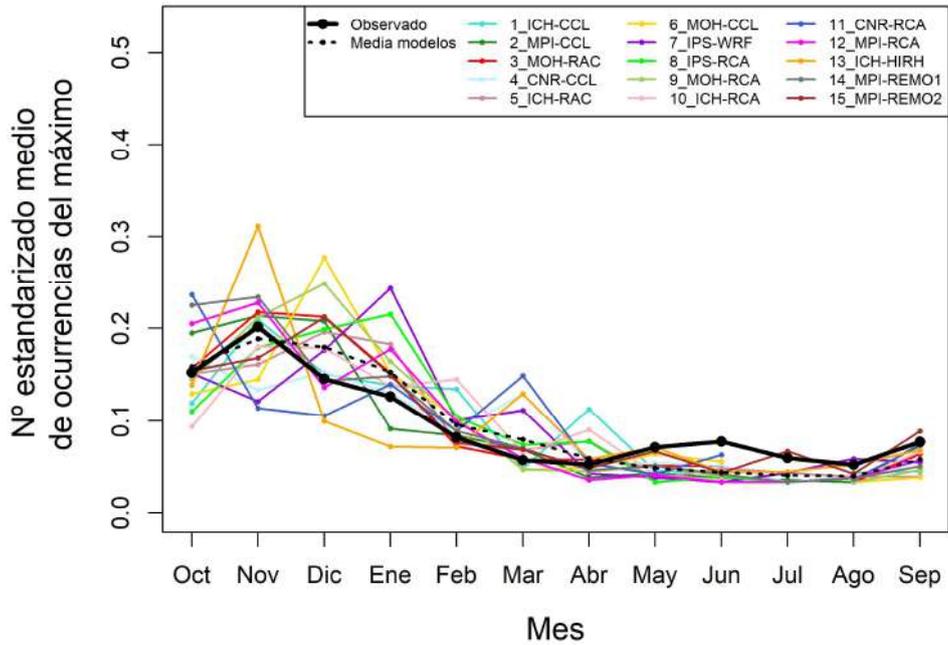


Figura A2.8. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0207".



Región 0301

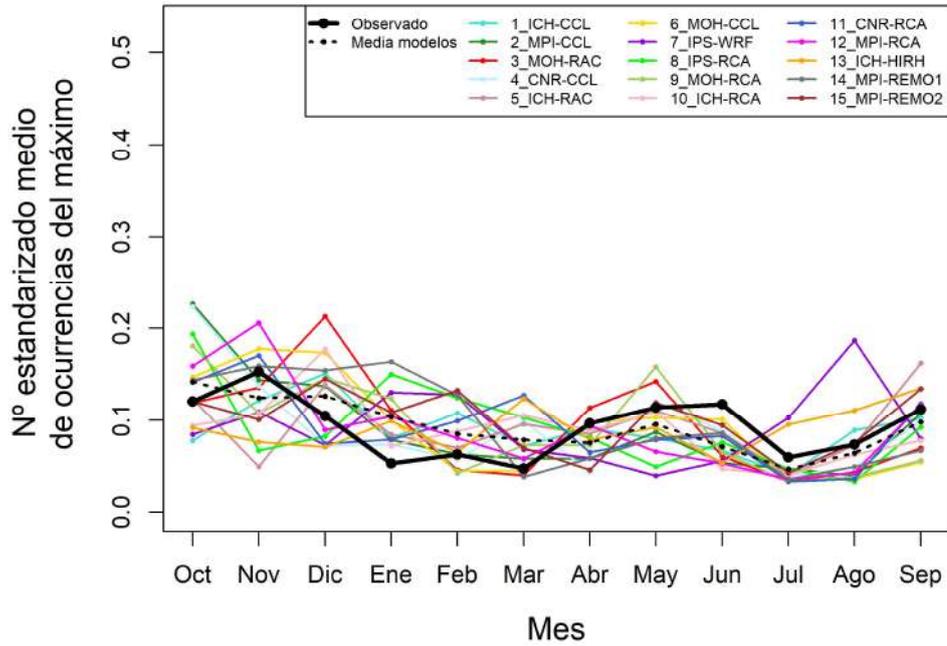


Figura A2.9. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0301".

Región 0303

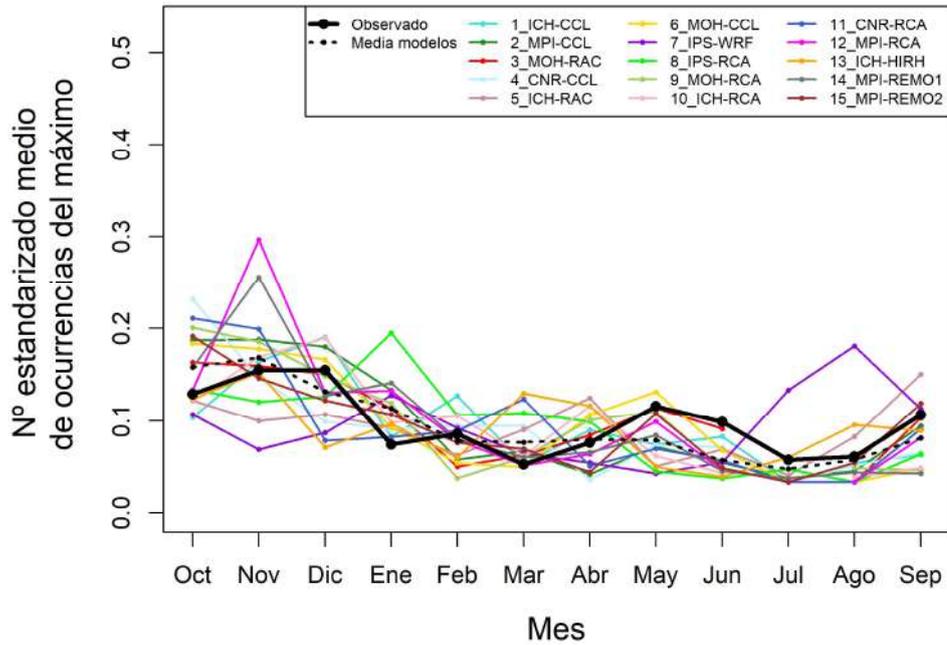


Figura A2.10. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0303".

Región 0401

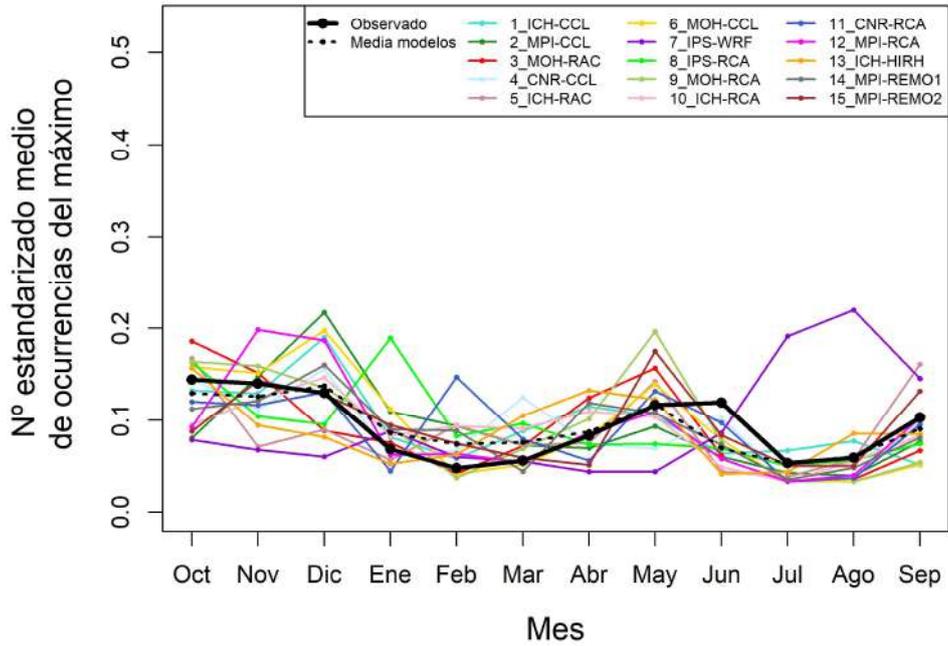


Figura A2.11. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región “0401”.

Región 0402

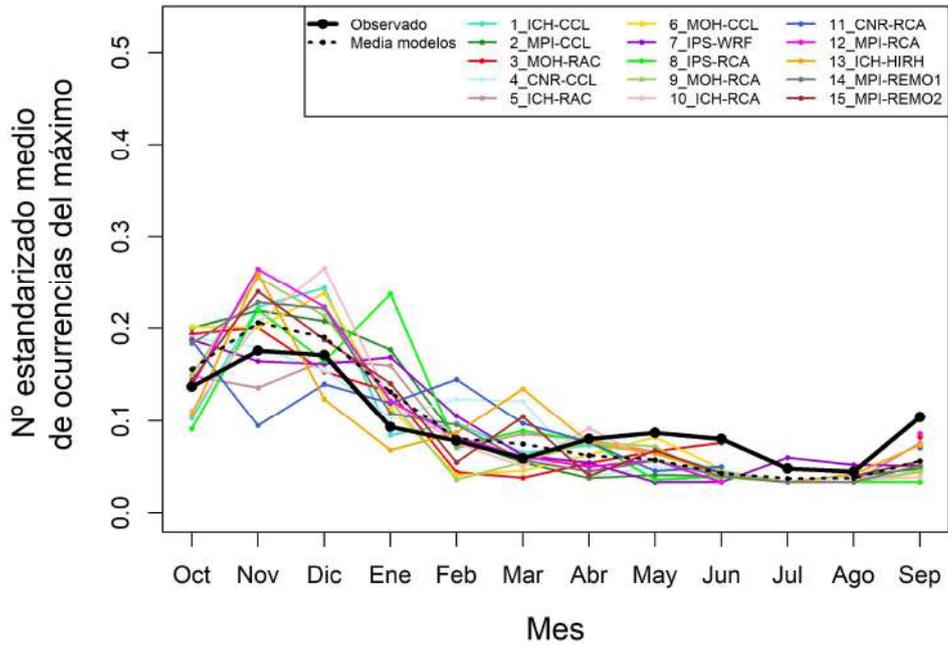


Figura A2.12. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región “0402”.



Región 0403

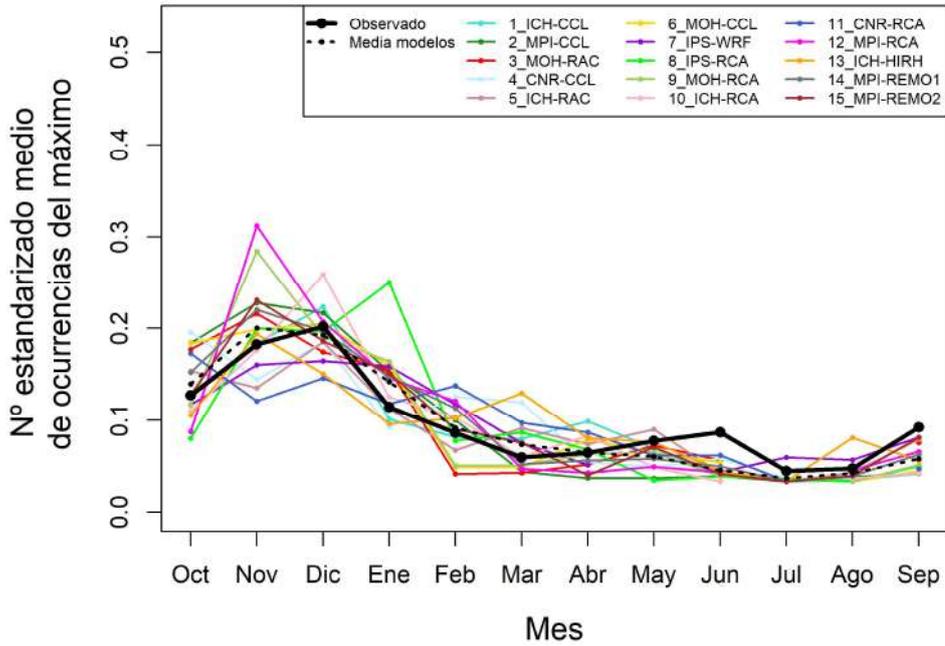


Figura A2.13. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0403".

Región 0501

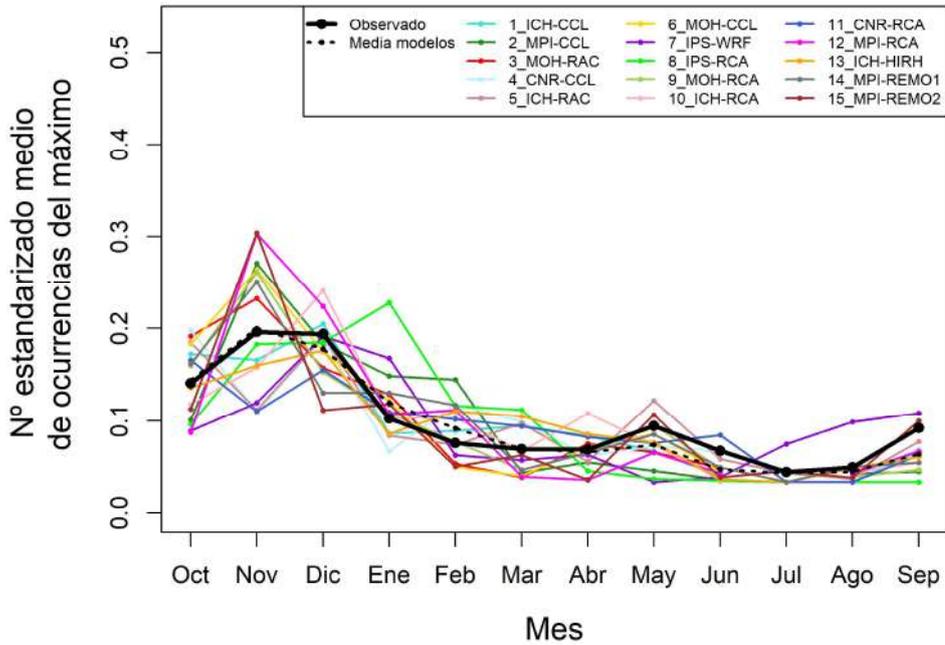


Figura A2.14. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0501".

Región 0503

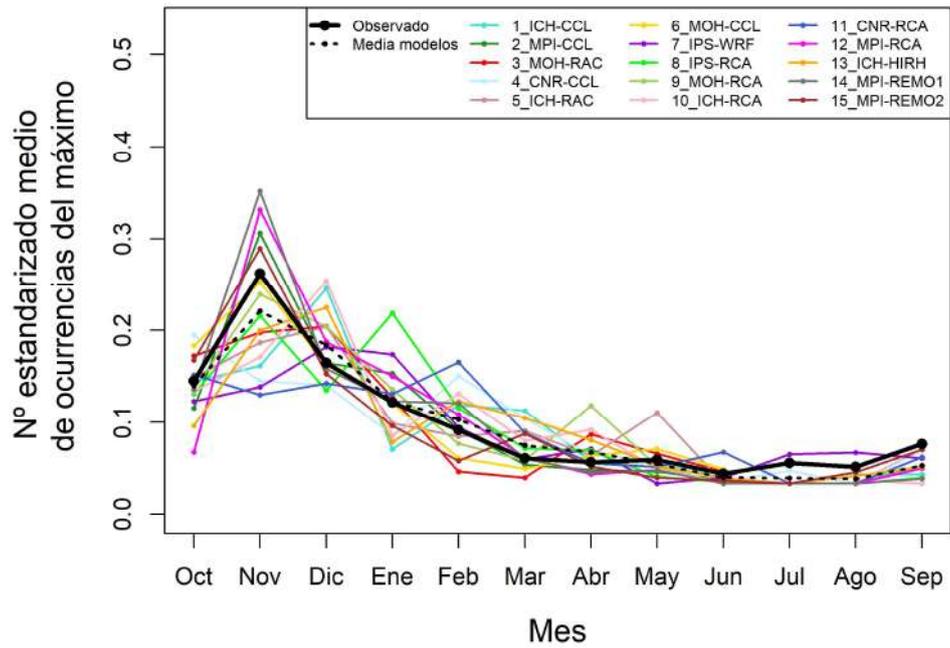


Figura A2.15. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0503".

Región 0505

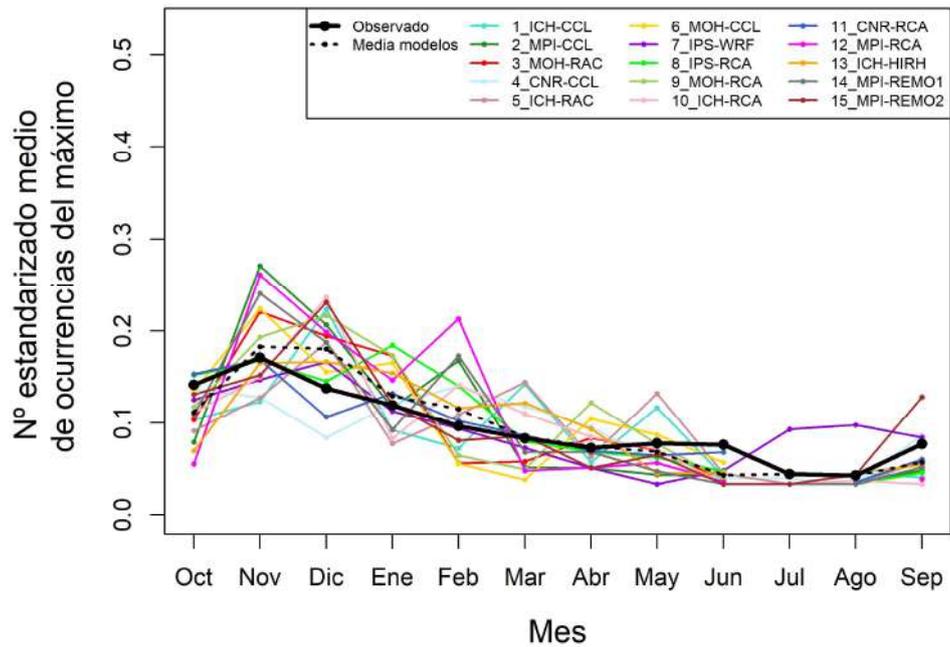


Figura A2.16. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0505".



Región 0601

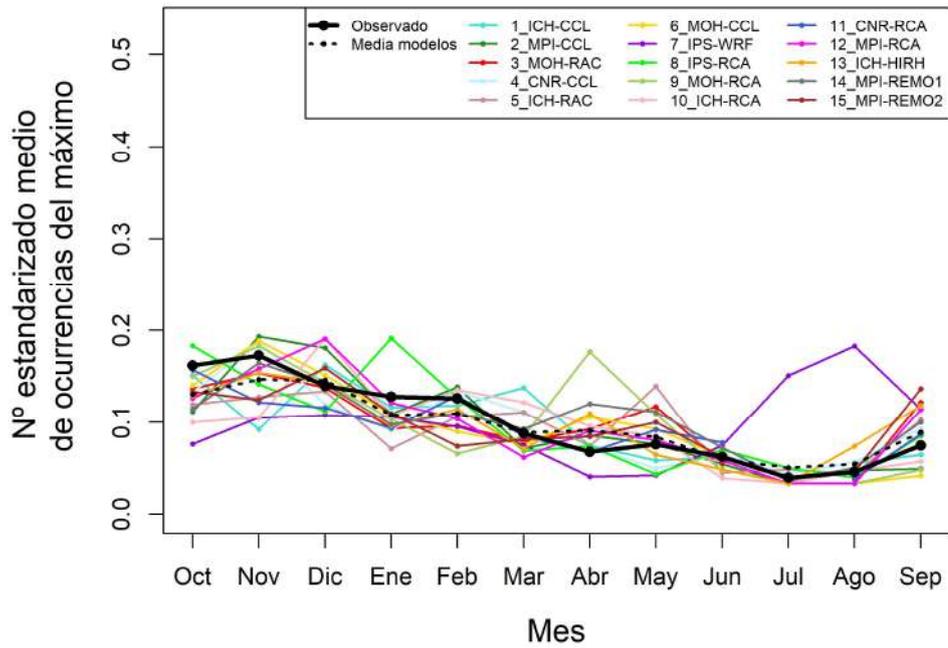


Figura A2.17. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0601".

Región 0603

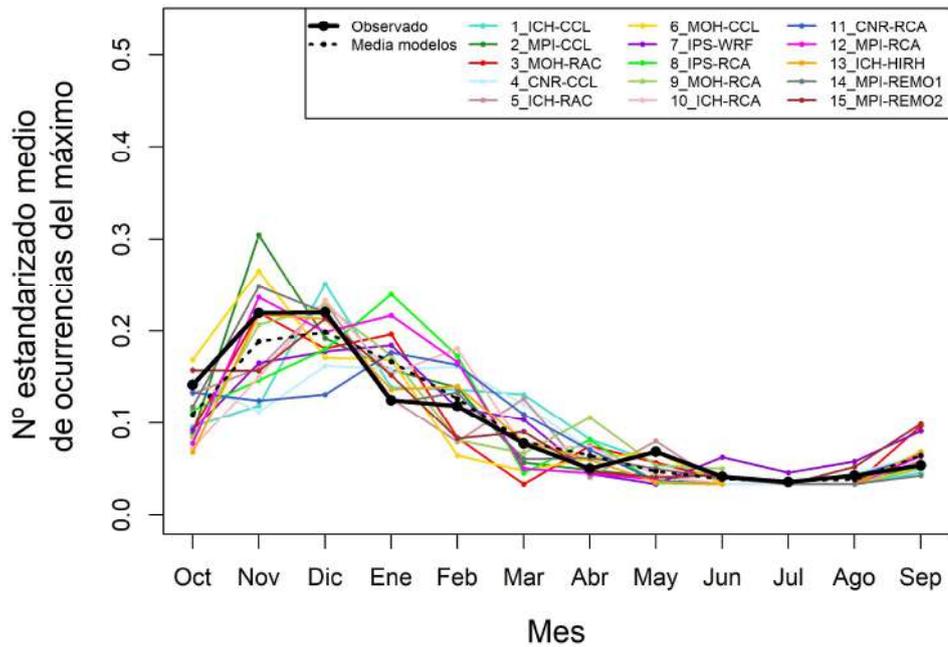


Figura A2.18. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0603".

Región 0701

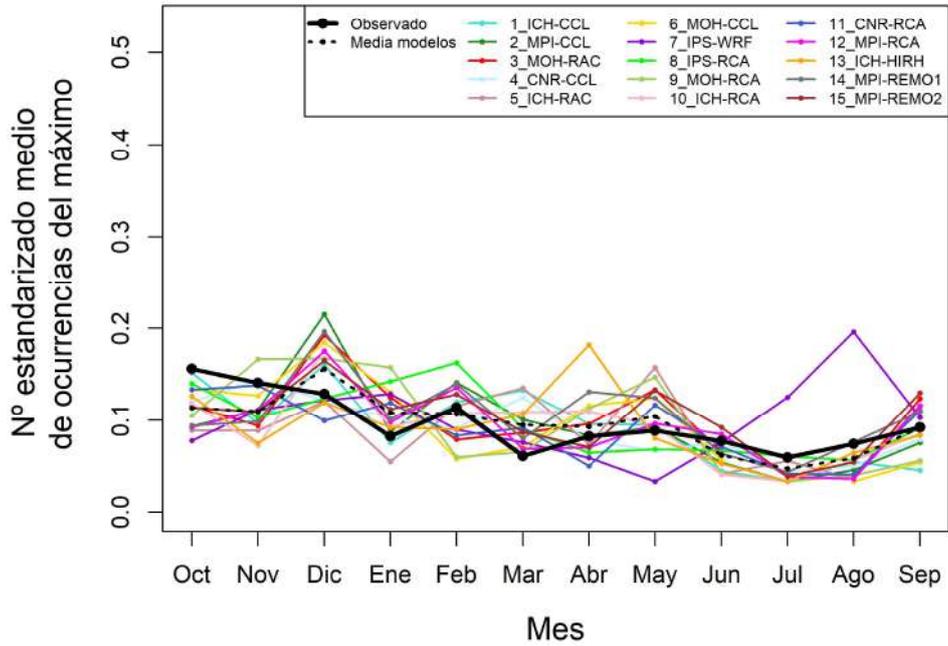


Figura A2.19. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región “0701”.

Región 0801

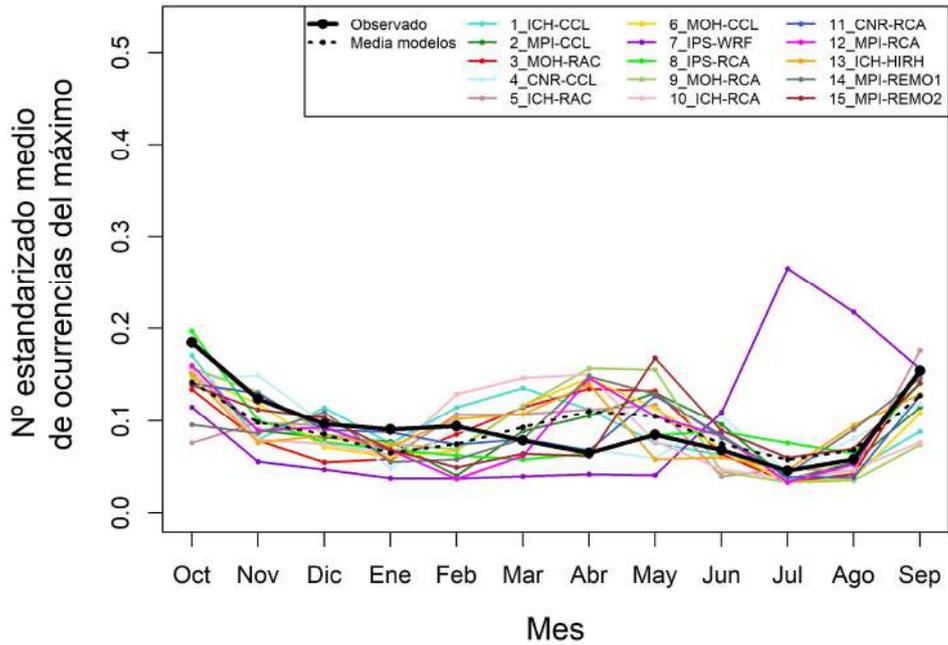


Figura A2.20. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región “0801”.



Región 0901

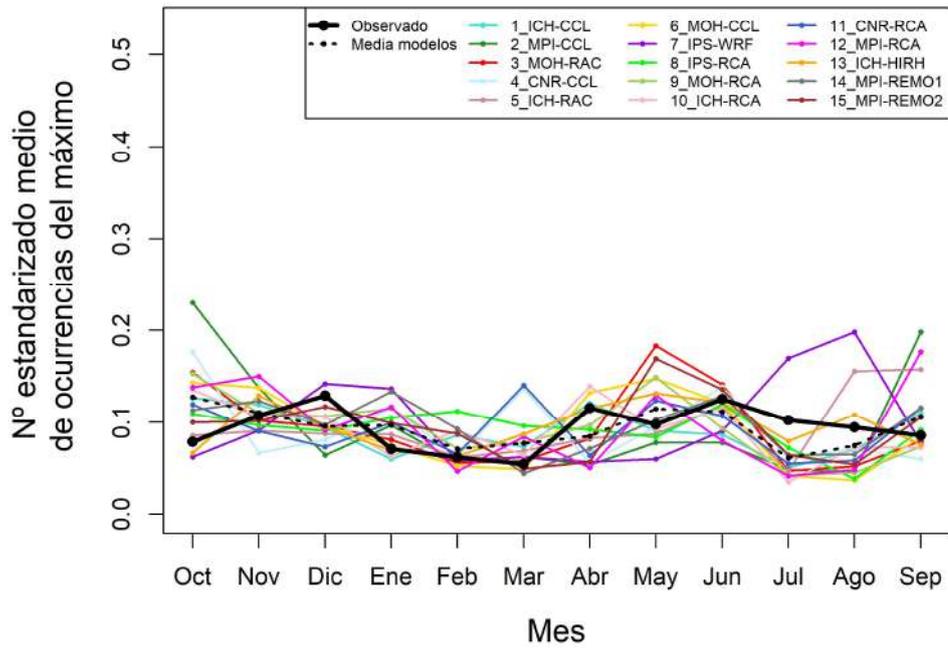


Figura A2.21. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0901".

Región 0903

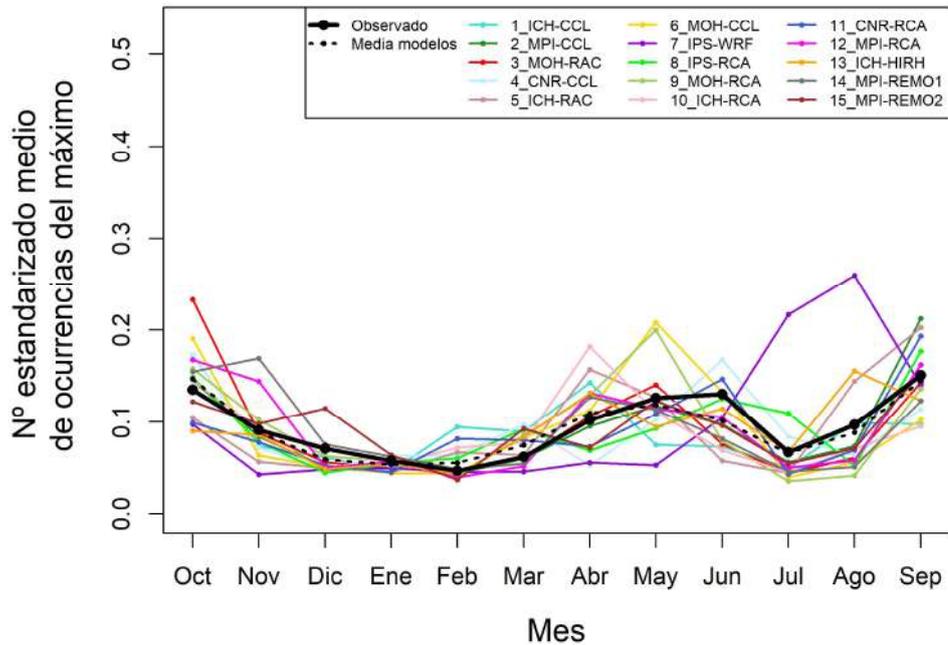


Figura A2.22. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0903".

Región 0905

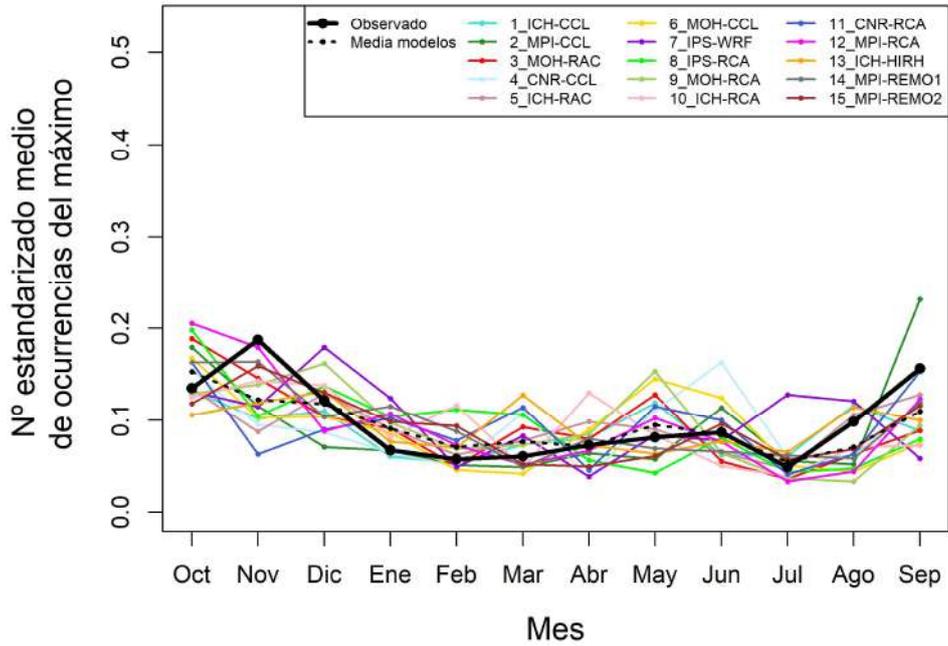


Figura A2.23. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0905".

Región 0907

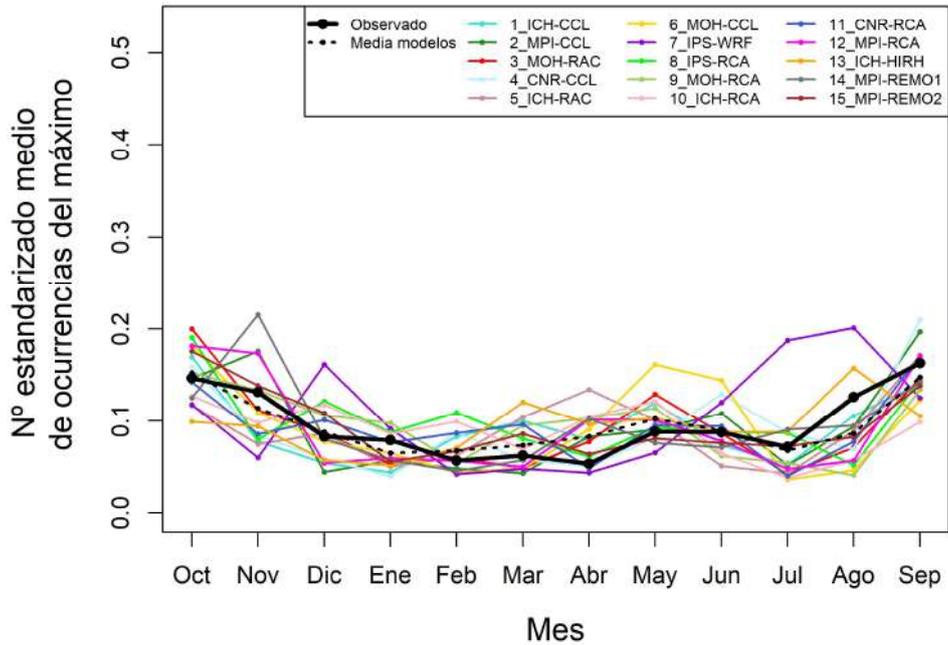


Figura A2.24. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0907".



Región 0909

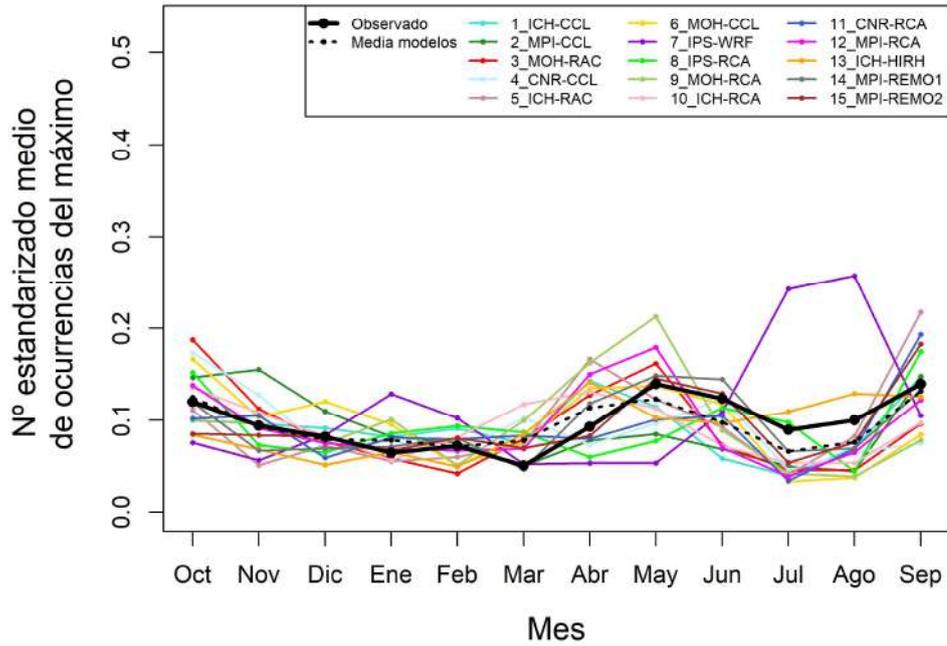


Figura A2.25. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "0909".

Región 1001

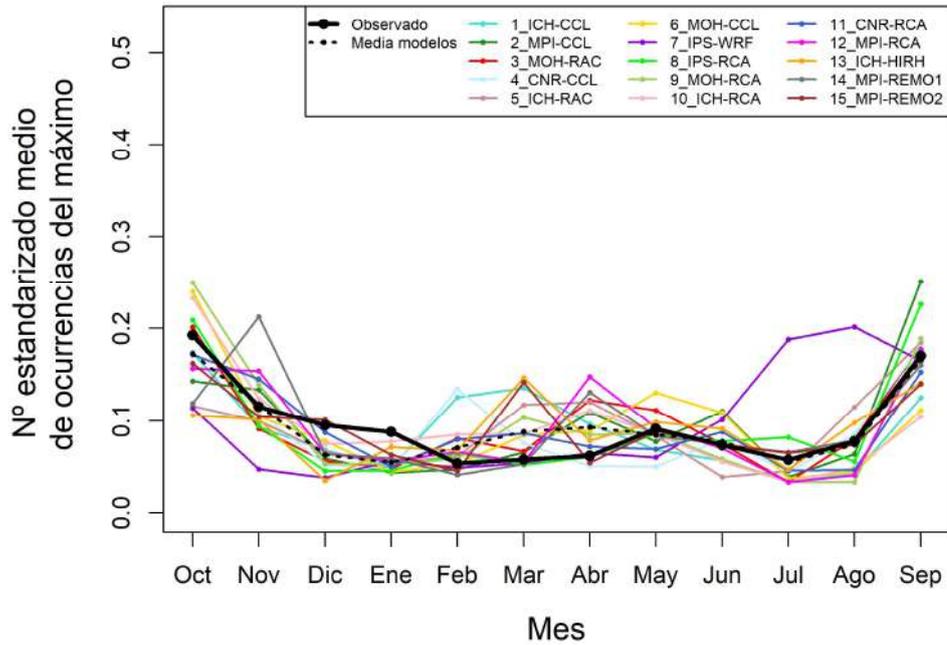


Figura A2.26. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "1001".

Región 1100

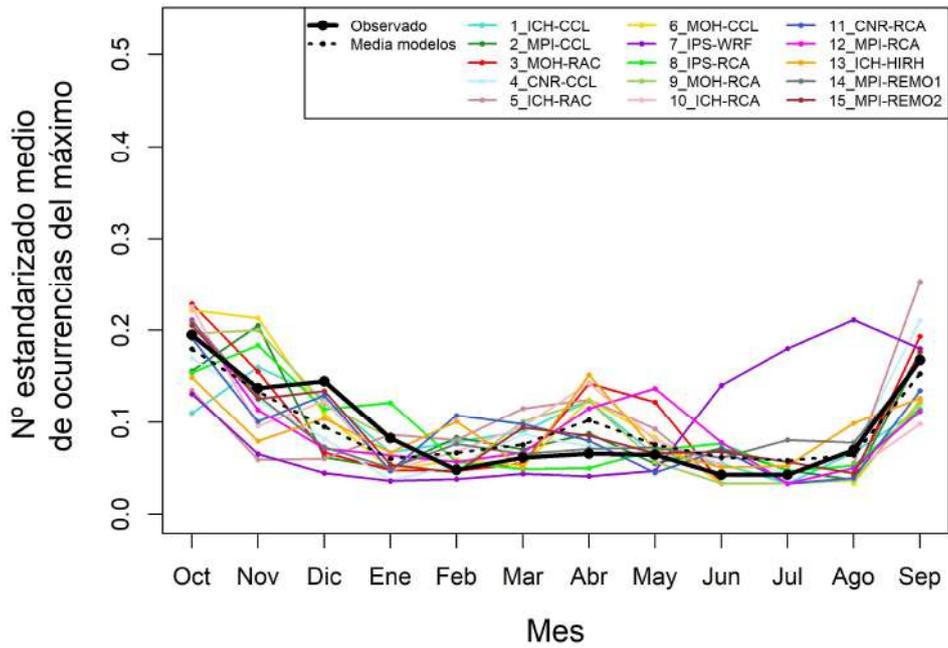


Figura A2.27. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "1100".

Región 1300

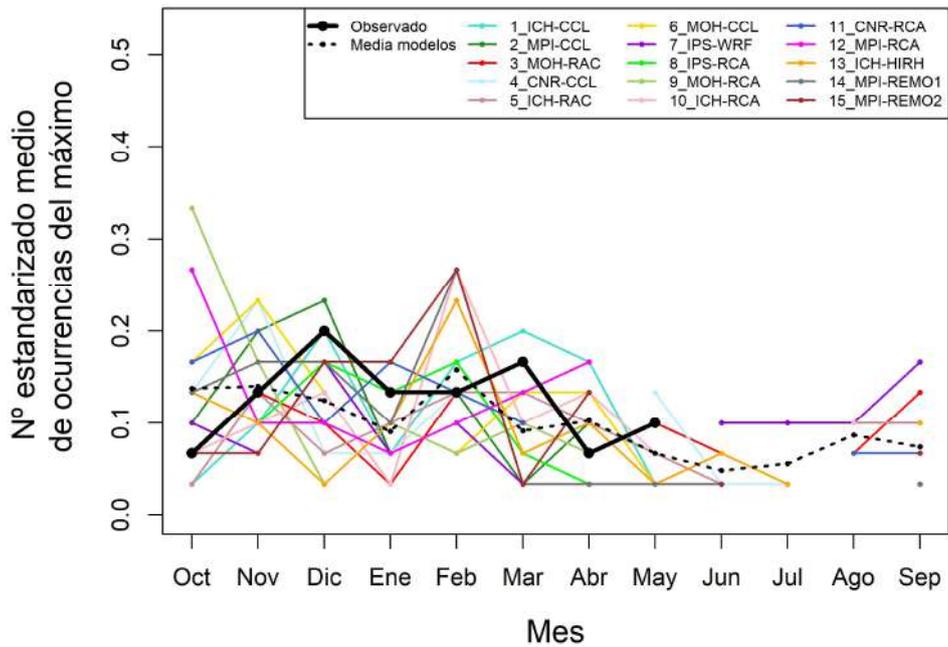


Figura A2.28. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual proporcionada por las simulaciones en el periodo de control respecto a la obtenida a partir de las observaciones en la región "1300".



CEDEX

Anexo nº 3

Mapas de tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos para cada modelo climático de estudio en relación a la precipitación diaria máxima anual

Este **Anexo nº 3** incluye los mapas en los que se indican las celdas y regiones con tendencias y cambios en la mediana y en la varianza significativos para cada uno de los 15 modelos climáticos de estudio, y cada uno de los escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5), en relación a la precipitación diaria máxima anual. Los mapas de tendencias presentan resultados para el periodo 2011-2100 (**Figuras A3.1 y A3.2**), y los mapas de cambios en la mediana (**Figuras A3.3 a A3.8**) y de cambios en la varianza (**Figuras A3.9 a A3.14**) para los tres periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100).

Los símbolos utilizados para representar las celdas y regiones significativas identificadas por cada modelo, así como aquellas en las que existe coincidencia entre la mayoría de los modelos, son los indicados en la leyenda siguiente:

	celda : pos
	celda : neg
	región: pos
	región: neg
	región: inc
	celda : pos (mayoría)
	celda : neg (mayoría)
	región: pos (mayoría)
	región: neg (mayoría)
	región: inc (mayoría)



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

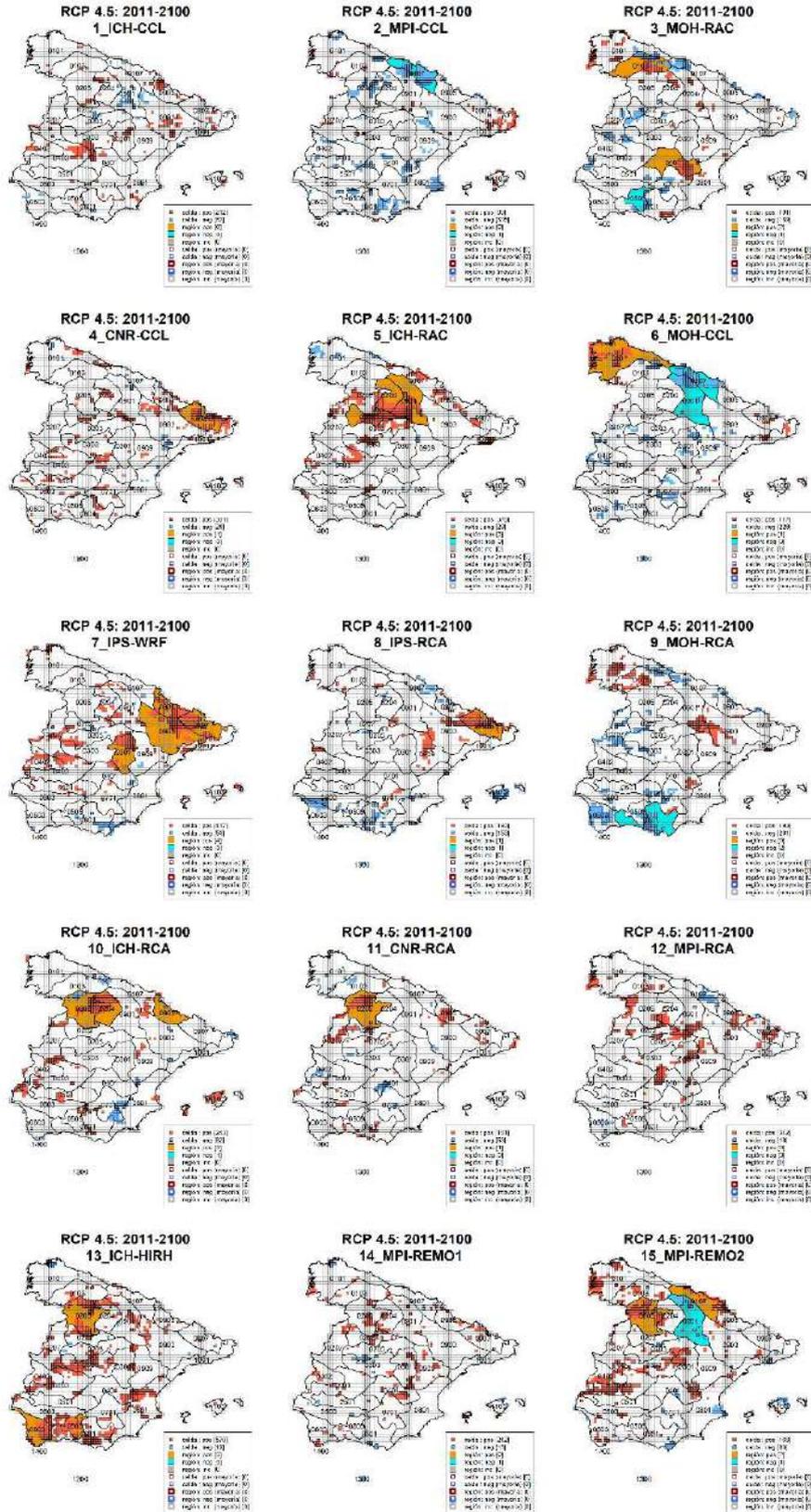


Figura A3.1. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas para cada modelo climático de estudio para el periodo 2011-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positiva; "neg" = negativa; "inc" = inconsistente).

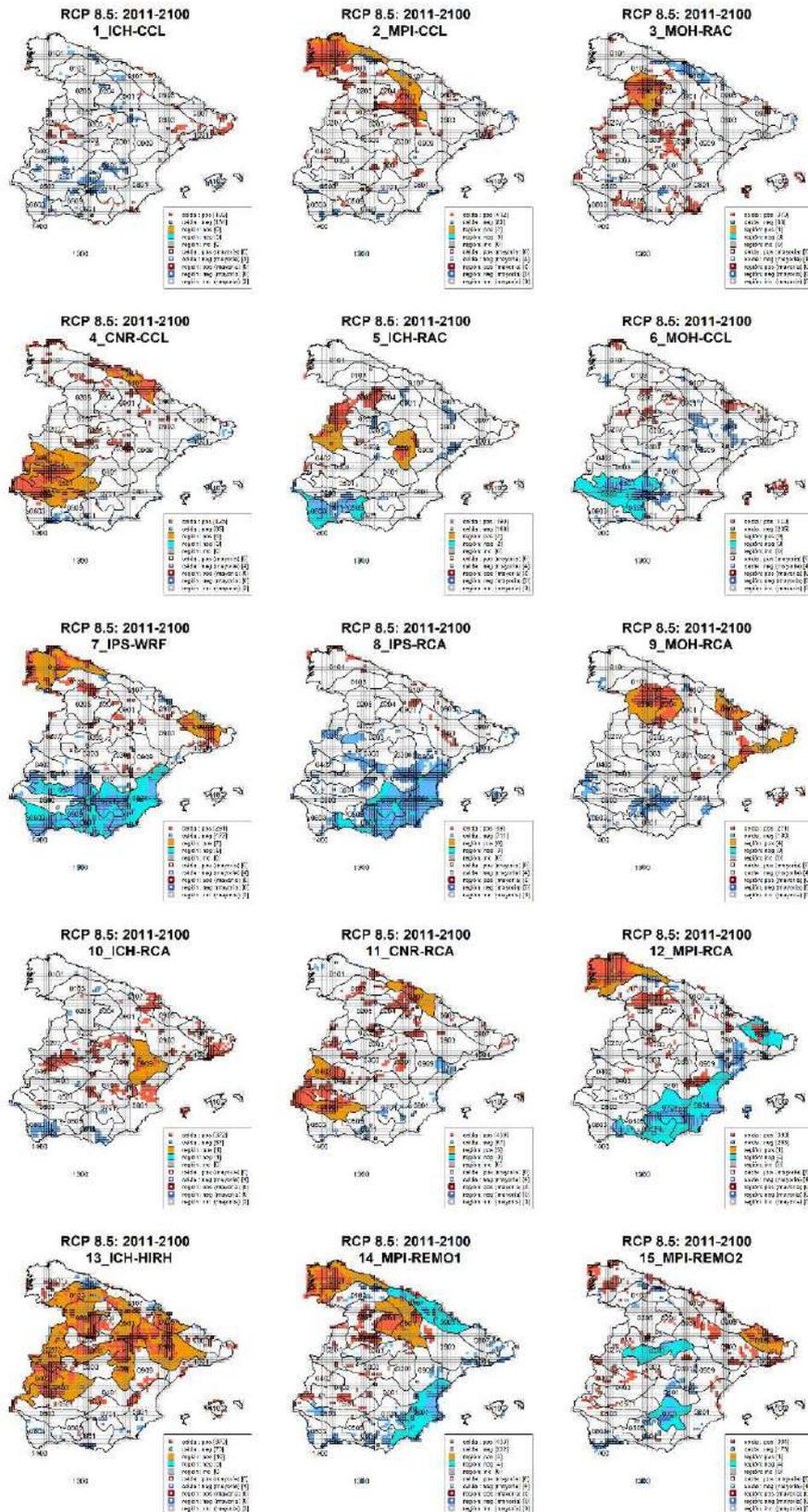


Figura A3.2. Celdas y regiones con tendencias significativas identificadas para cada modelo climático de estudio para el periodo 2011-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positiva; “neg” = negativa; “inc” = inconsistente).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

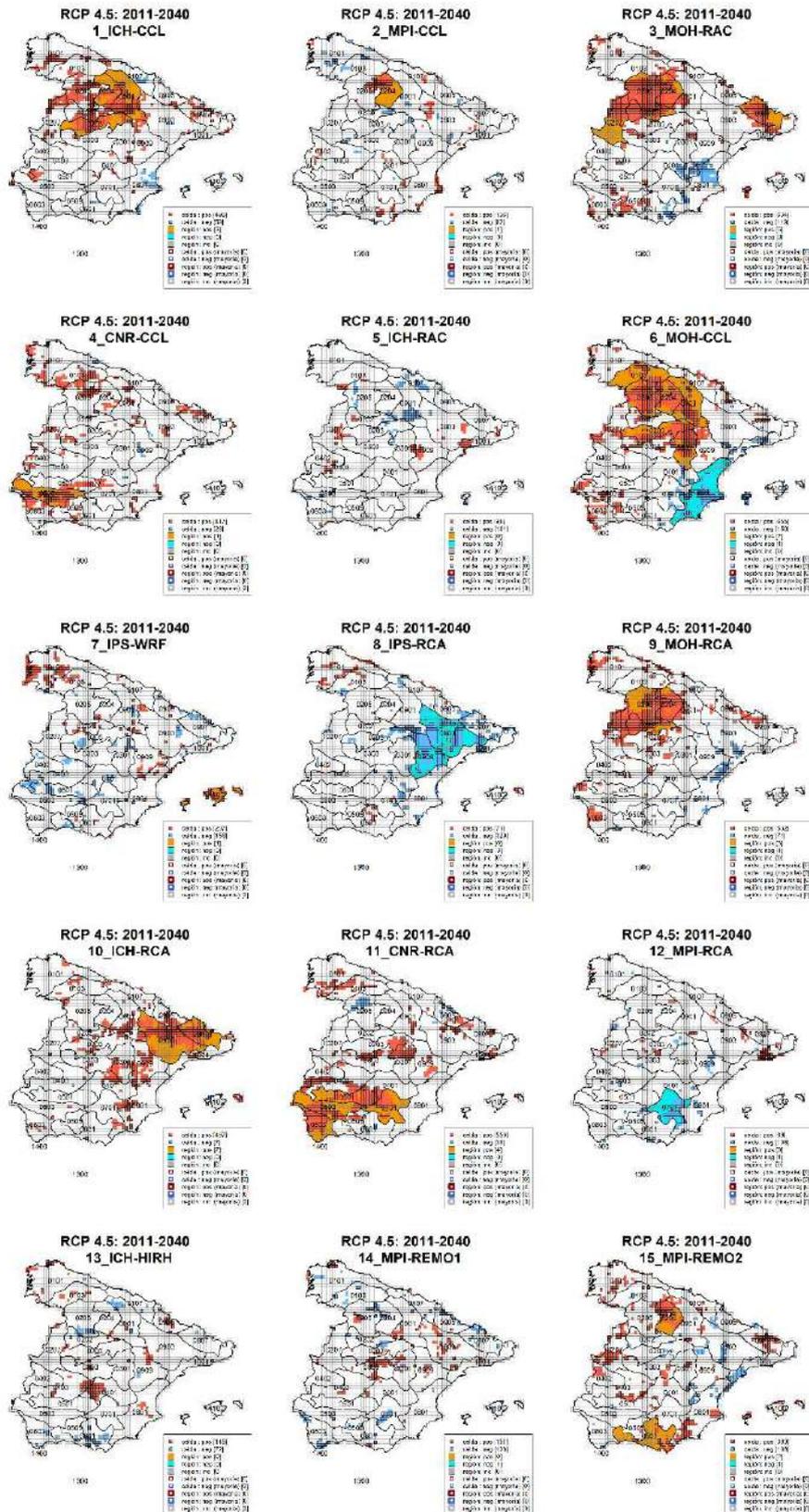


Figura A3.3. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

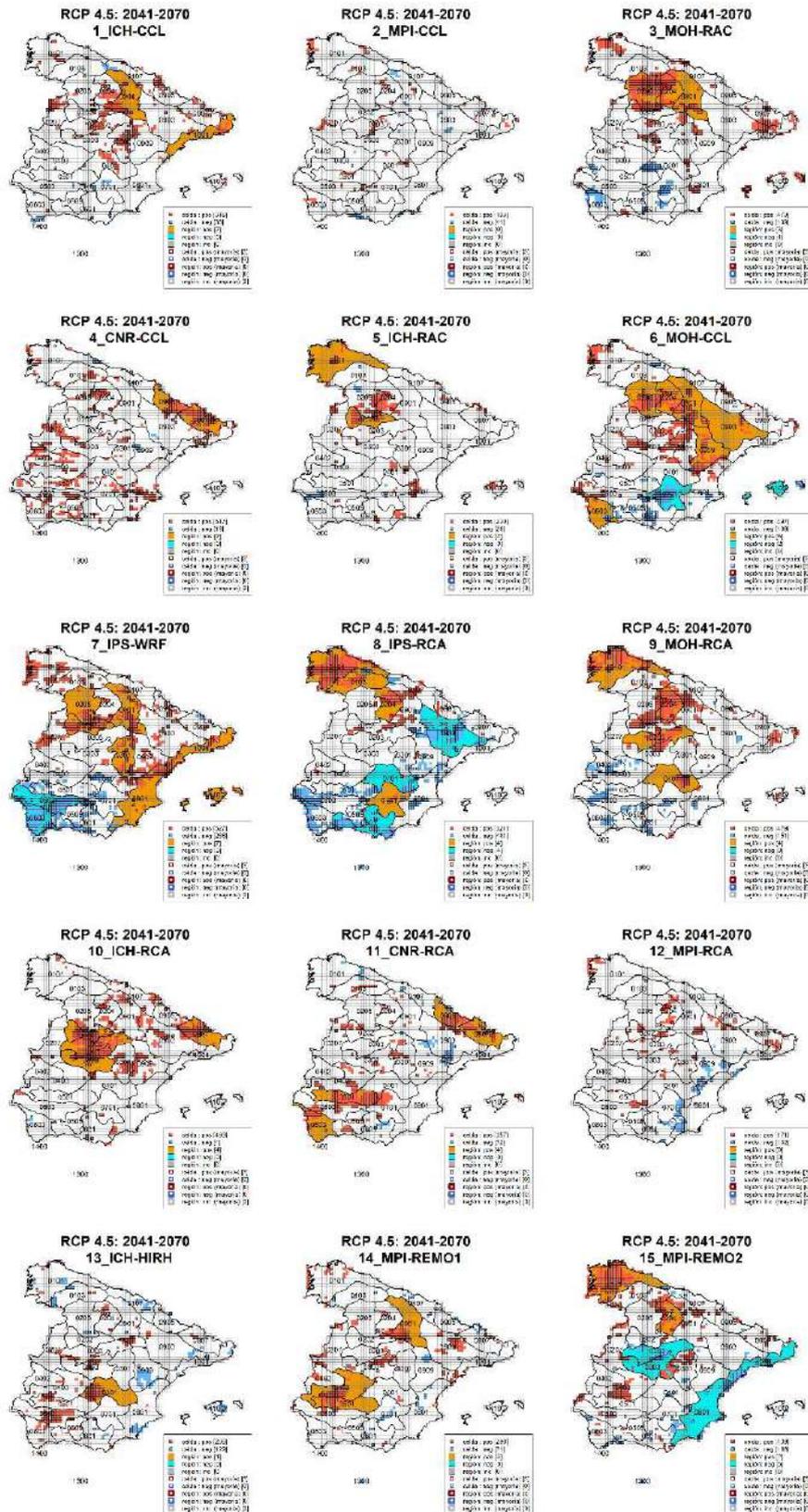


Figura A3.4. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

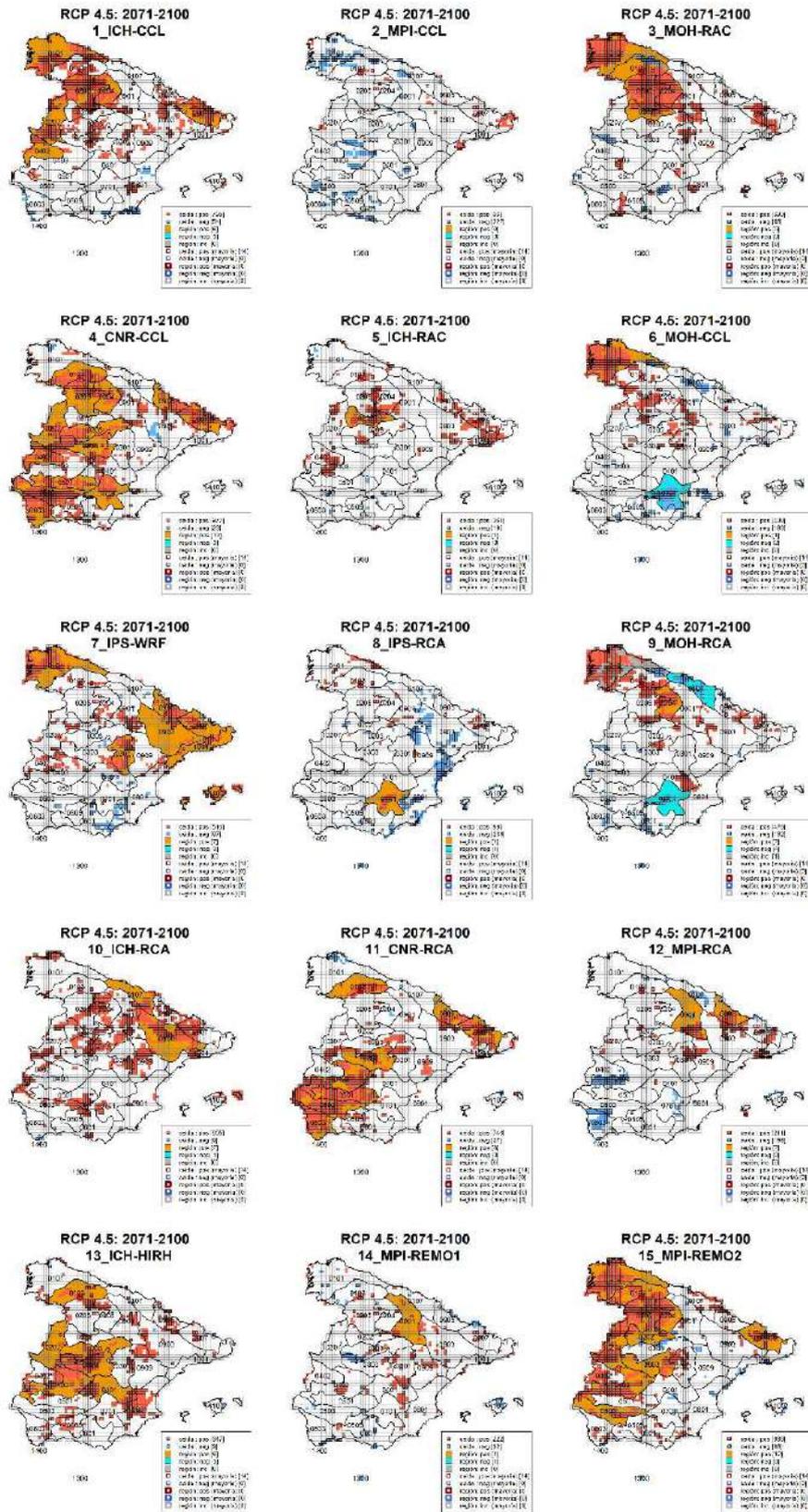


Figura A3.5. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

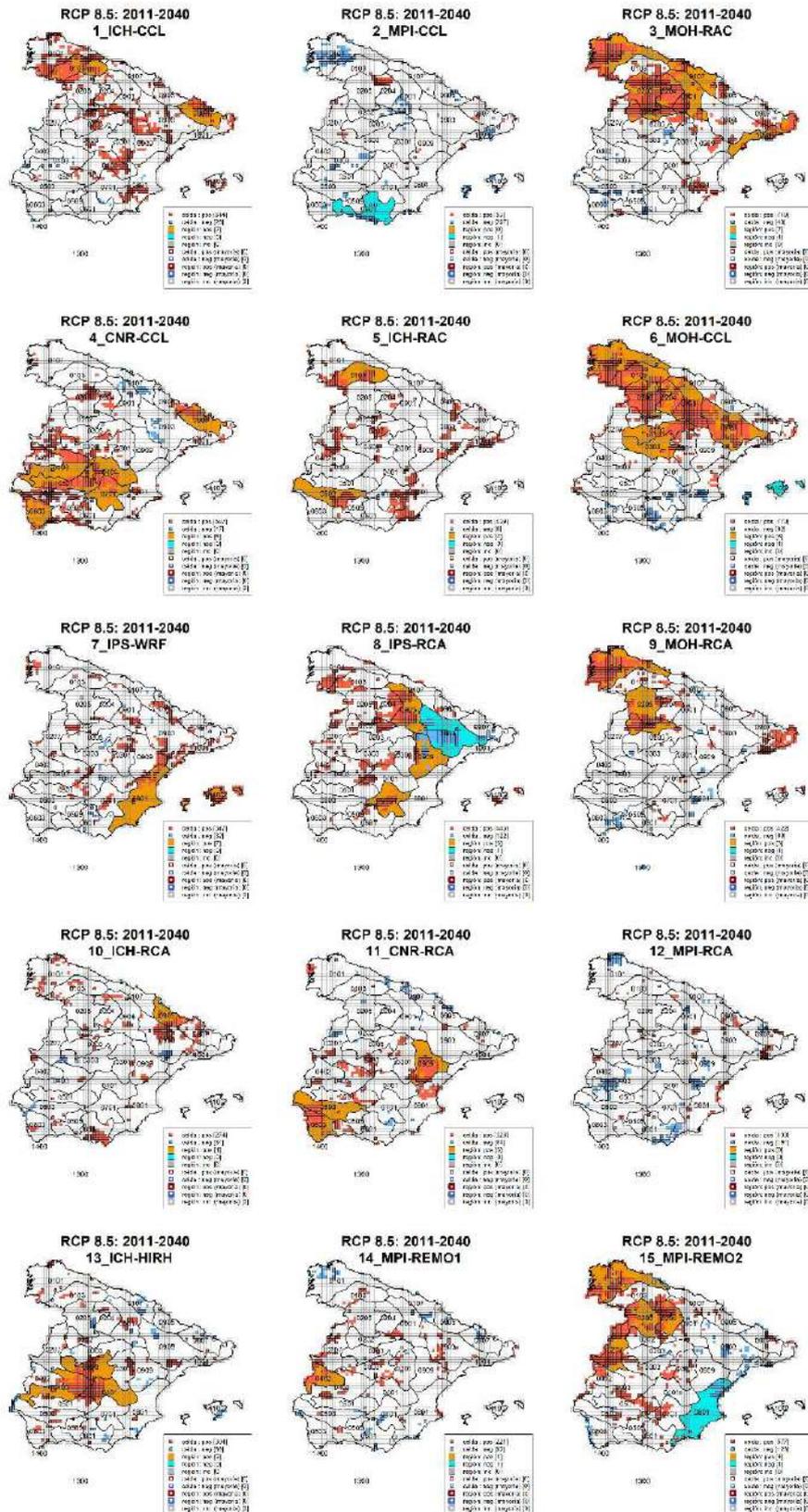


Figura A3.6. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

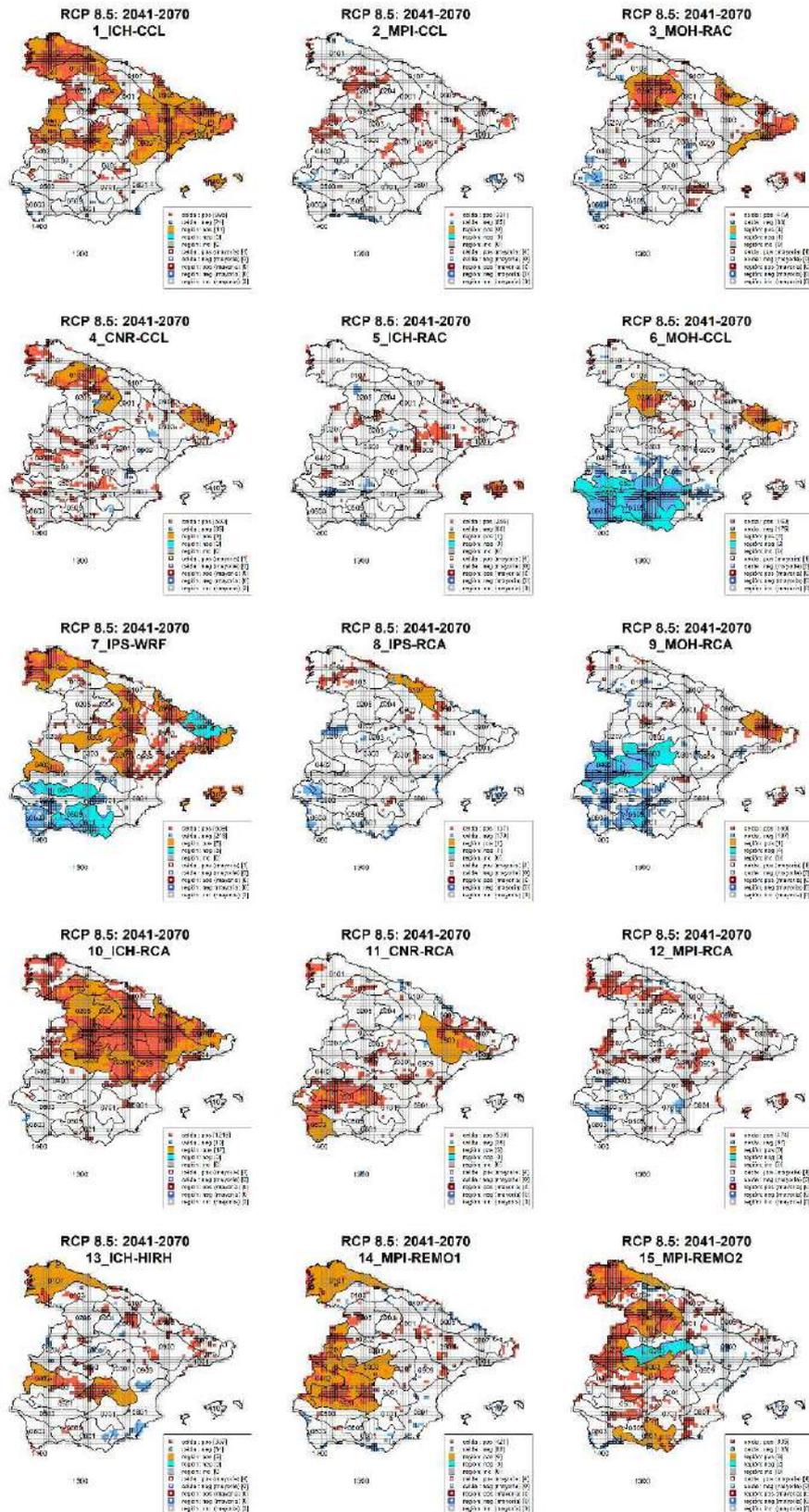


Figura A3.7. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

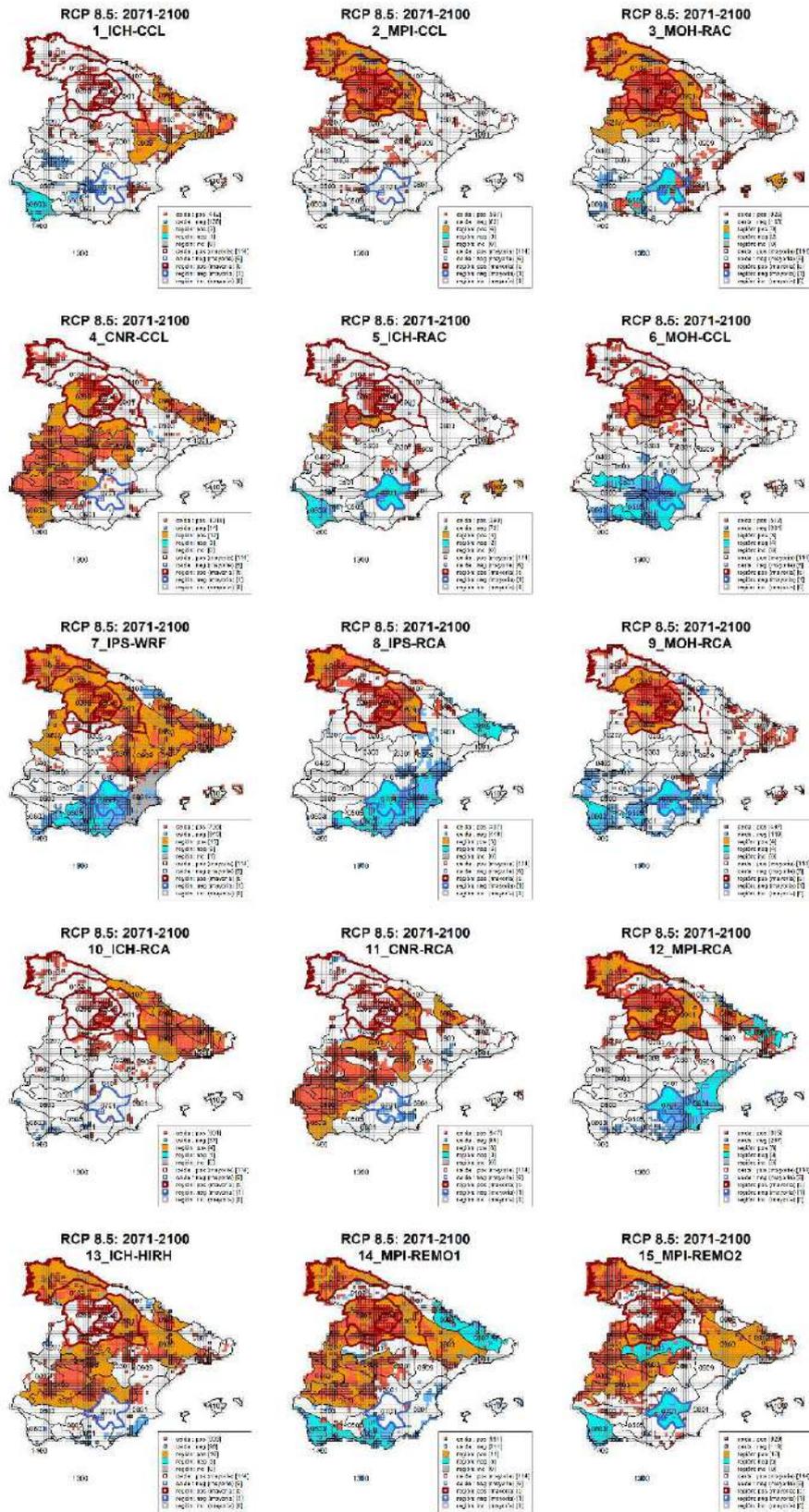


Figura A3.8. Celdas y regiones con cambios en la mediana significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

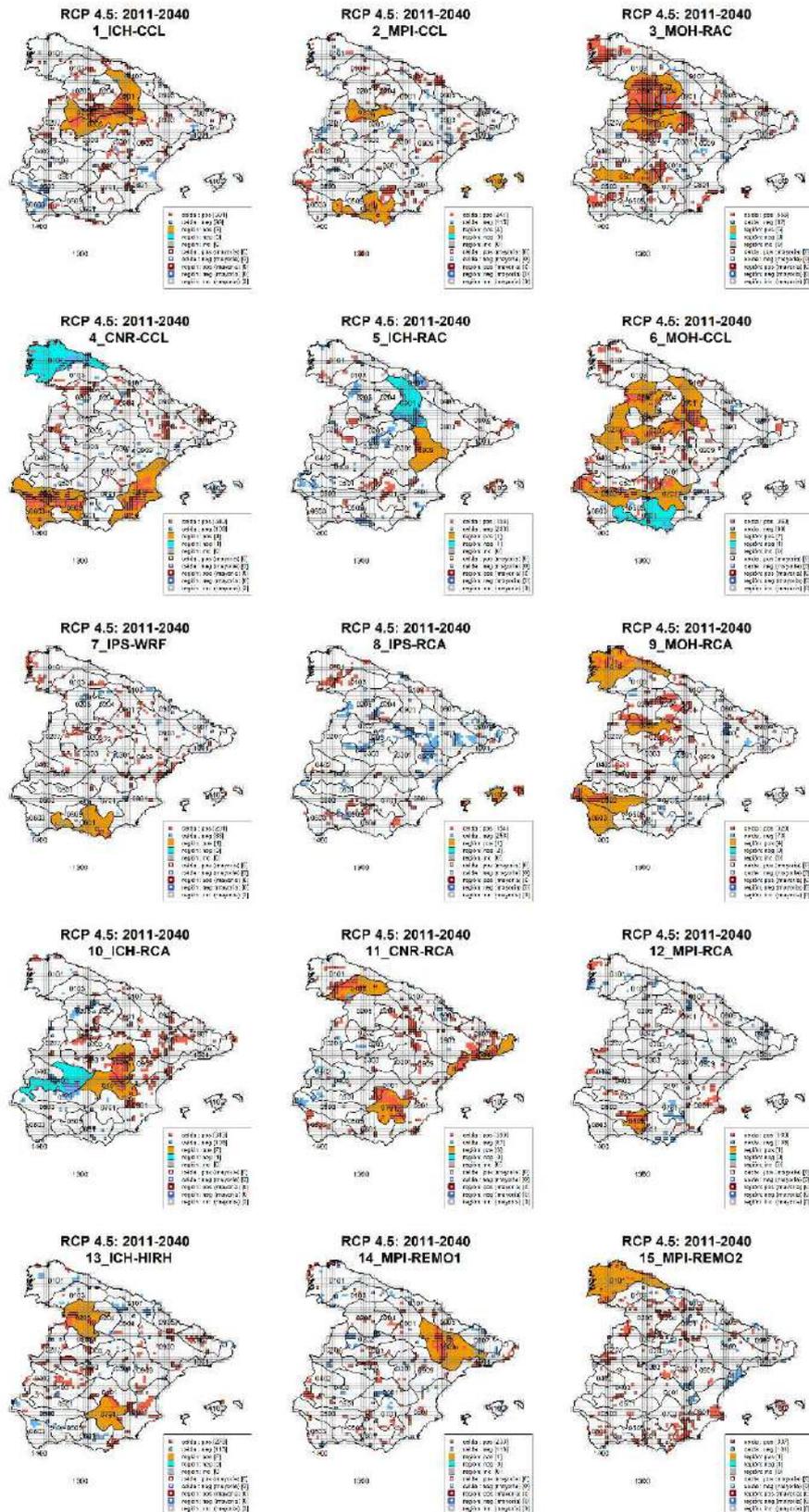


Figura A3.9. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

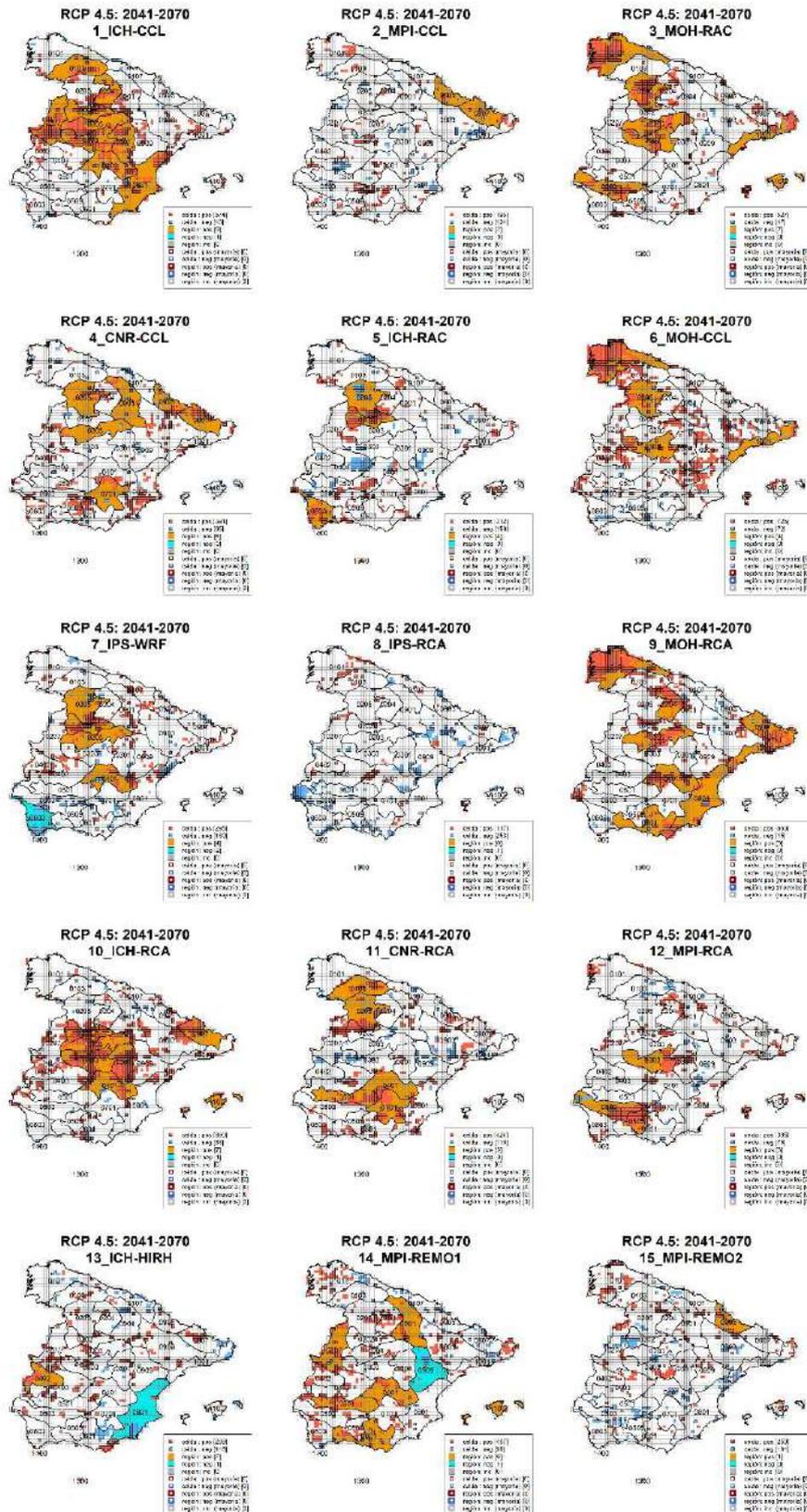


Figura A3.10. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

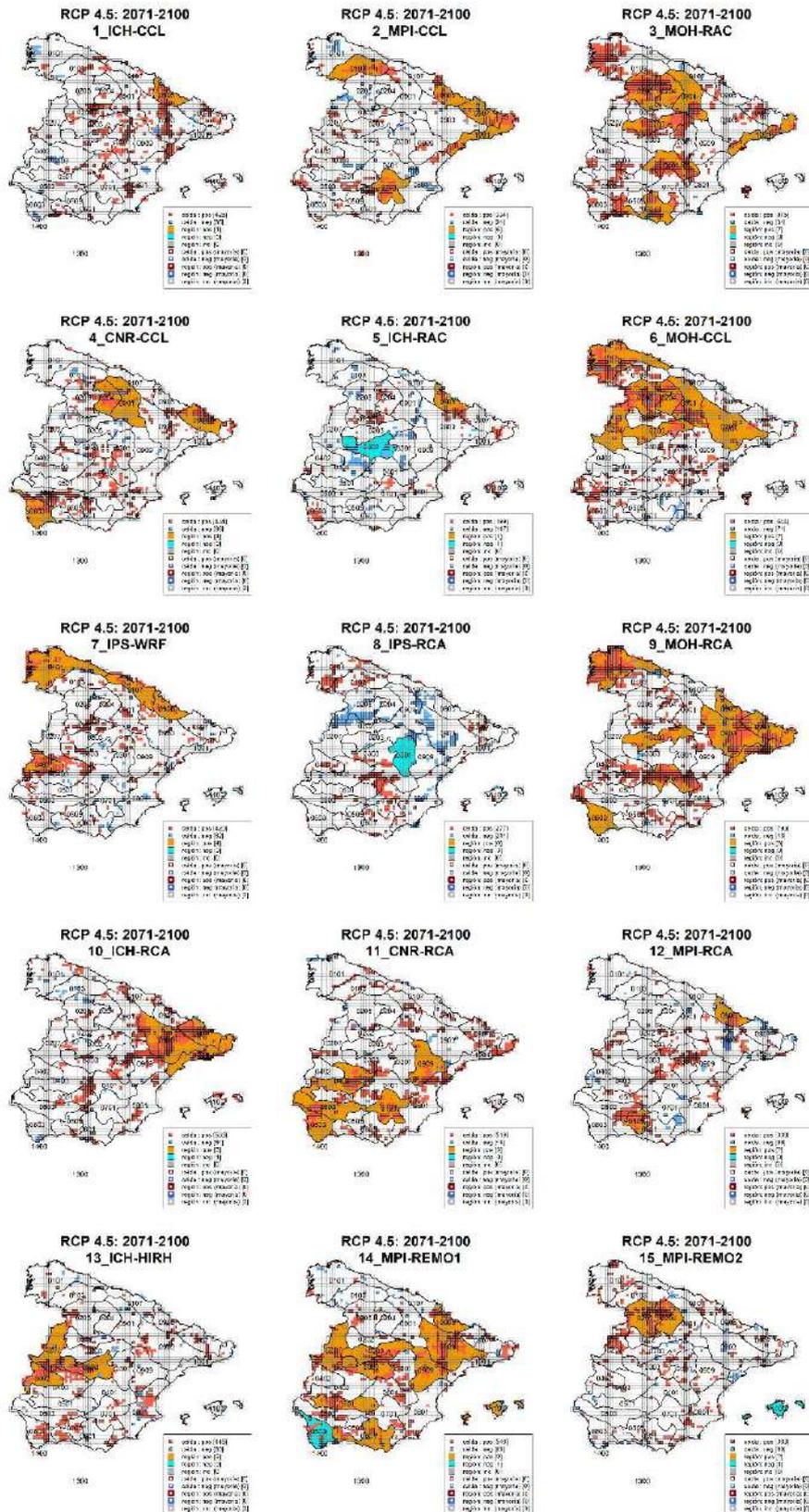


Figura A3.11. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

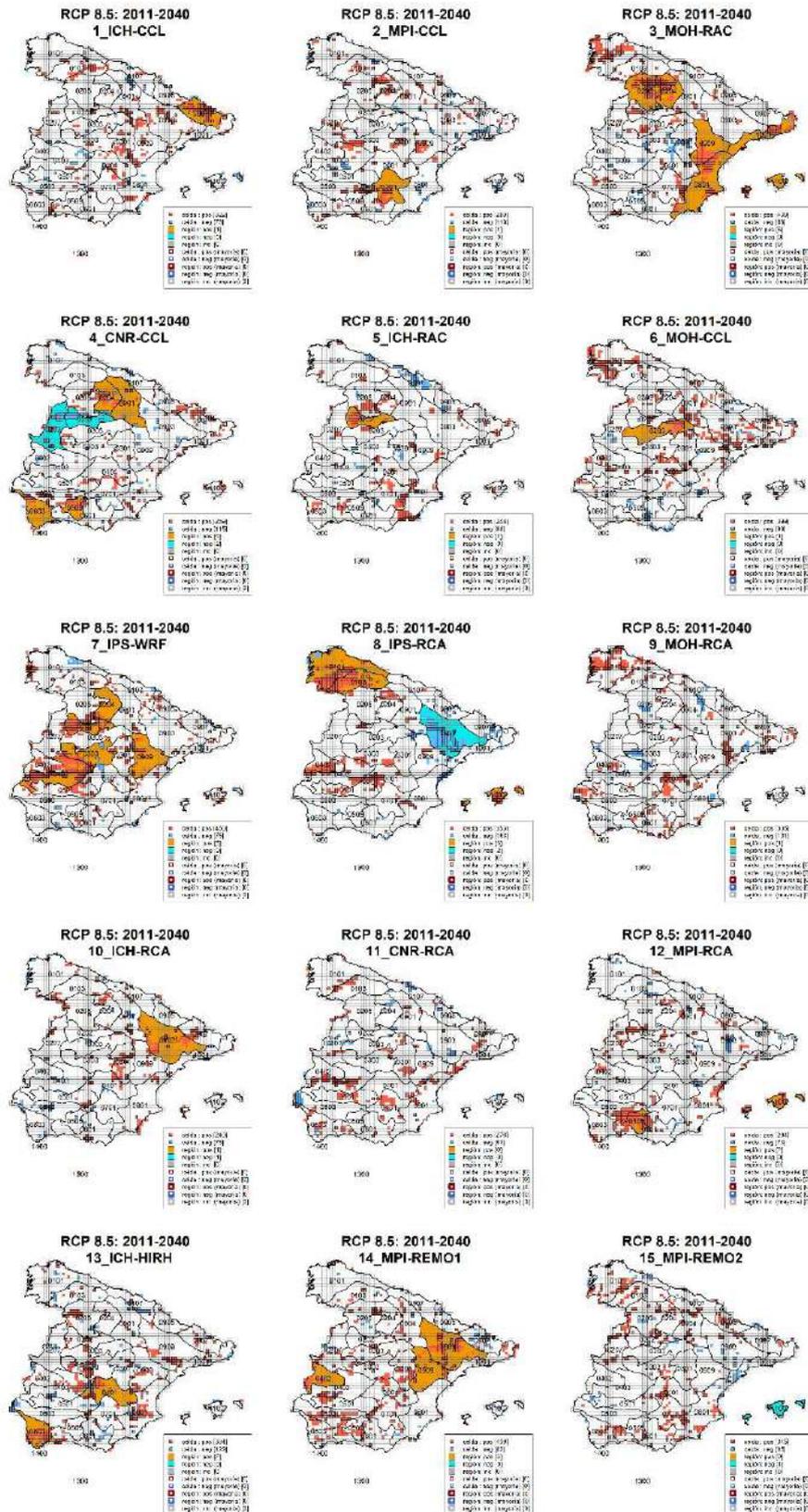


Figura A3.12. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

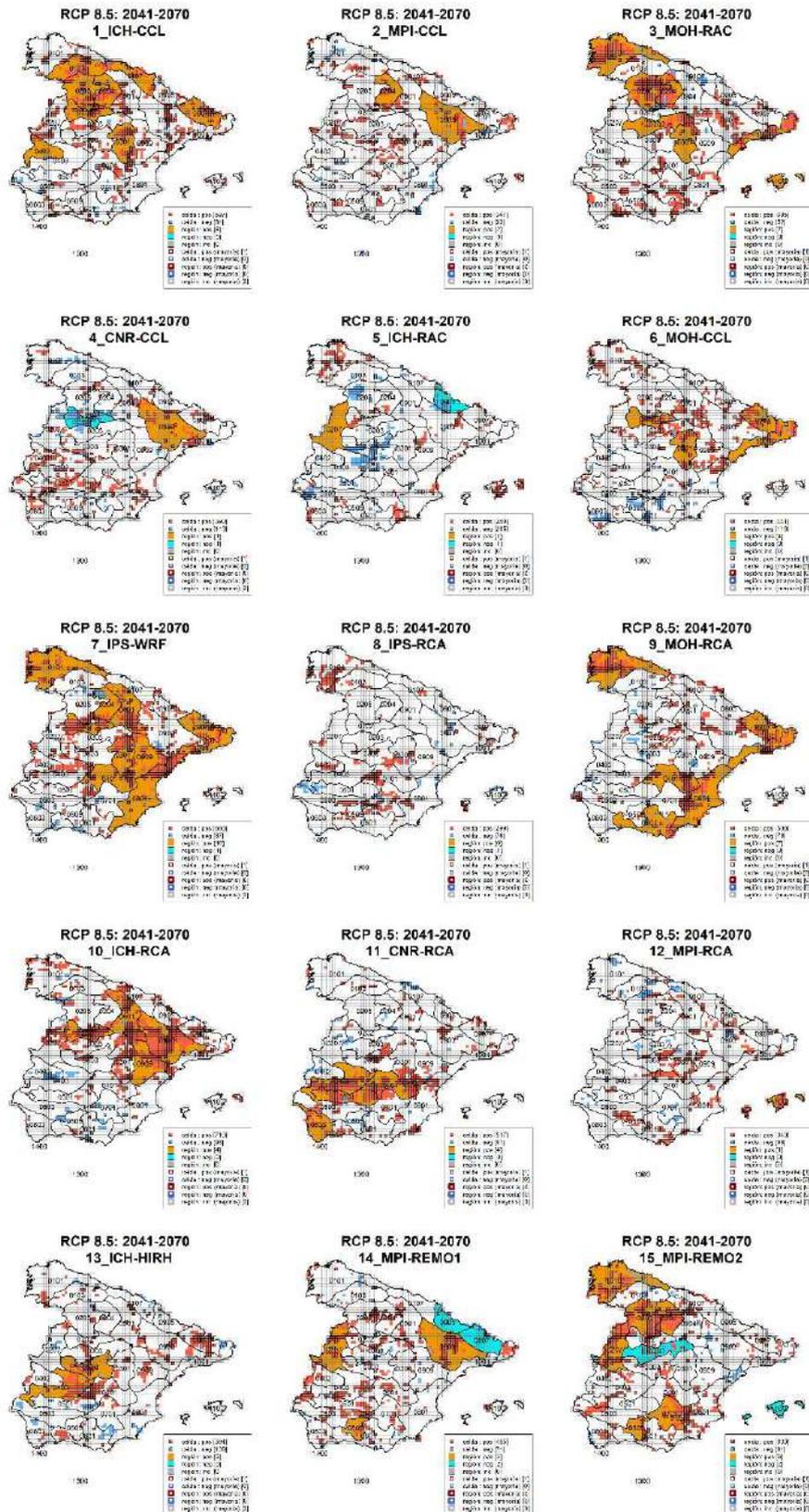


Figura A3.13. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

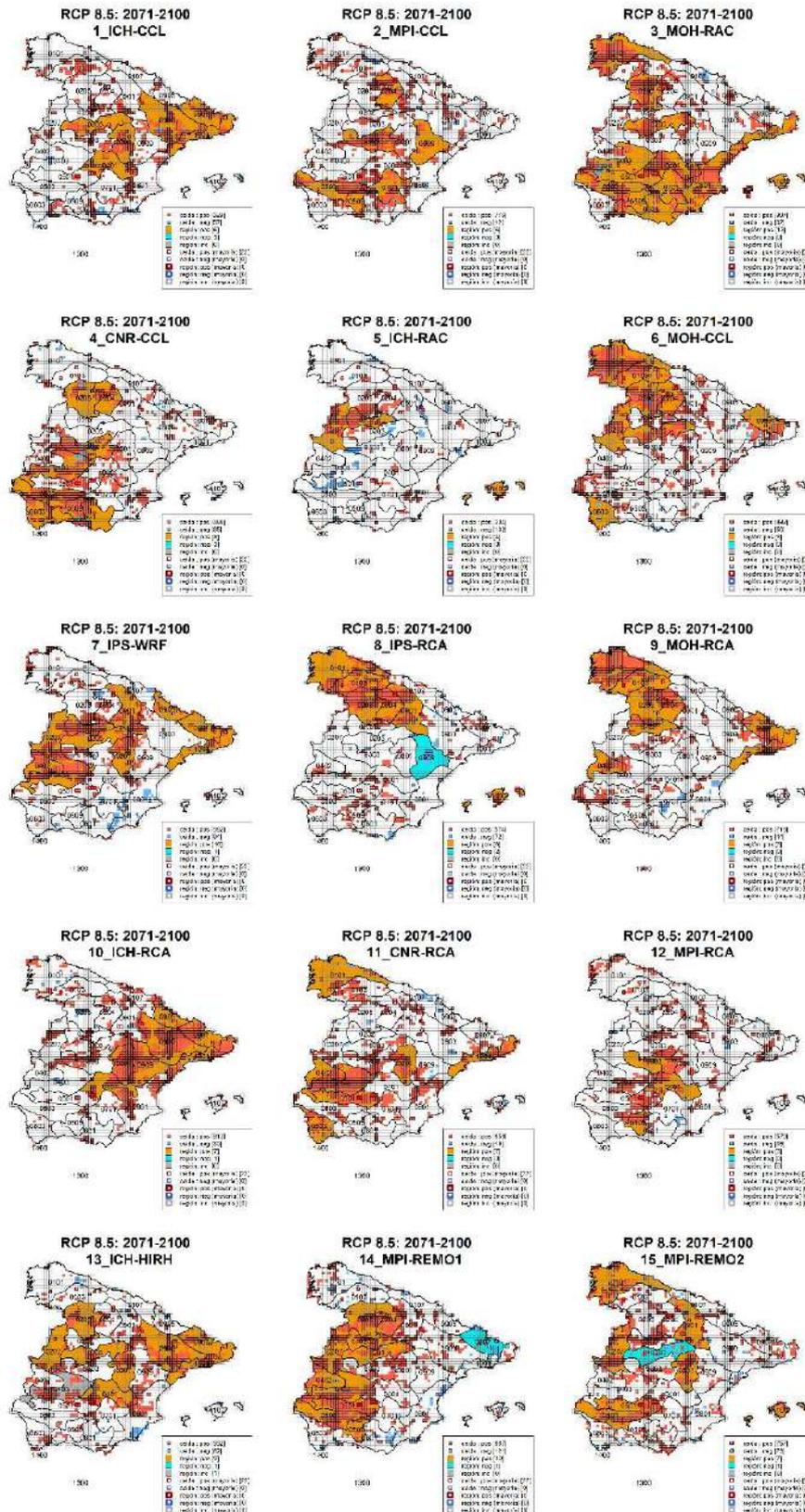


Figura A3.14. Celdas y regiones con cambios en la varianza significativos identificados para cada modelo climático de estudio para el periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).



CEDEX

Anexo nº 4

Contraste de la estacionalidad media de la precipitación diaria máxima anual en los periodos de impacto respecto al periodo de control en las regiones climáticas



Este **Anexo nº 4** incluye las figuras asociadas al contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenarios respecto al periodo de control en cada una de las regiones climáticas, con excepción de la región “1400” (Ceuta), ya que dicha región no dispone de ninguna estación con la que realizar el contraste. En consecuencia, las figuras se presentan para 28 regiones climáticas, distinguiendo entre los dos escenarios considerados (**Figuras A4.1 a A4.56**). En las figuras se incluye adicionalmente la estacionalidad obtenida a partir de las observaciones para facilitar la interpretación de los resultados.



Región 0101

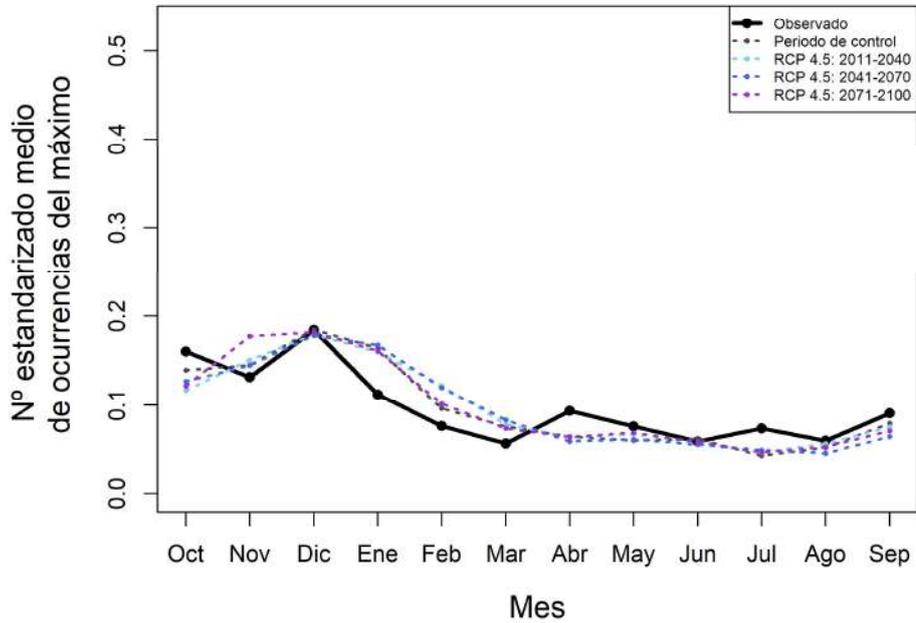


Figura A4.1. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0101".

Región 0101

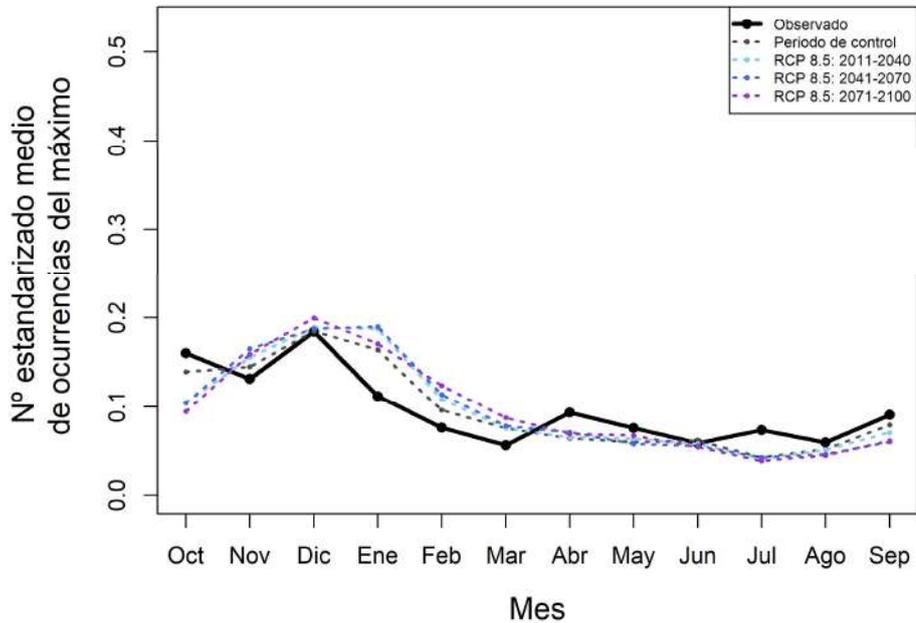


Figura A4.2. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0101".

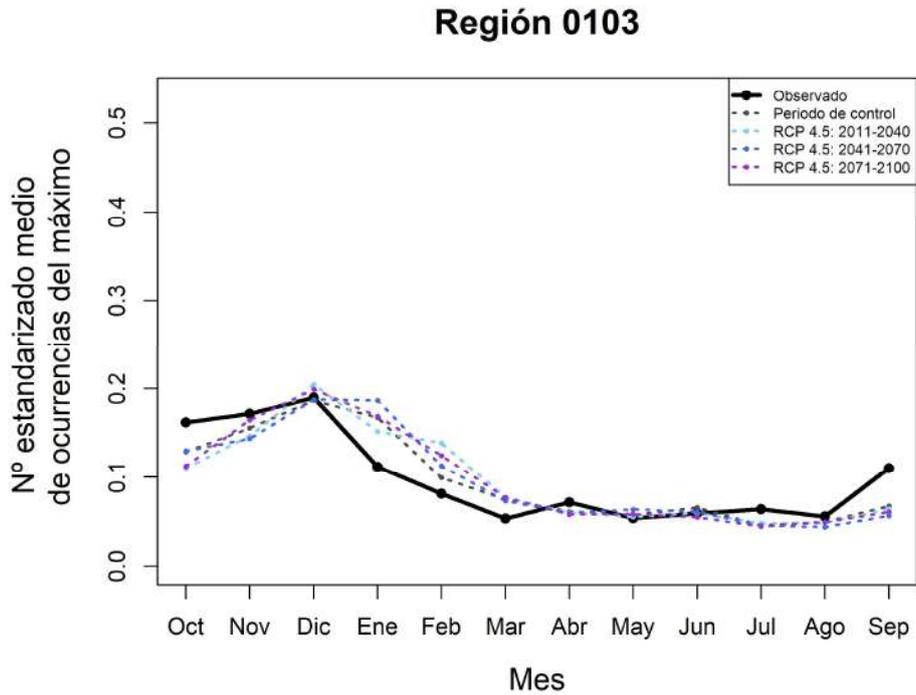


Figura A4.3. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0103".

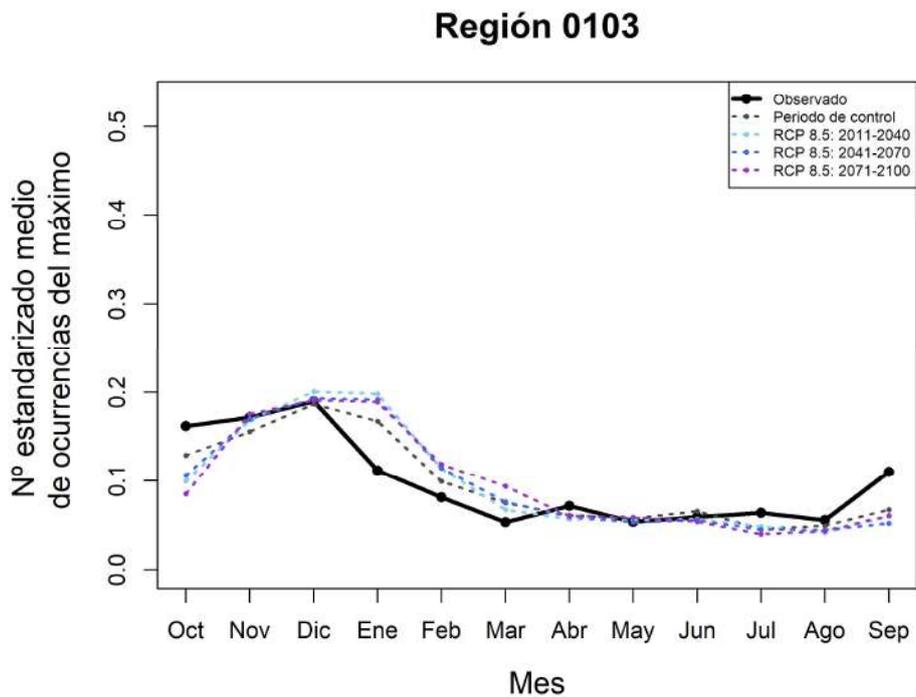


Figura A4.4. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0103".



Región 0107

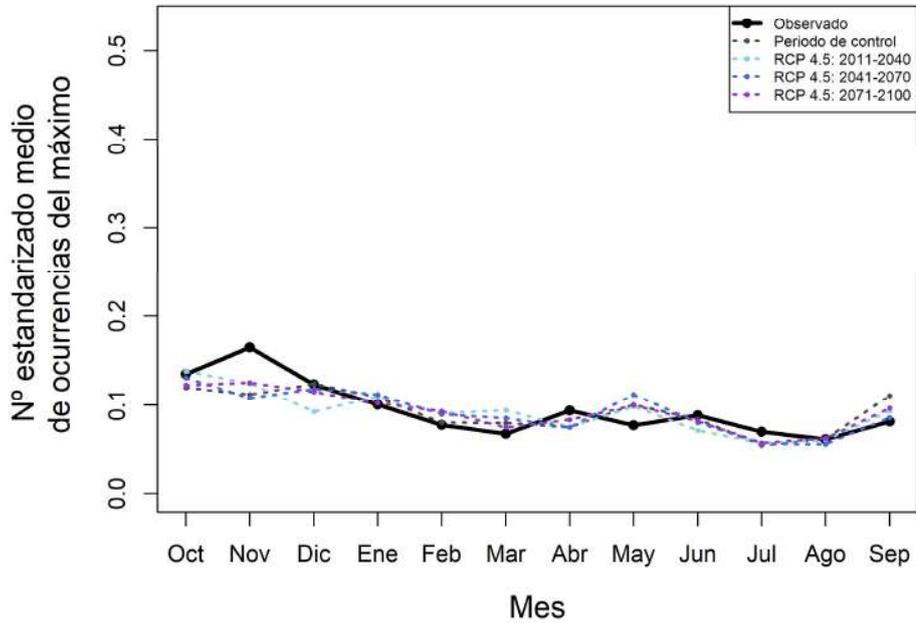


Figura A4.5. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0107".

Región 0107

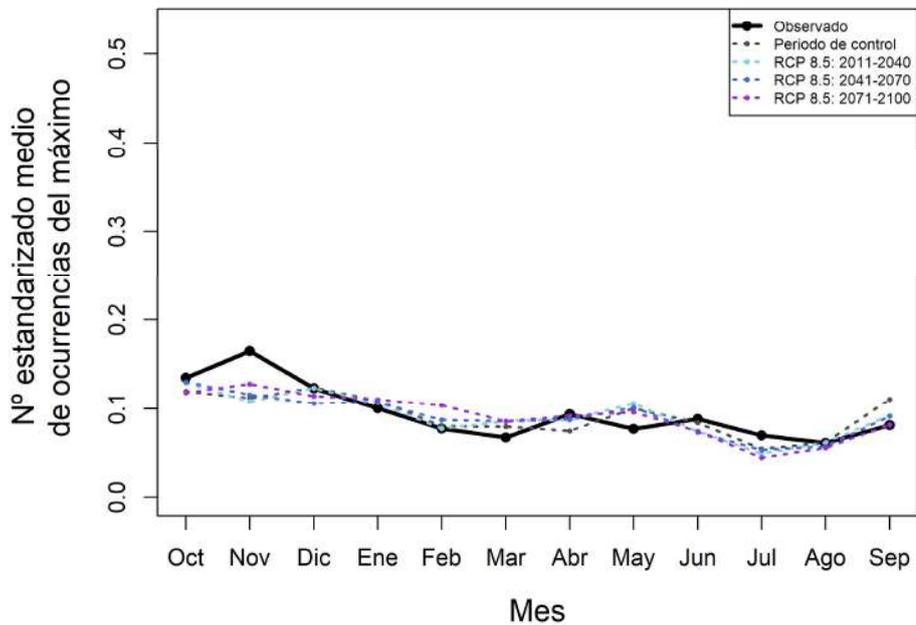


Figura A4.6. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0107".

Región 0202

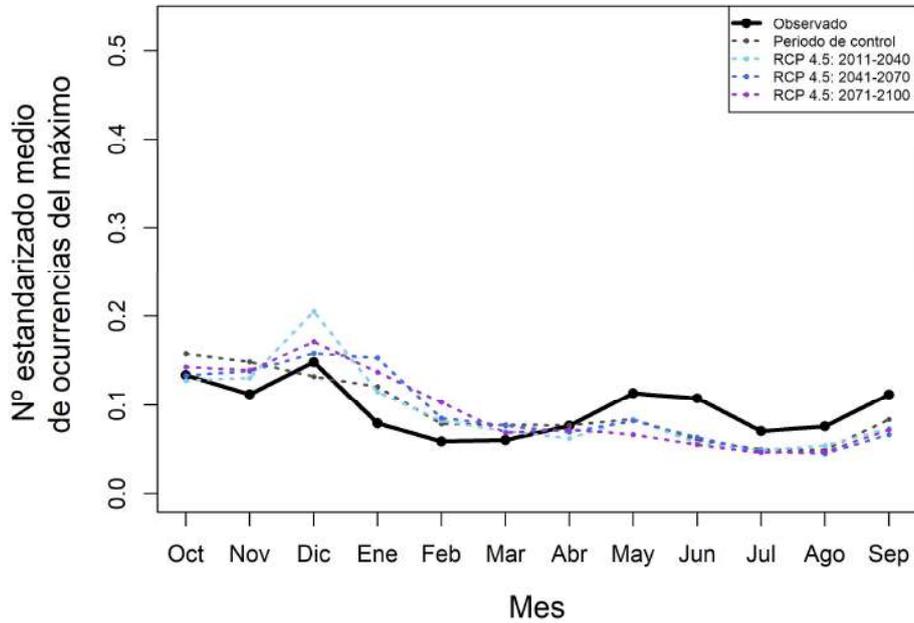


Figura A4.7. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0202".

Región 0202

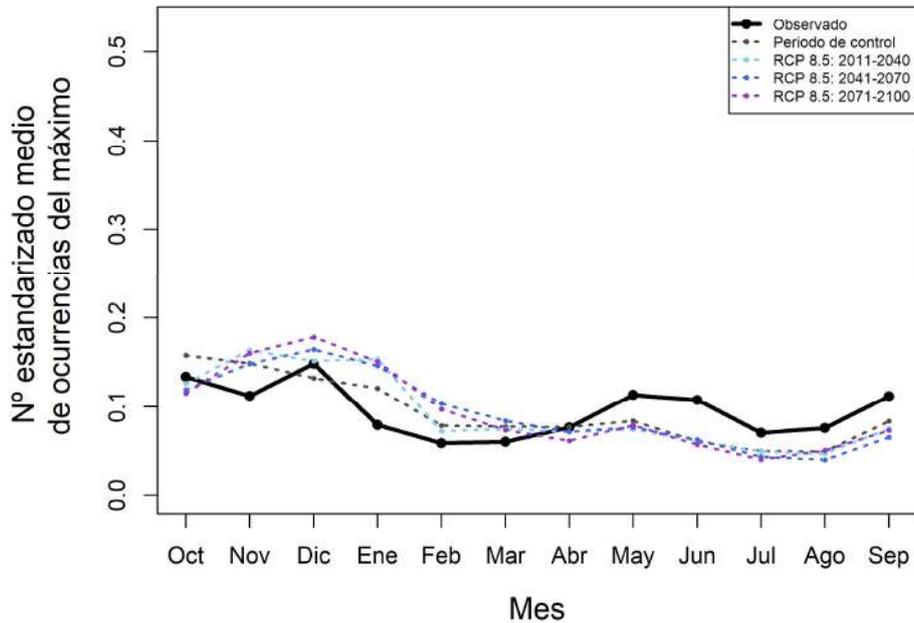


Figura A4.8. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0202".

Región 0203

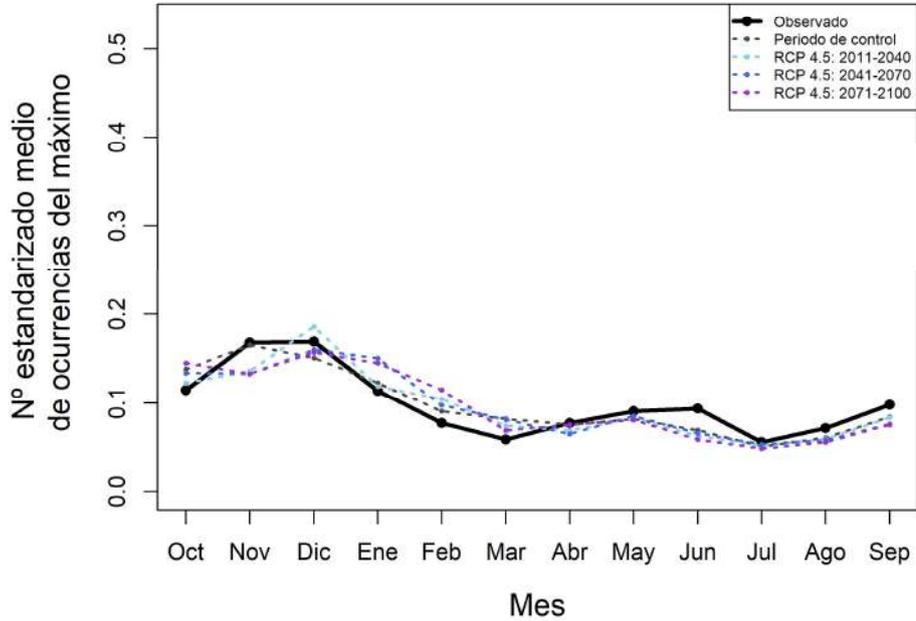


Figura A4.9. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0203".

Región 0203

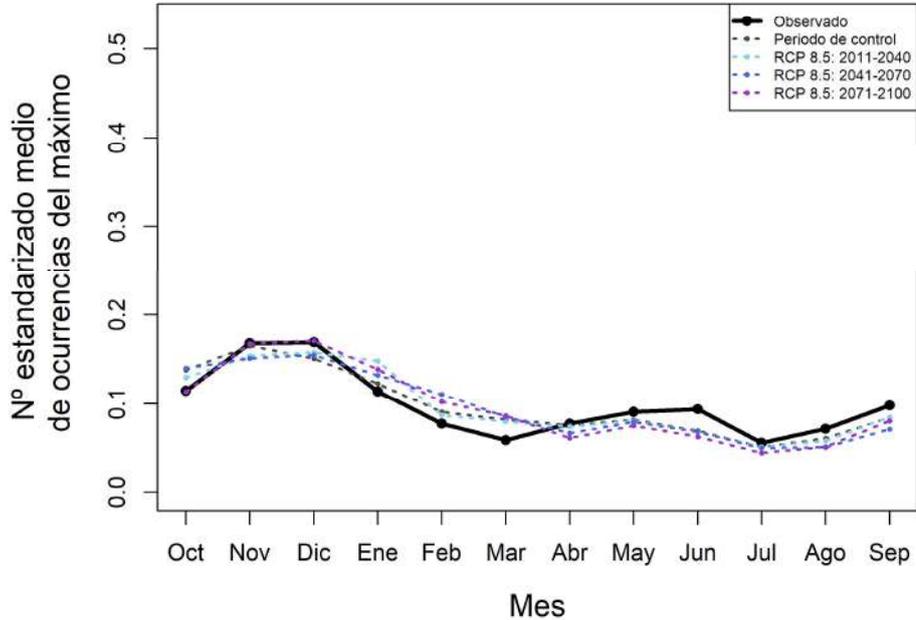


Figura A4.10. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0203".

Región 0204

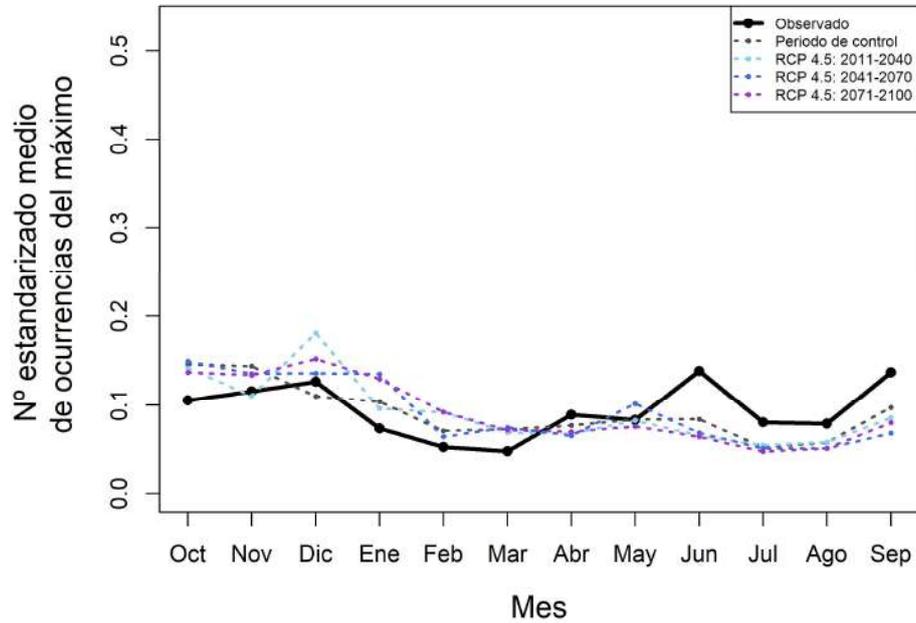


Figura A4.11. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0204".

Región 0204

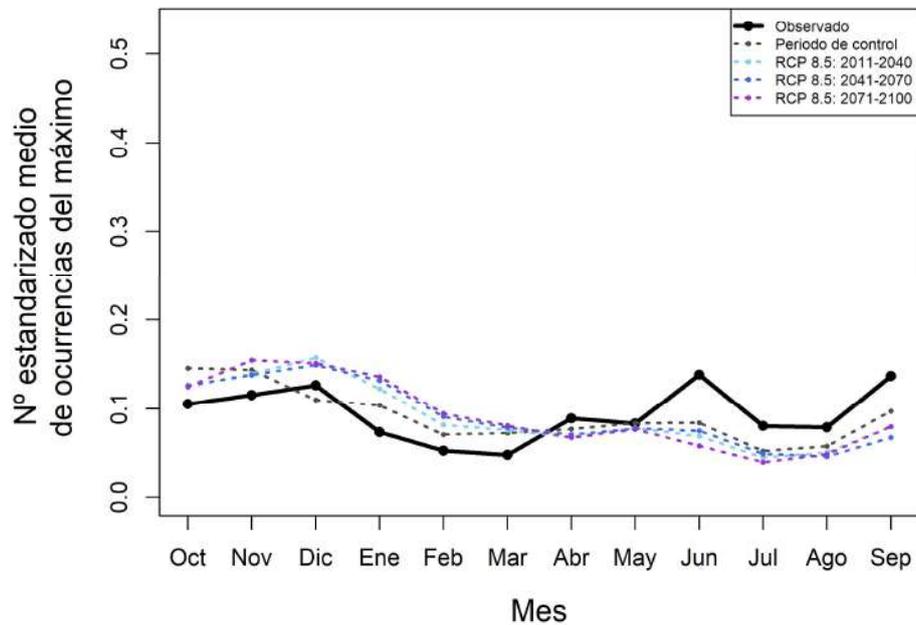


Figura A4.12. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0204".



Región 0205

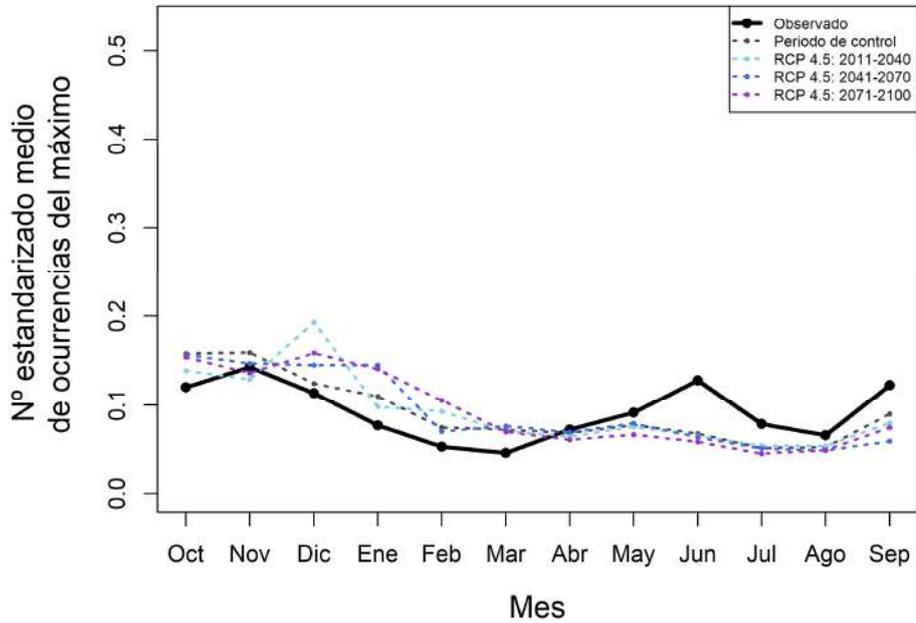


Figura A4.13. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0205".

Región 0205

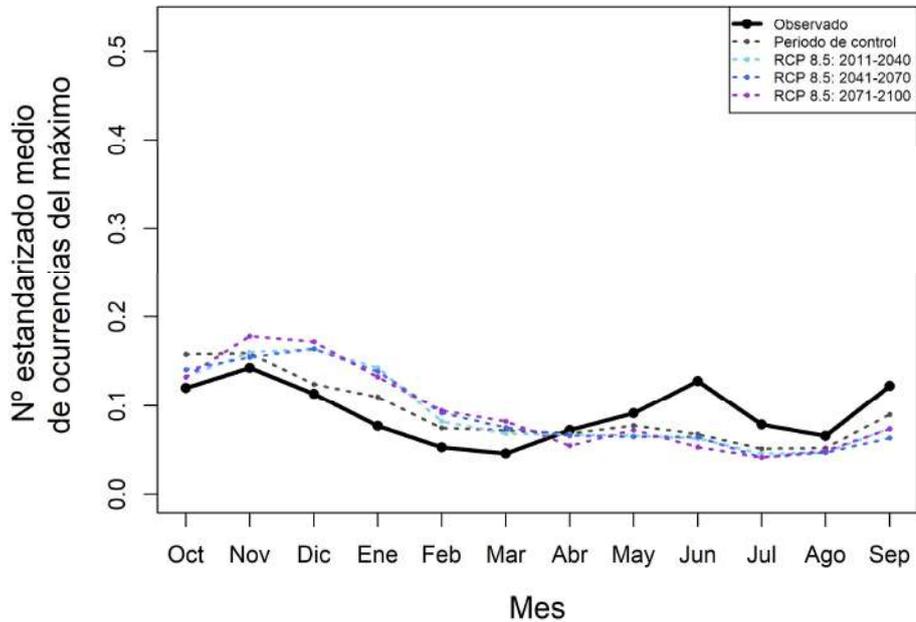


Figura A4.14. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0205".

Región 0207

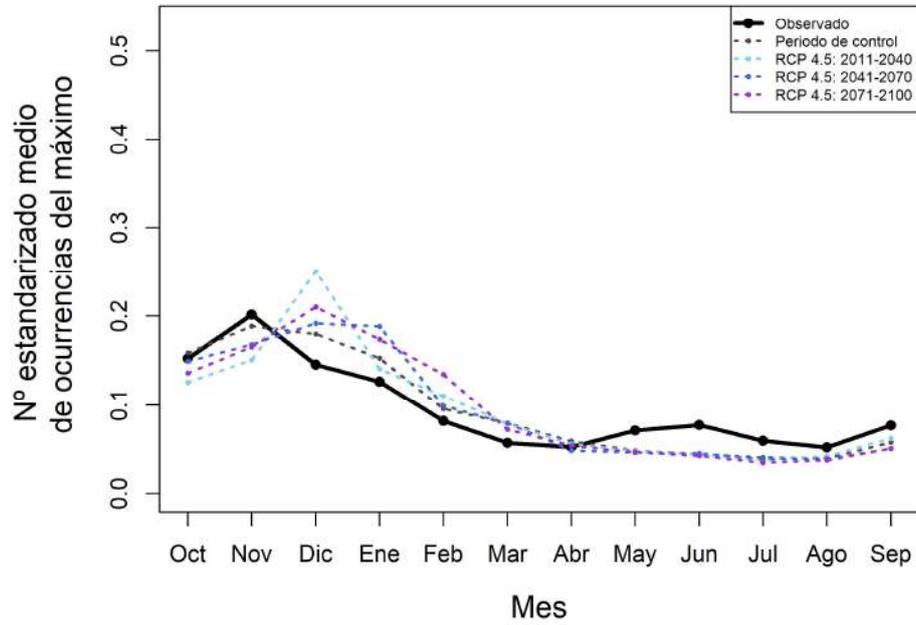


Figura A4.15. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0207".

Región 0207

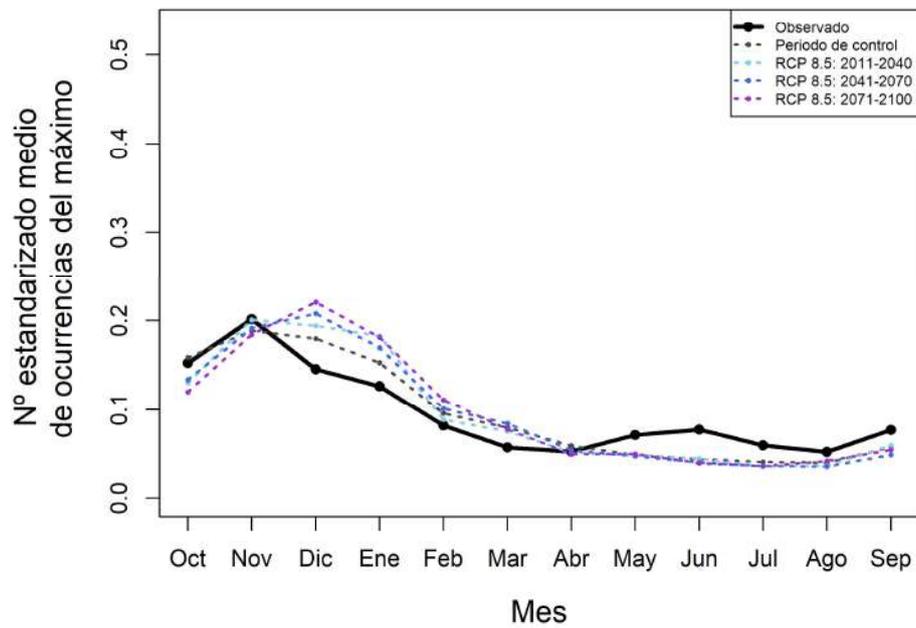


Figura A4.16. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0207".

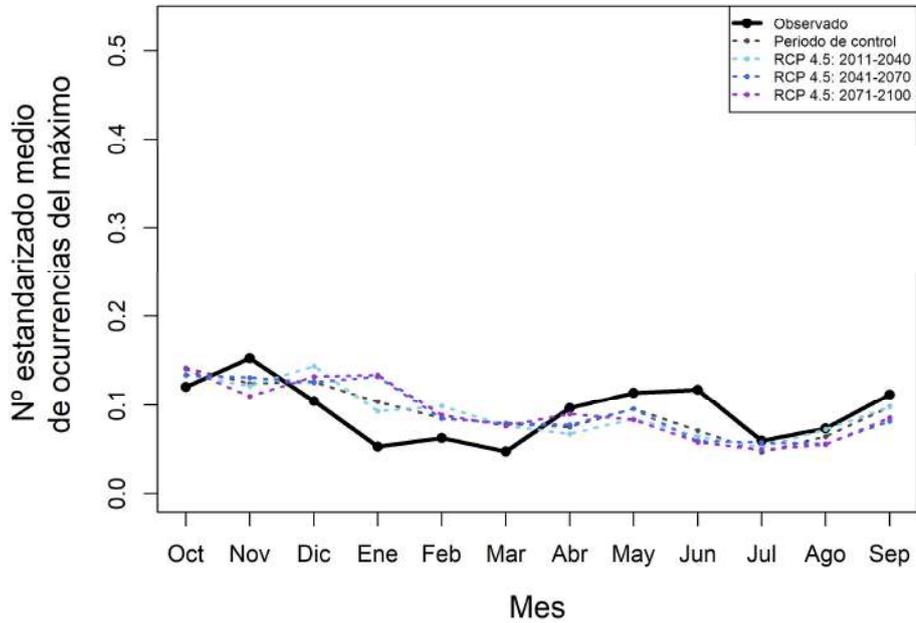
Región 0301

Figura A4.17. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0301".

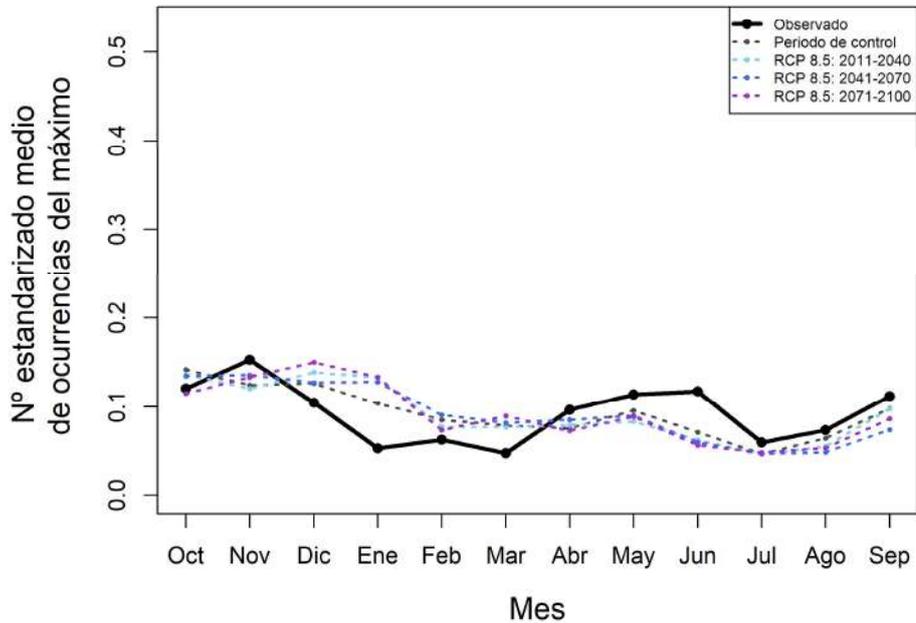
Región 0301

Figura A4.18. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0301".

Región 0303

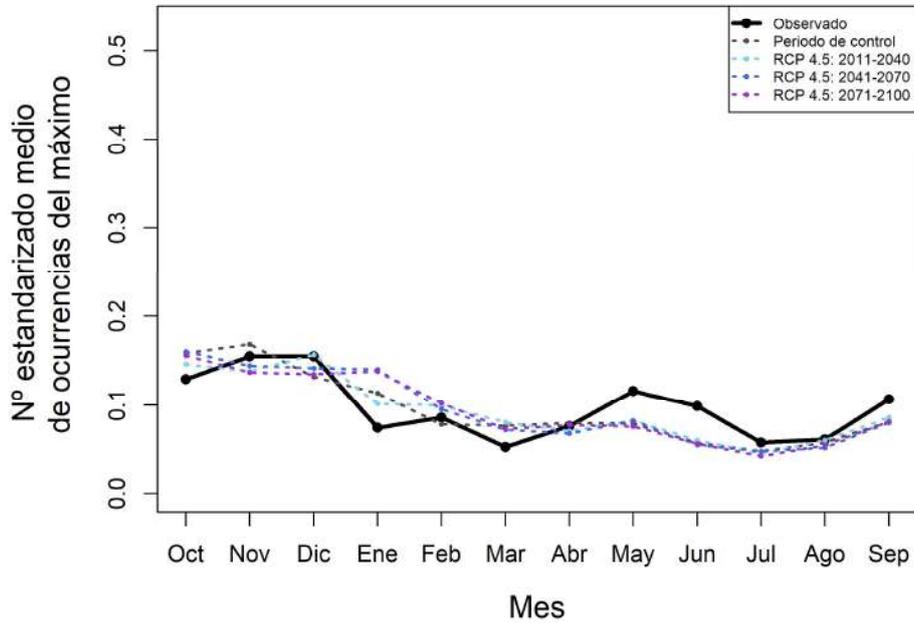


Figura A4.19. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0303".

Región 0303

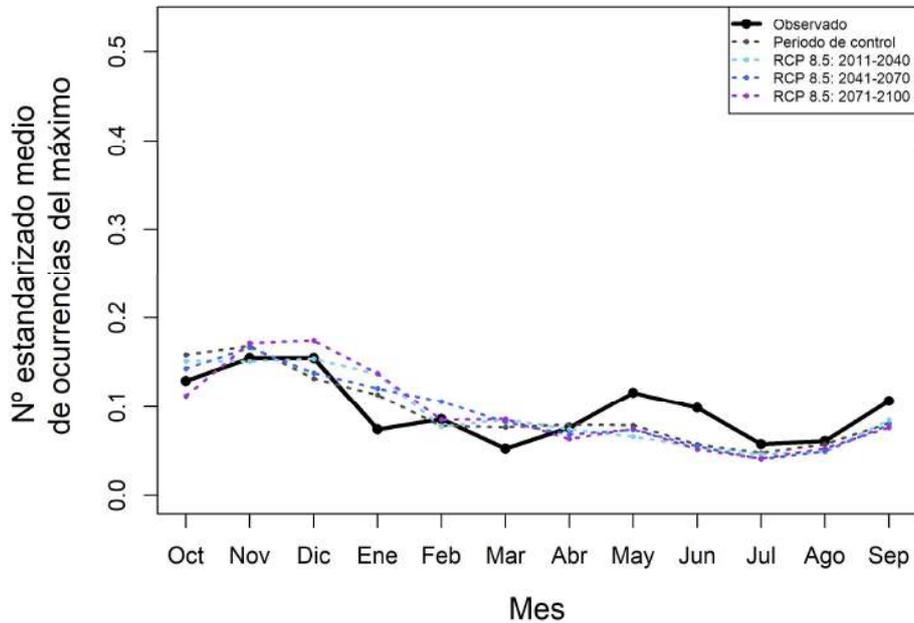


Figura A4.20. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0303".



Región 0401

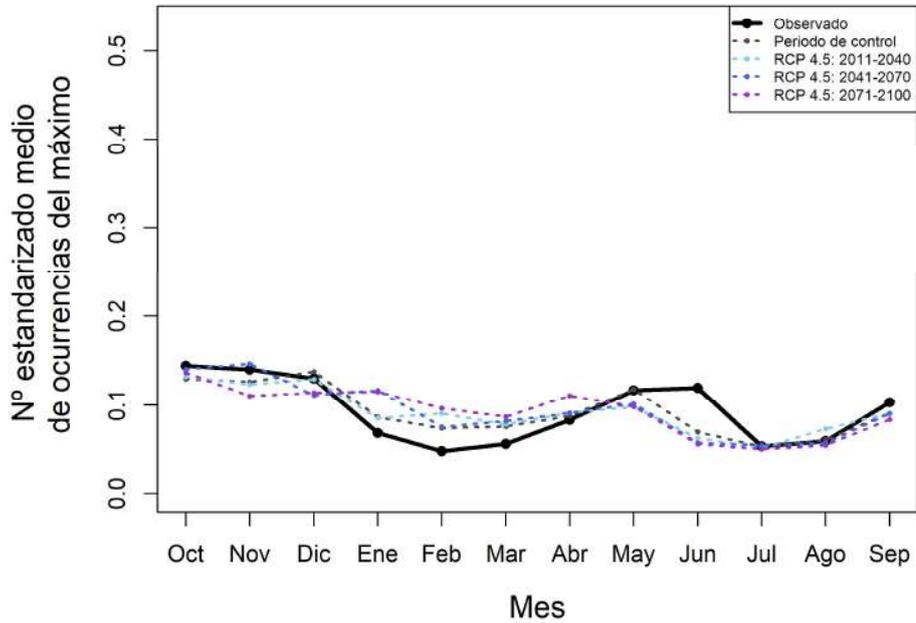


Figura A4.21. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0401".

Región 0401

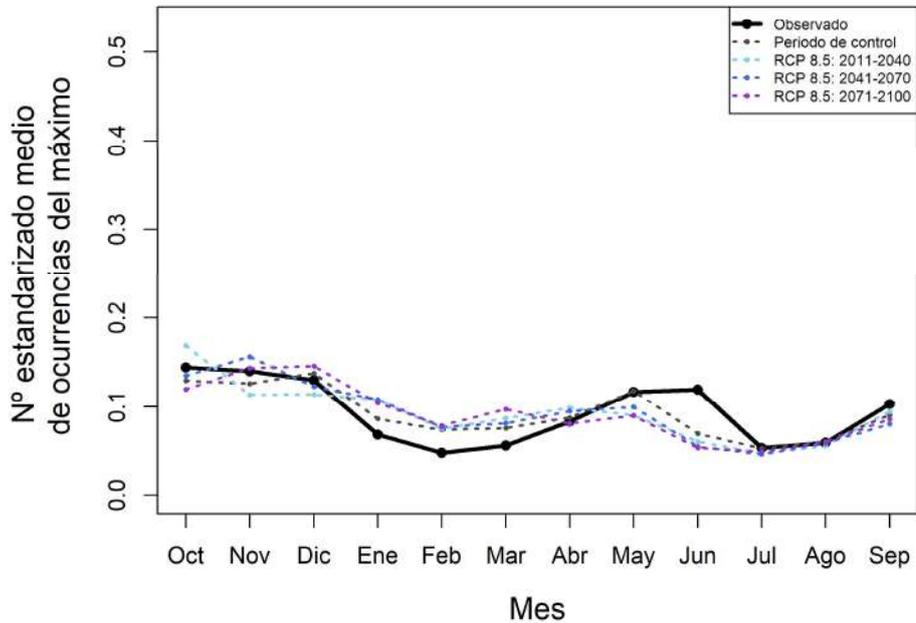


Figura A4.22. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0401".

Región 0402

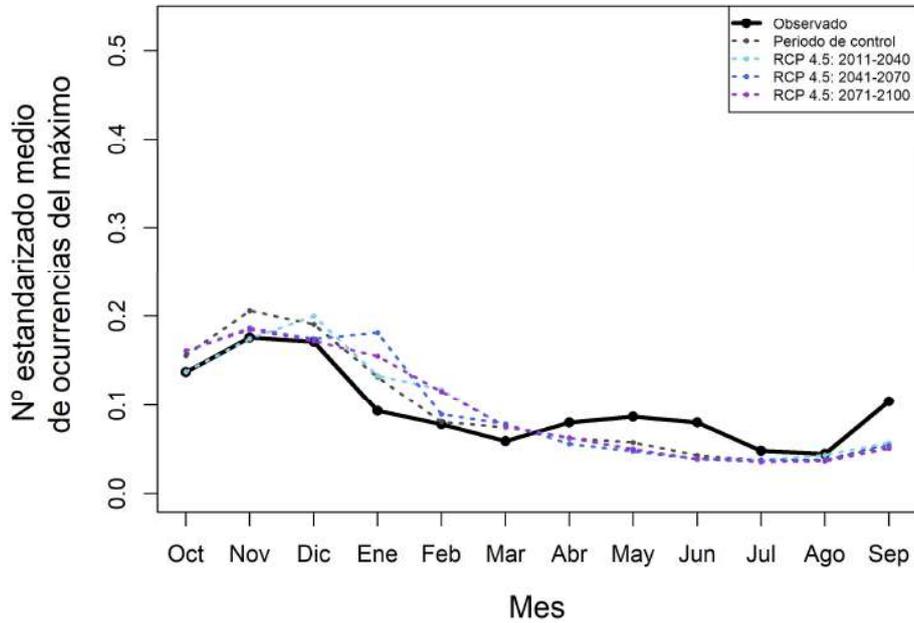


Figura A4.23. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0402".

Región 0402

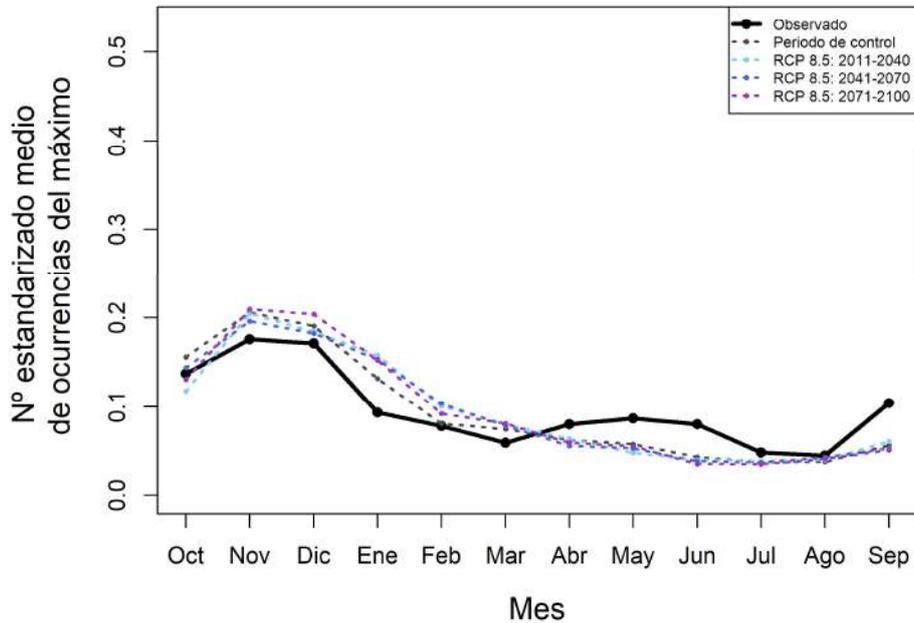


Figura A4.24. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0402".



Región 0403

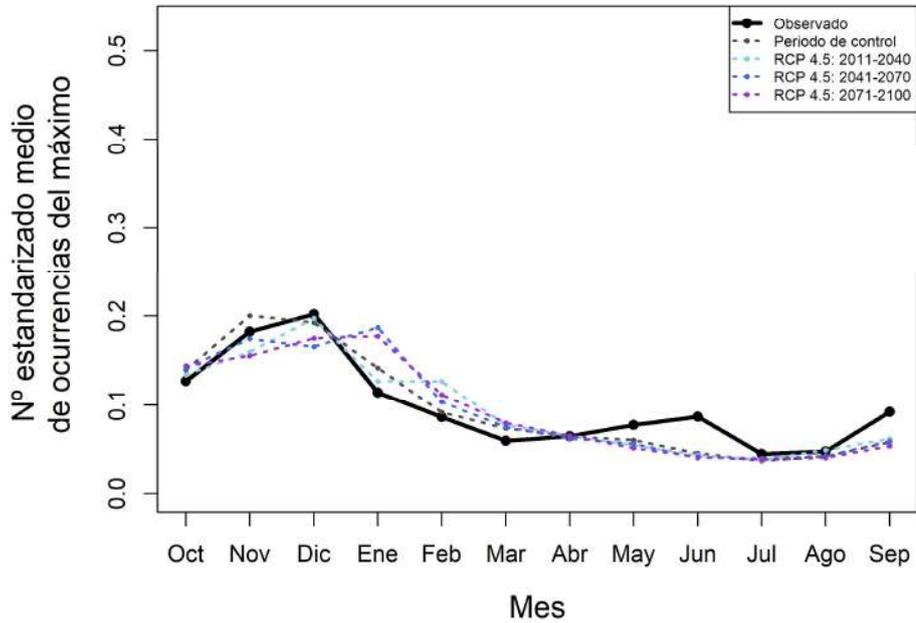


Figura A4.25. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0403".

Región 0403

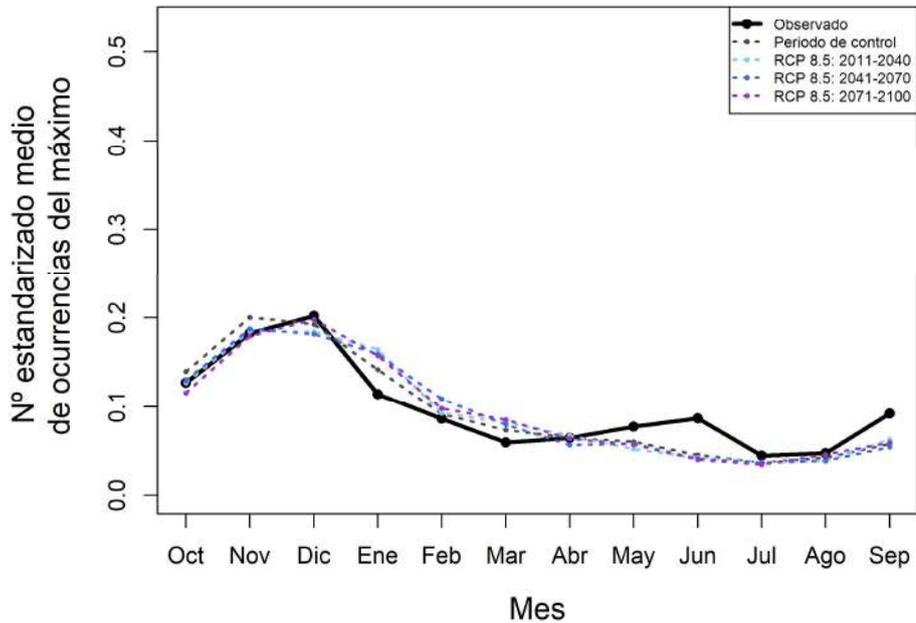


Figura A4.26. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0403".

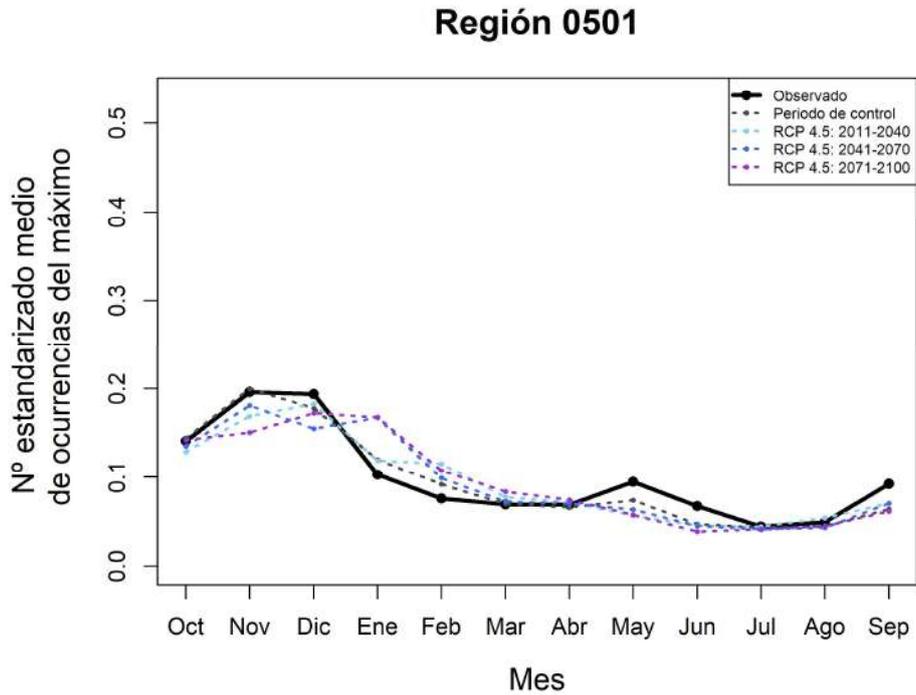


Figura A4.27. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0501".

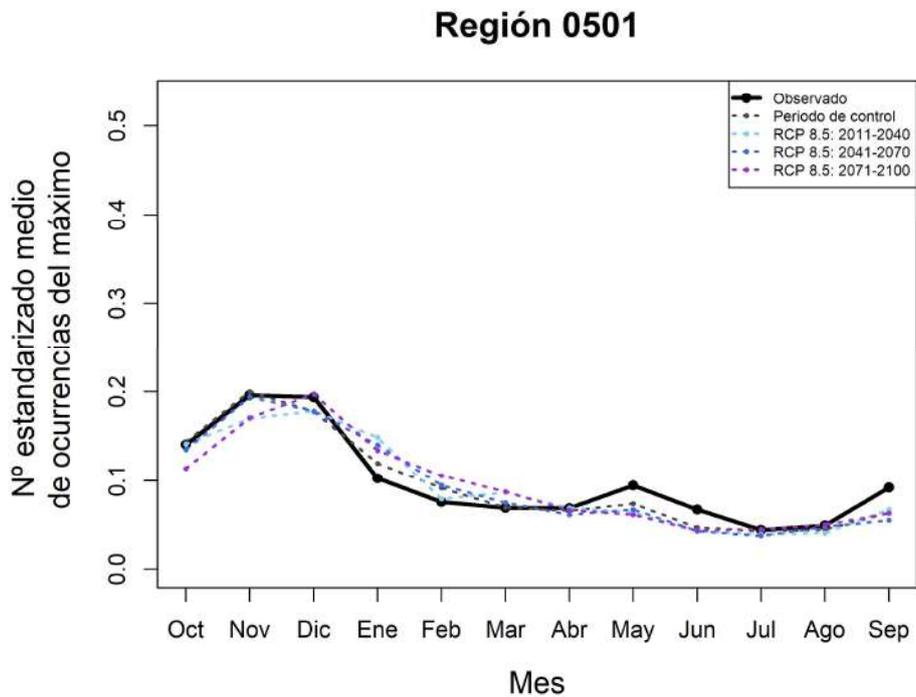


Figura A4.28. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0501".



Región 0503

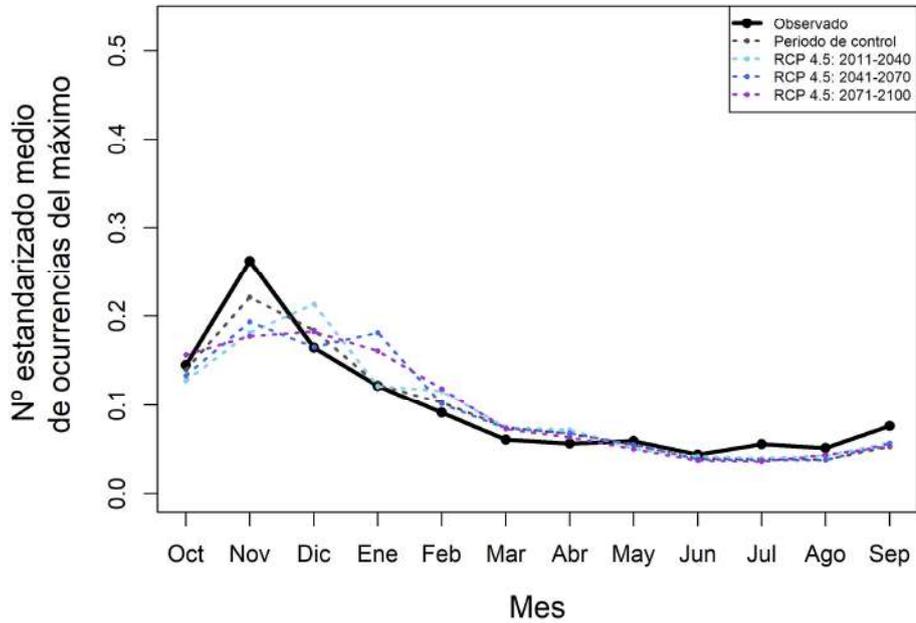


Figura A4.29. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0503".

Región 0503

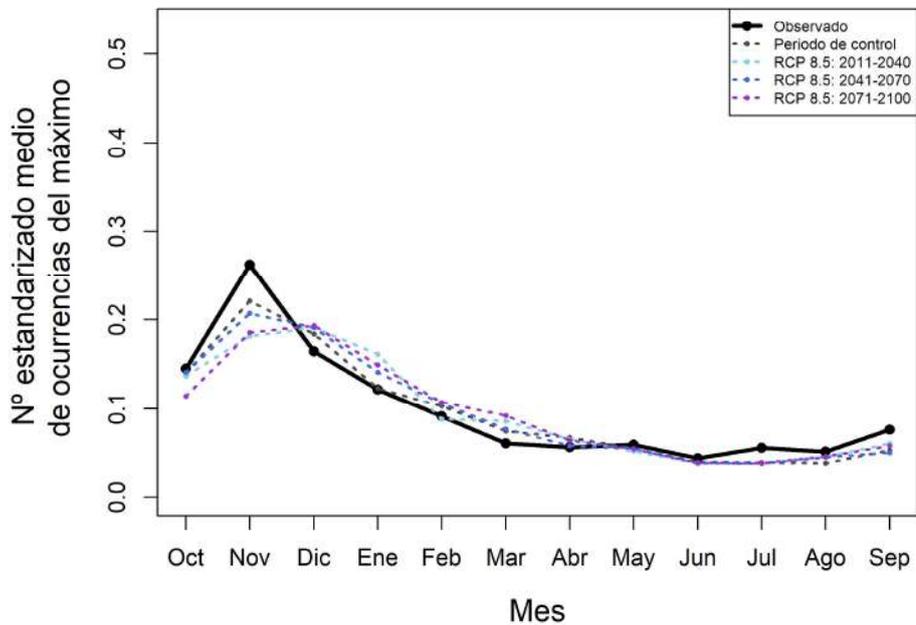


Figura A4.30. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0503".

Región 0505

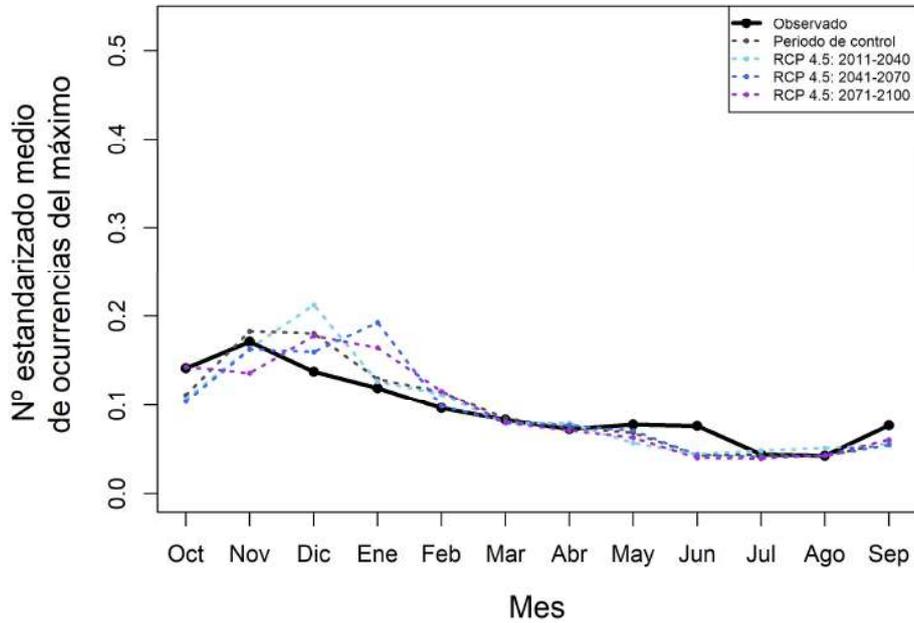


Figura A4.31. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0505".

Región 0505

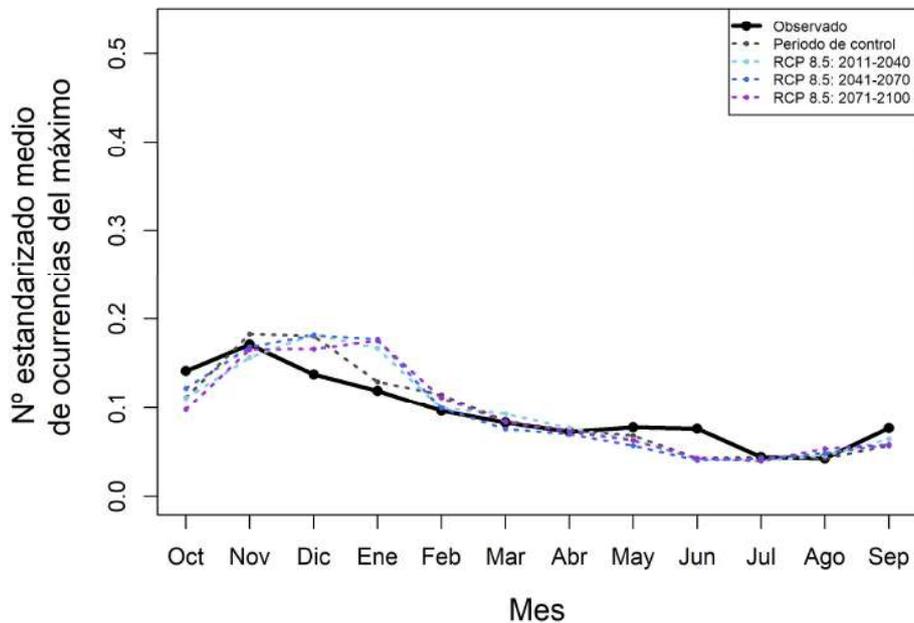


Figura A4.32. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0505".



Región 0601

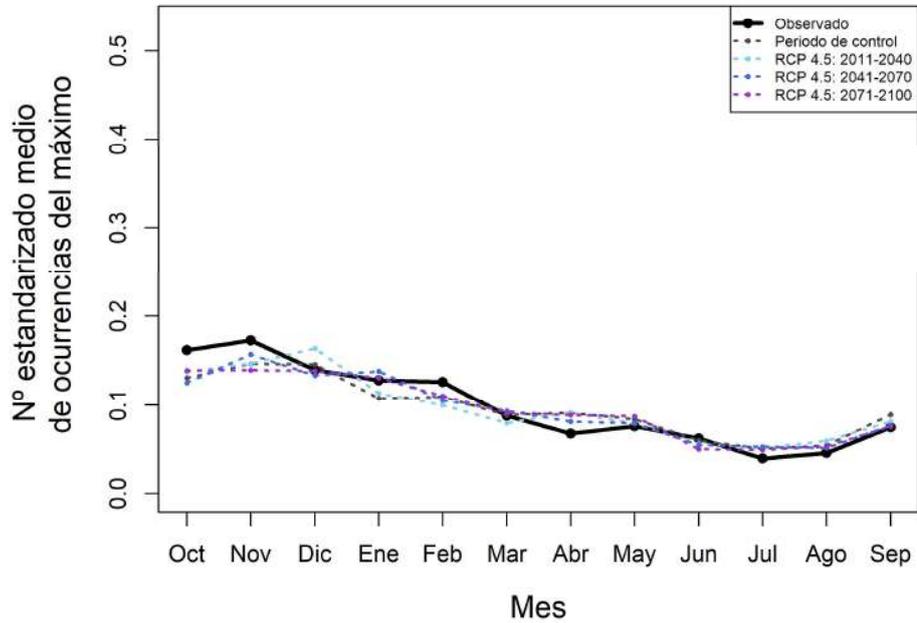


Figura A4.33. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0601".

Región 0601

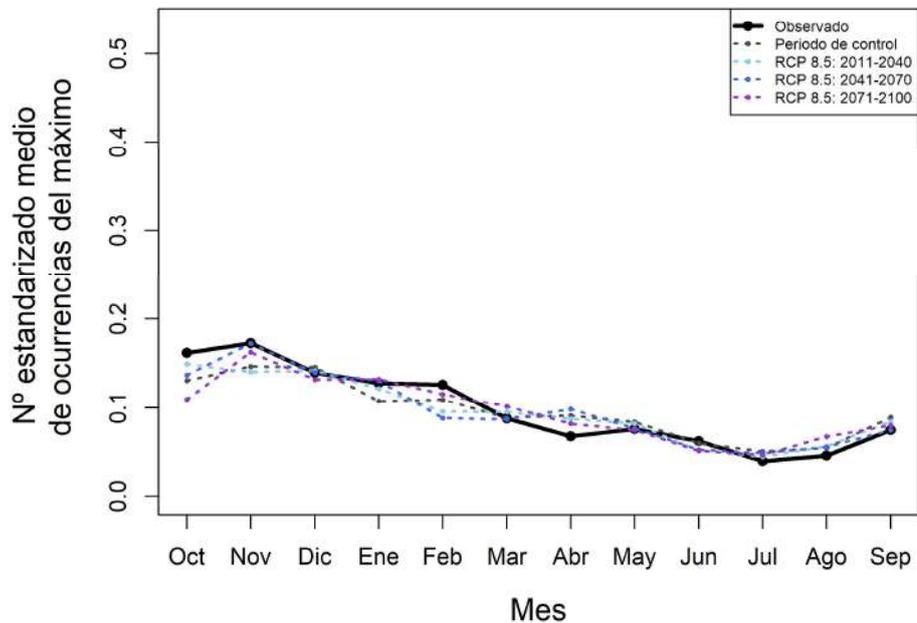


Figura A4.34. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0601".

Región 0603

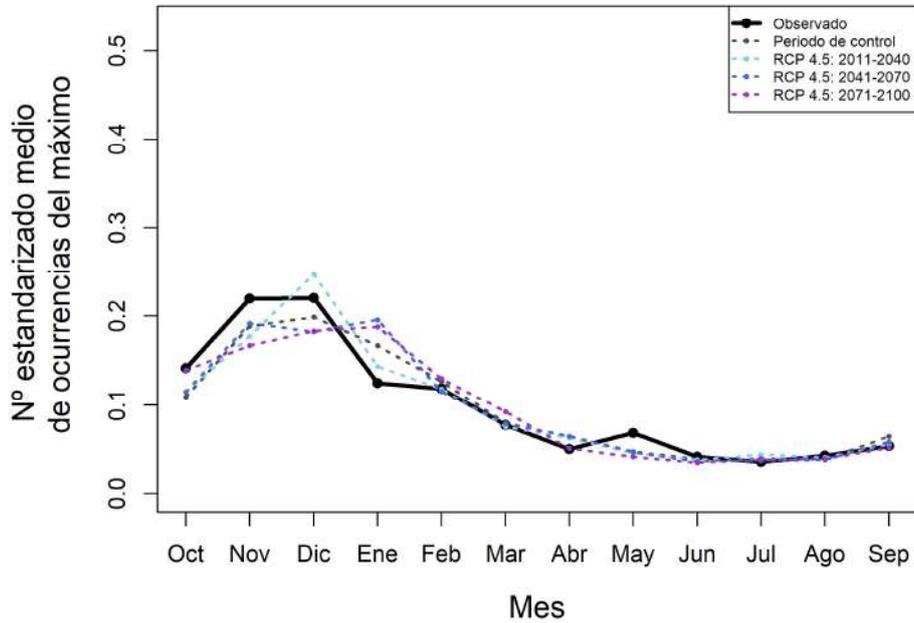


Figura A4.35. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0603".

Región 0603

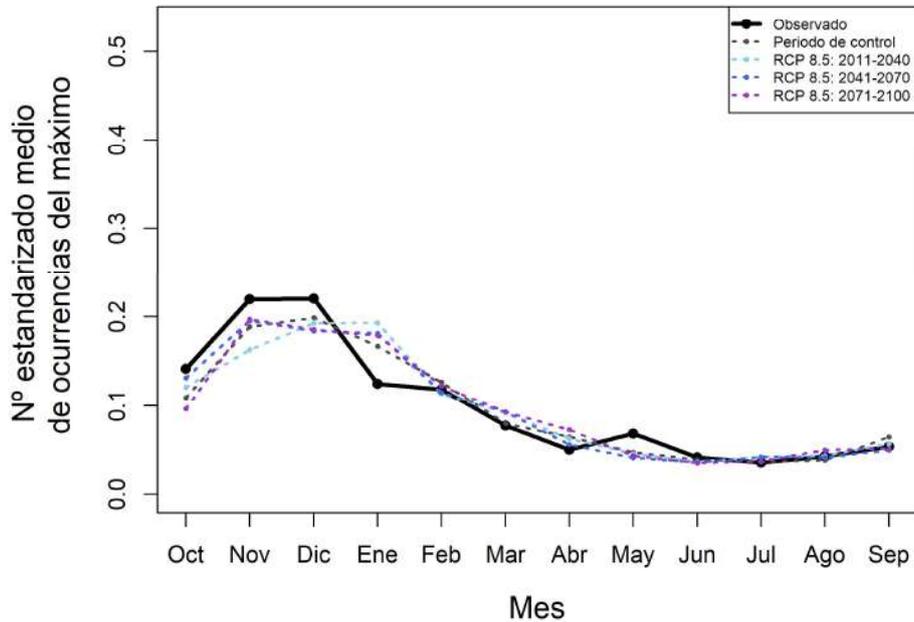


Figura A4.36. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0603".



Región 0701

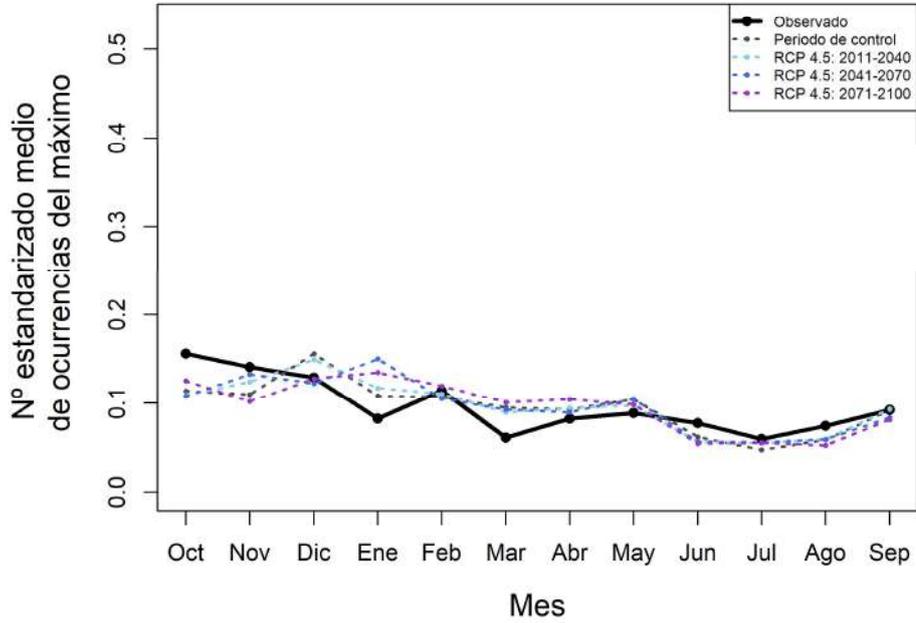


Figura A4.37. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0701".

Región 0701

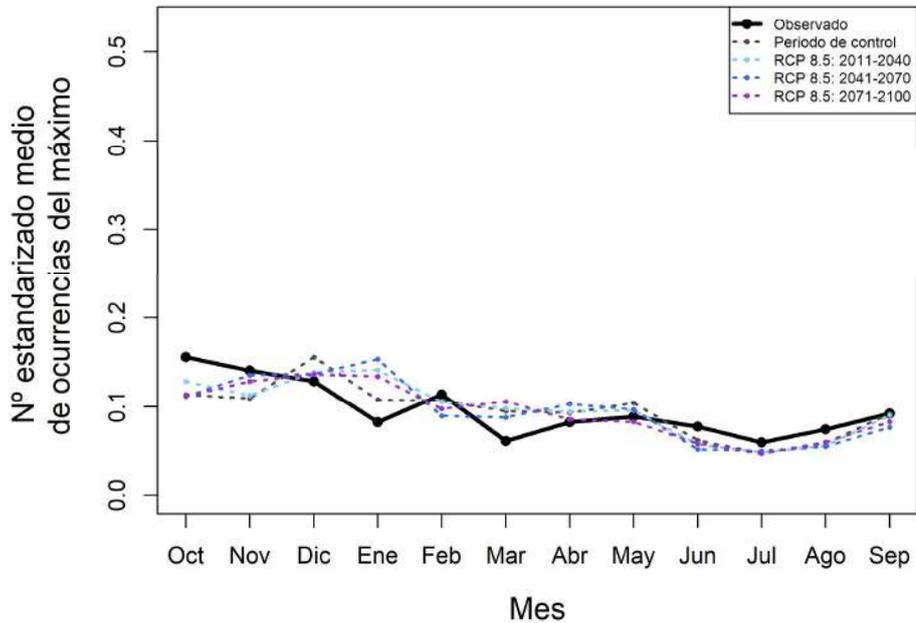


Figura A4.38. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0701".

Región 0801

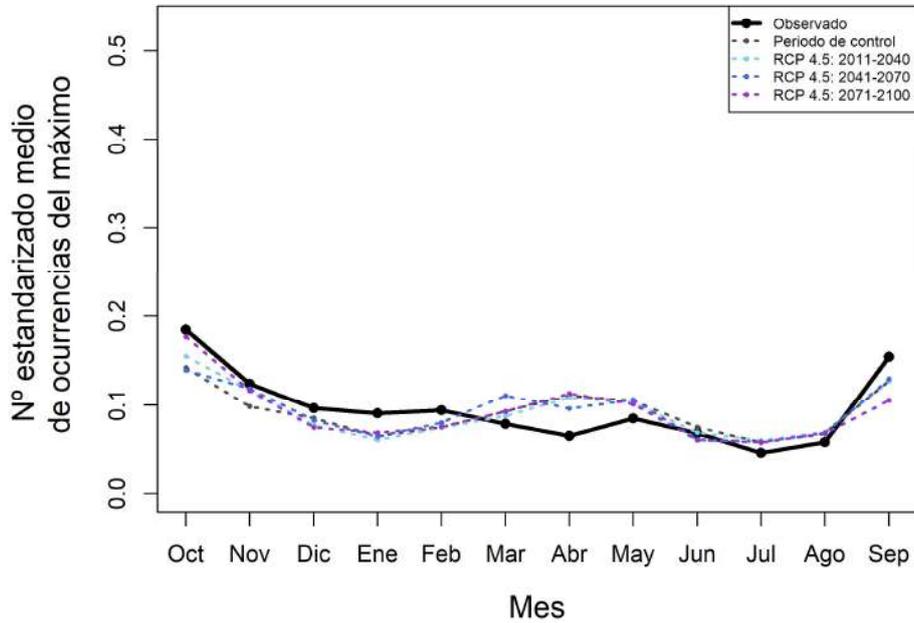


Figura A4.39. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0801".

Región 0801

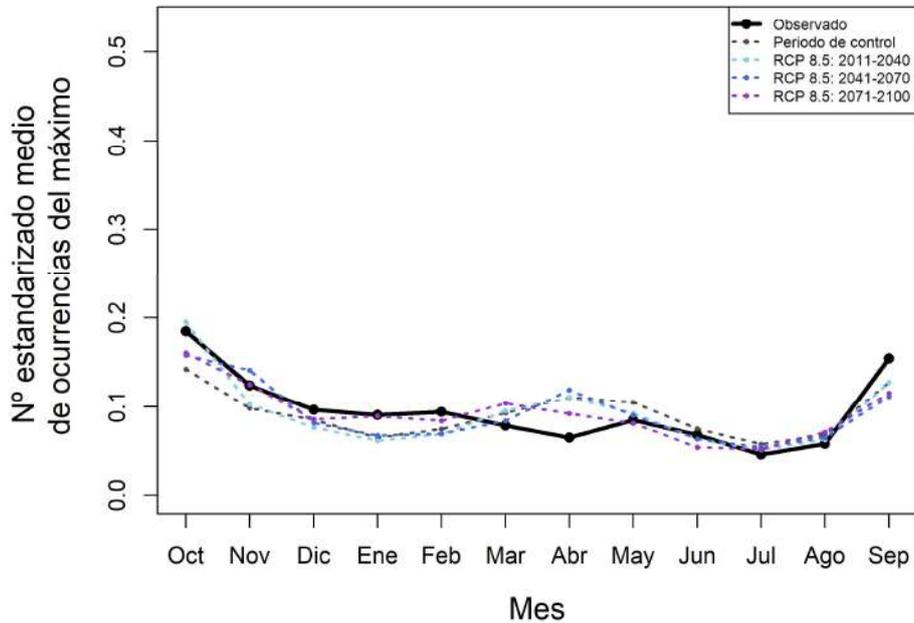


Figura A4.40. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0801".



Región 0901

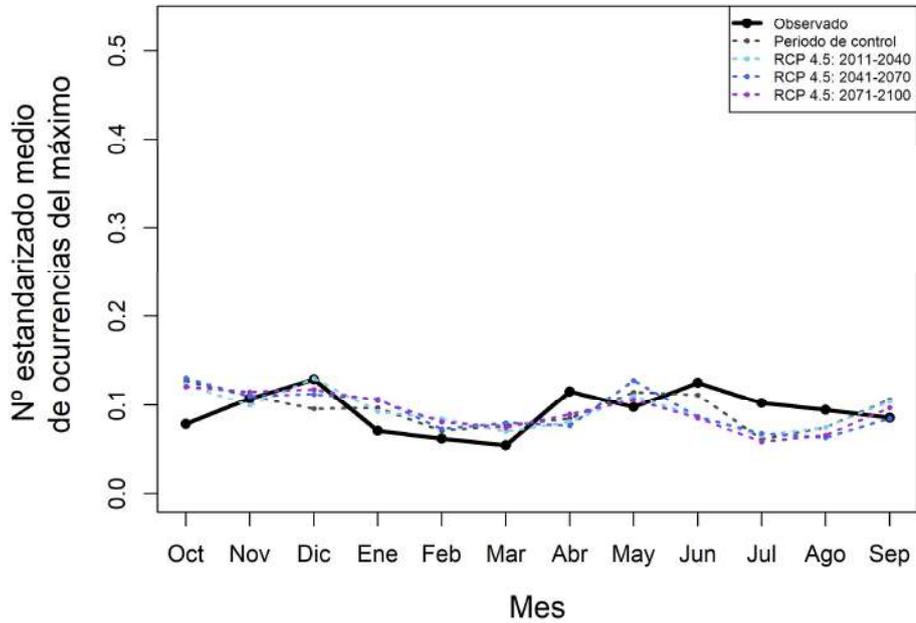


Figura A4.41. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0901".

Región 0901

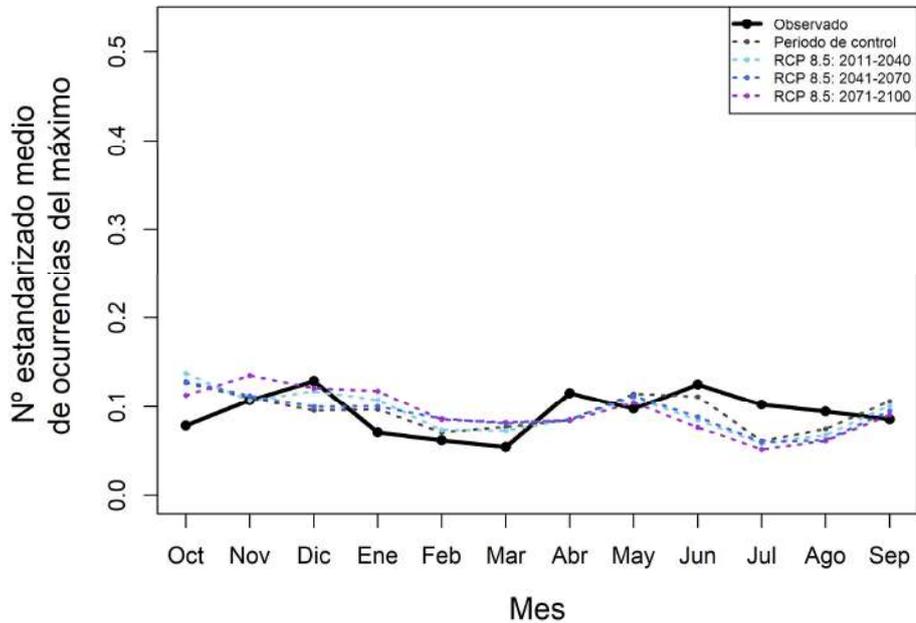


Figura A4.42. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0901".

Región 0903

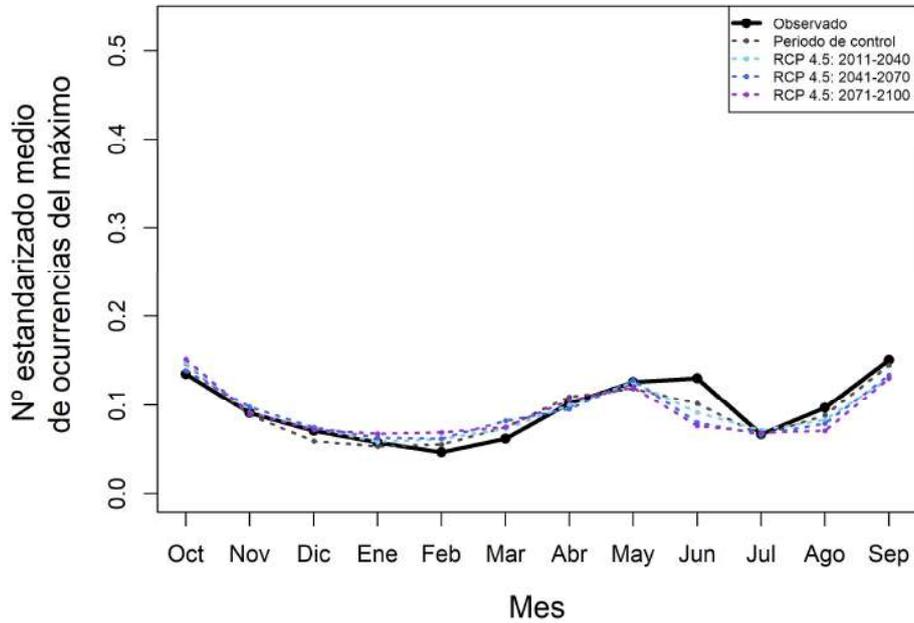


Figura A4.43. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0903".

Región 0903

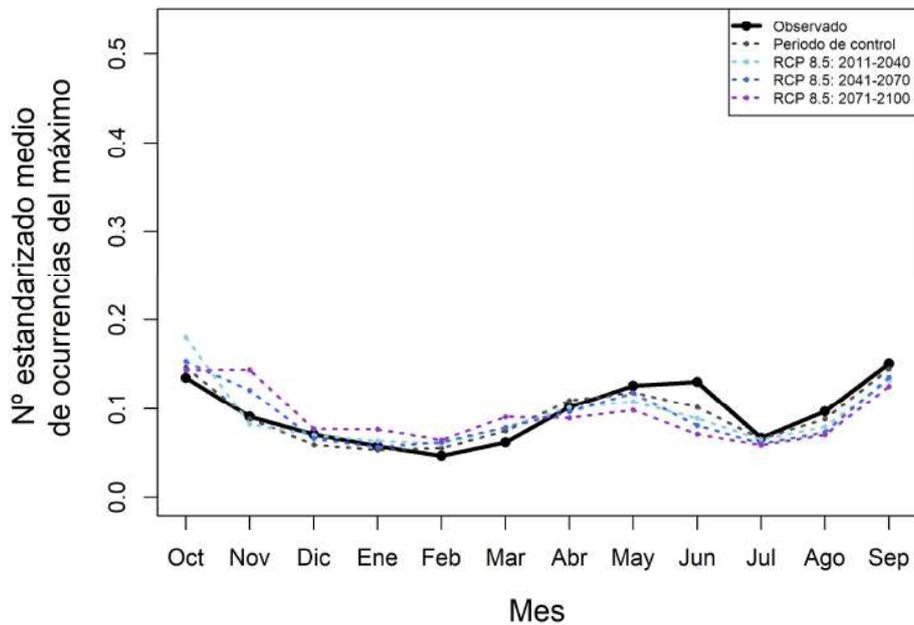


Figura A4.44. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0903".



Región 0905

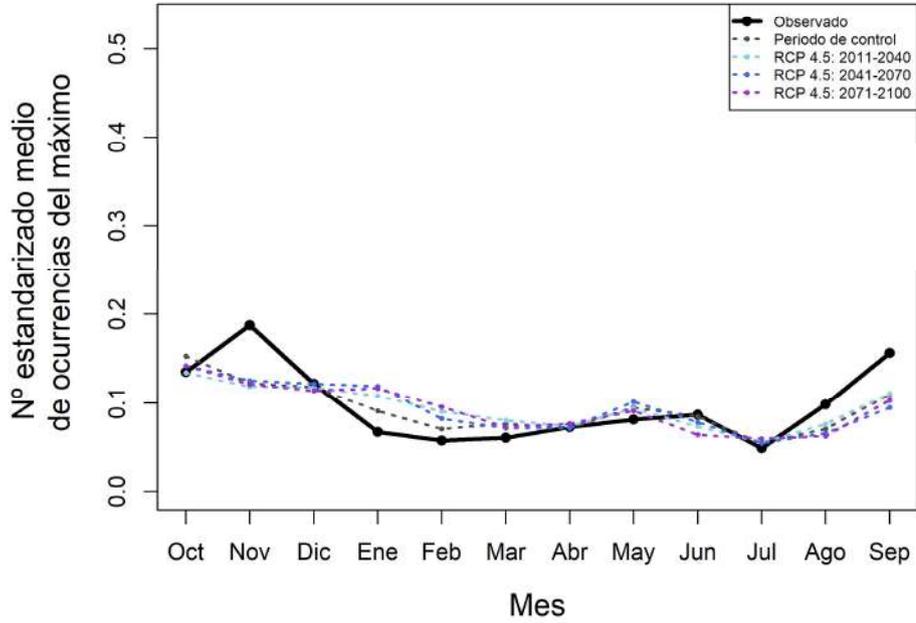


Figura A4.45. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0905".

Región 0905

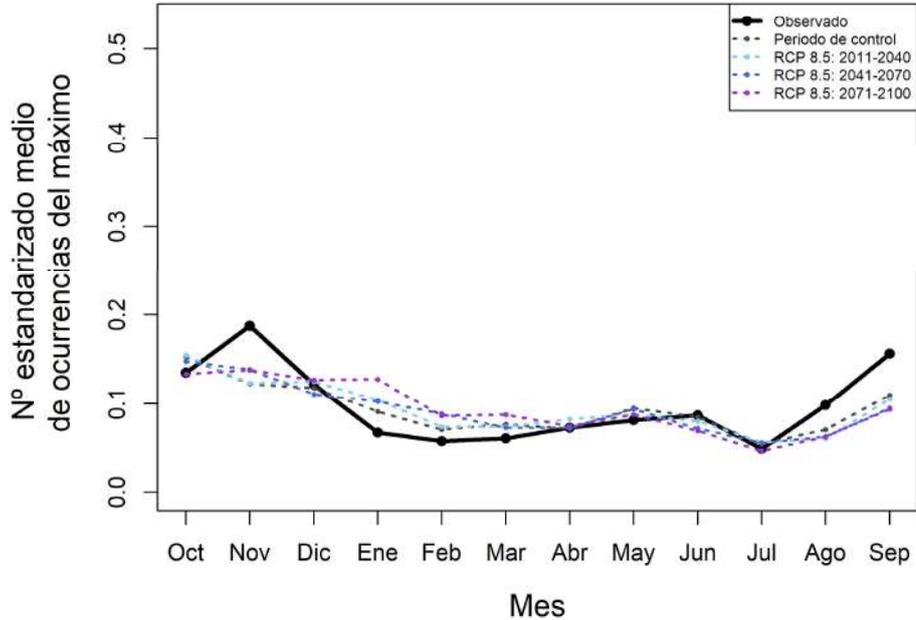


Figura A4.46. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0905".

Región 0907

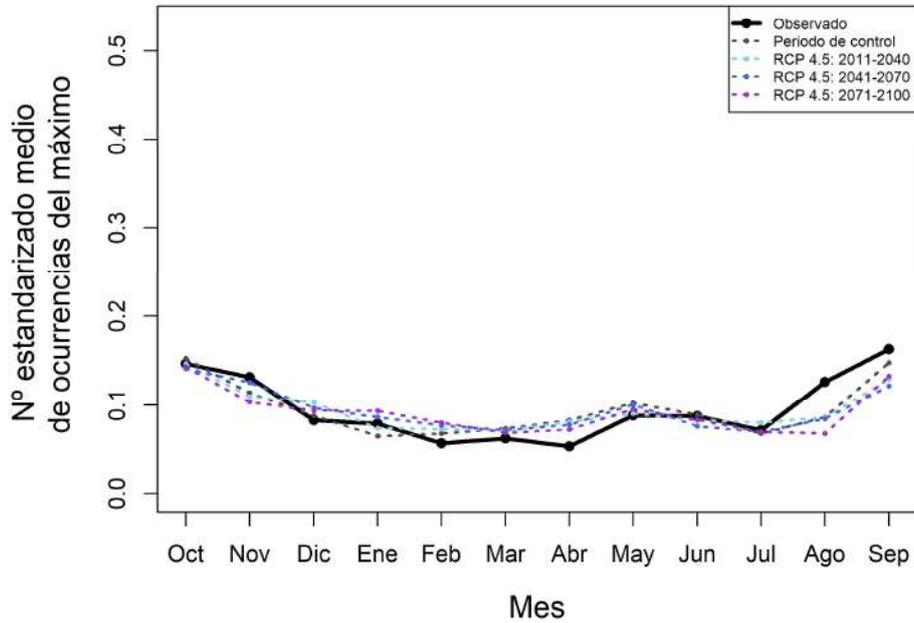


Figura A4.47. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0907".

Región 0907

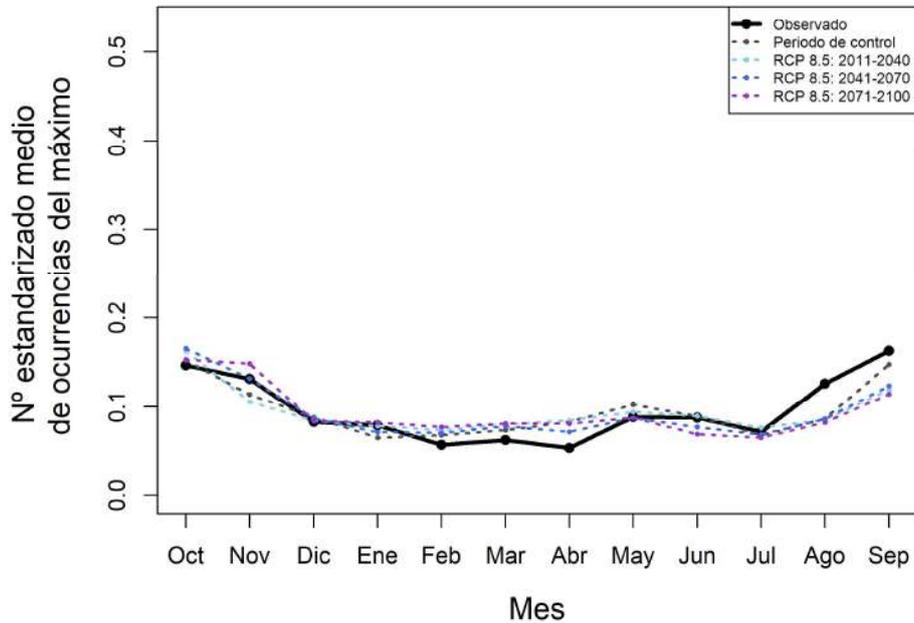


Figura A4.48. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0907".



Región 0909

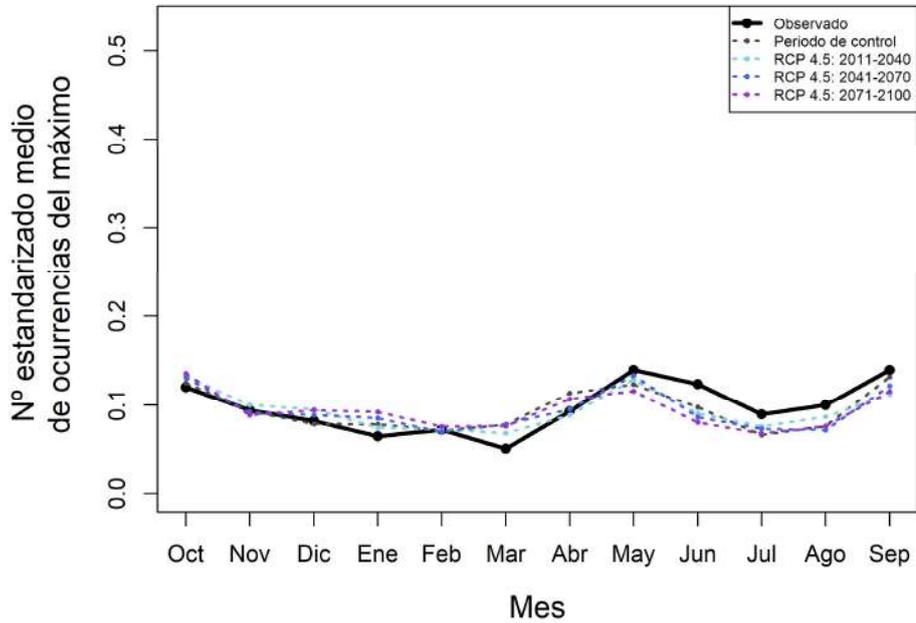


Figura A4.49. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "0909".

Región 0909

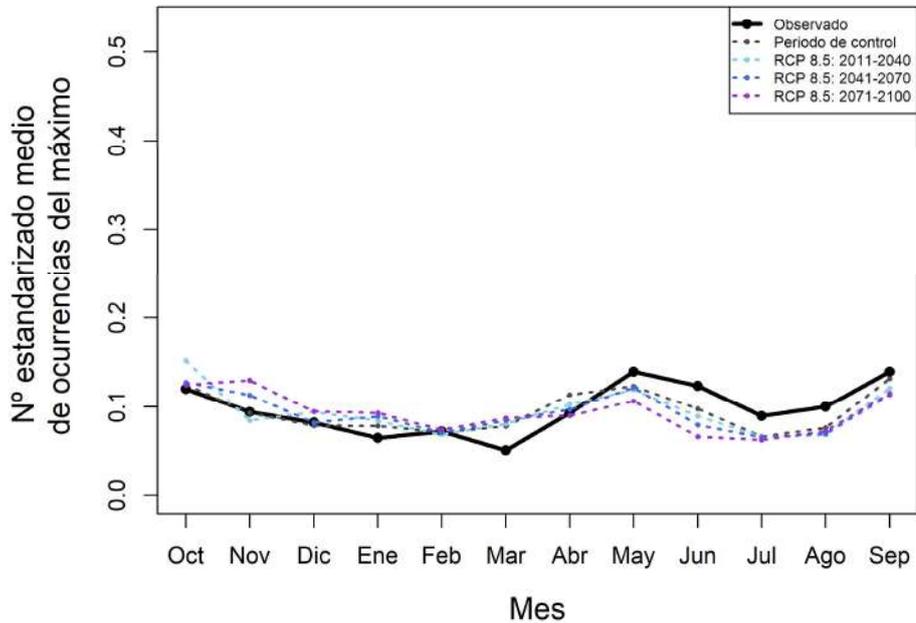


Figura A4.50. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "0909".

Región 1001

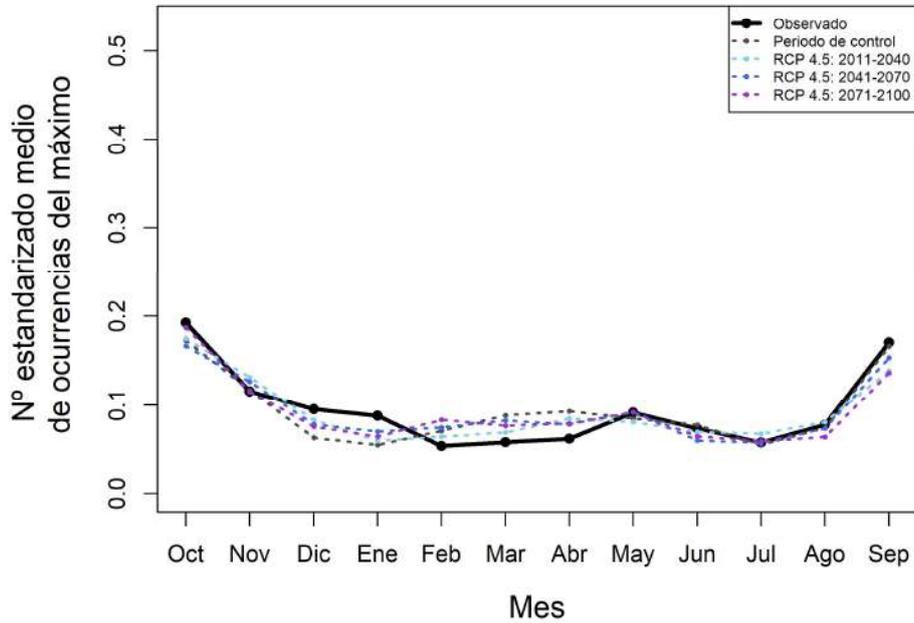


Figura A4.51. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "1001".

Región 1001

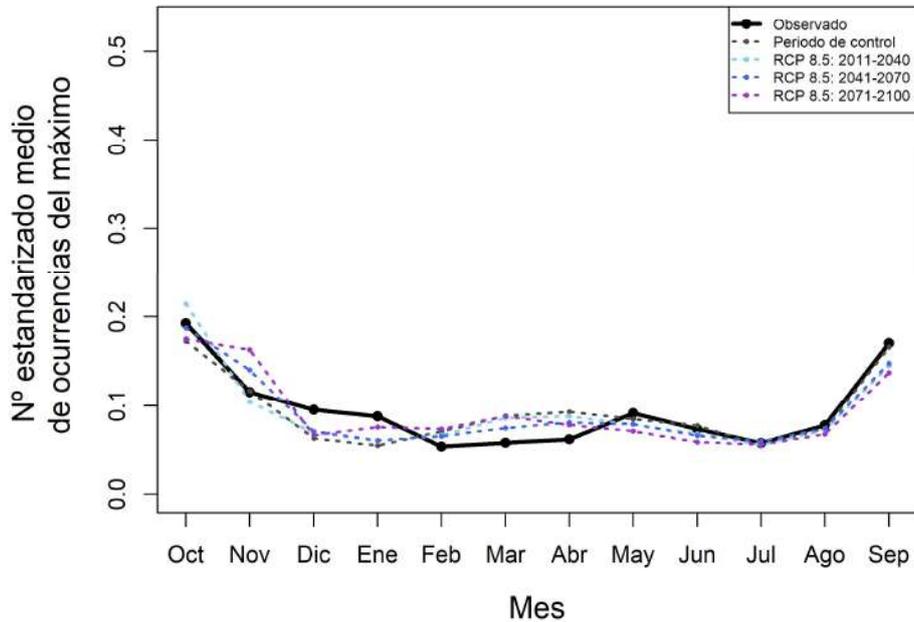


Figura A4.52. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "1001".

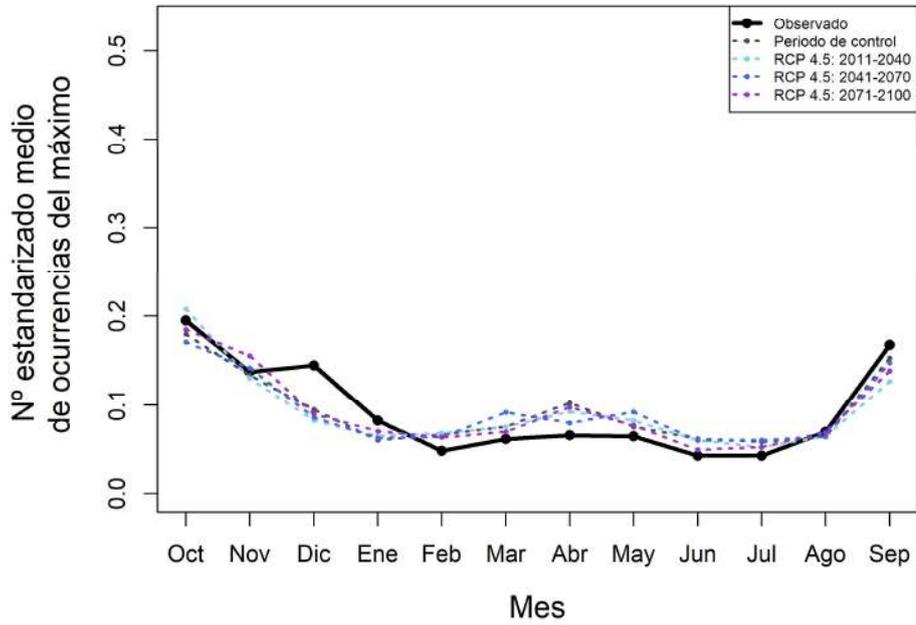
Región 1100

Figura A4.53. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "1100".

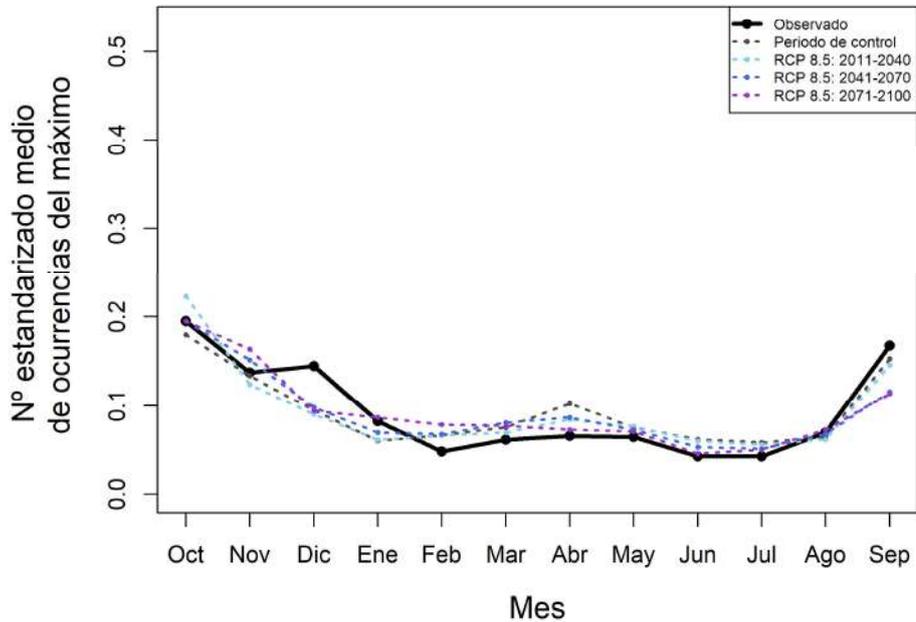
Región 1100

Figura A4.54. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "1100".

Región 1300

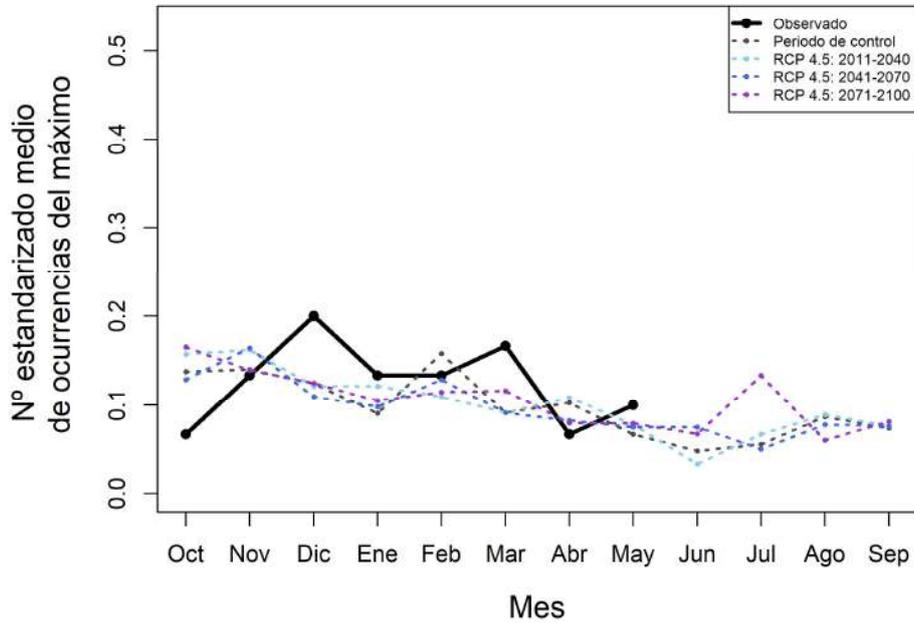


Figura A4.55. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 4.5 respecto al periodo de control en la región "1300".

Región 1300

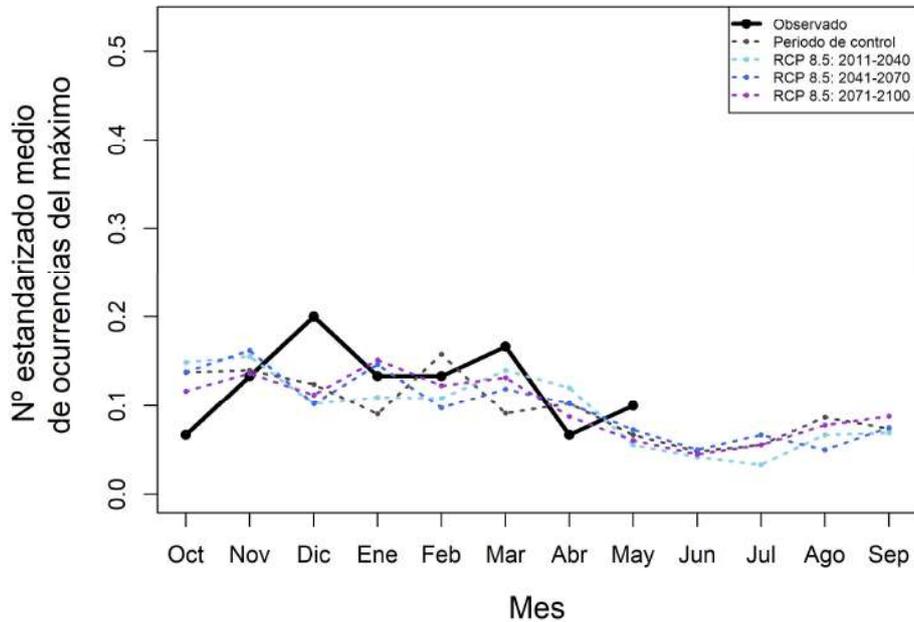


Figura A4.56. Contraste de la estacionalidad de la precipitación diaria máxima anual, obtenida como media del conjunto de los modelos climáticos de estudio, para los distintos periodos de impacto y escenario RCP 8.5 respecto al periodo de control en la región "1300".



CEDEX

Anexo nº 5

Mapas de tasas de cambio en cuantil asociadas a los modelos SQRT-R y GEV-L para cada modelo climático común en relación a la precipitación diaria máxima anual



Este **Anexo nº 5** incluye los mapas de tasas de cambio en cuantil asociados con el modelo SQRT-R en la Península y Baleares y el modelo GEV-L en toda la zona de estudio para cada uno de los 11 modelos climáticos comunes en relación a la precipitación diaria máxima anual para los distintos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) y periodos de retorno (10, 100 y 500 años) (**Figuras A5.1 a A5.36**).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

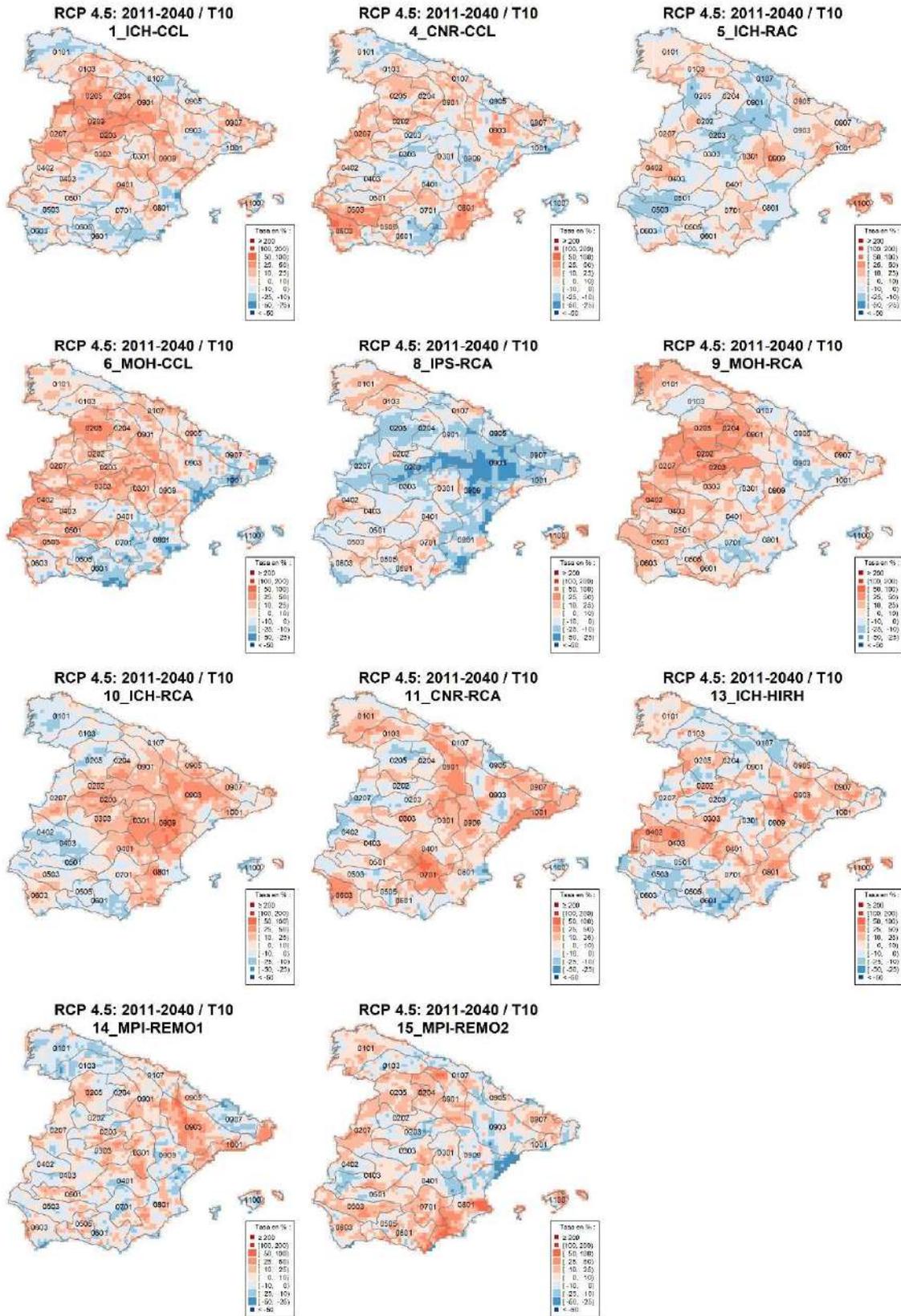


Figura A5.1. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

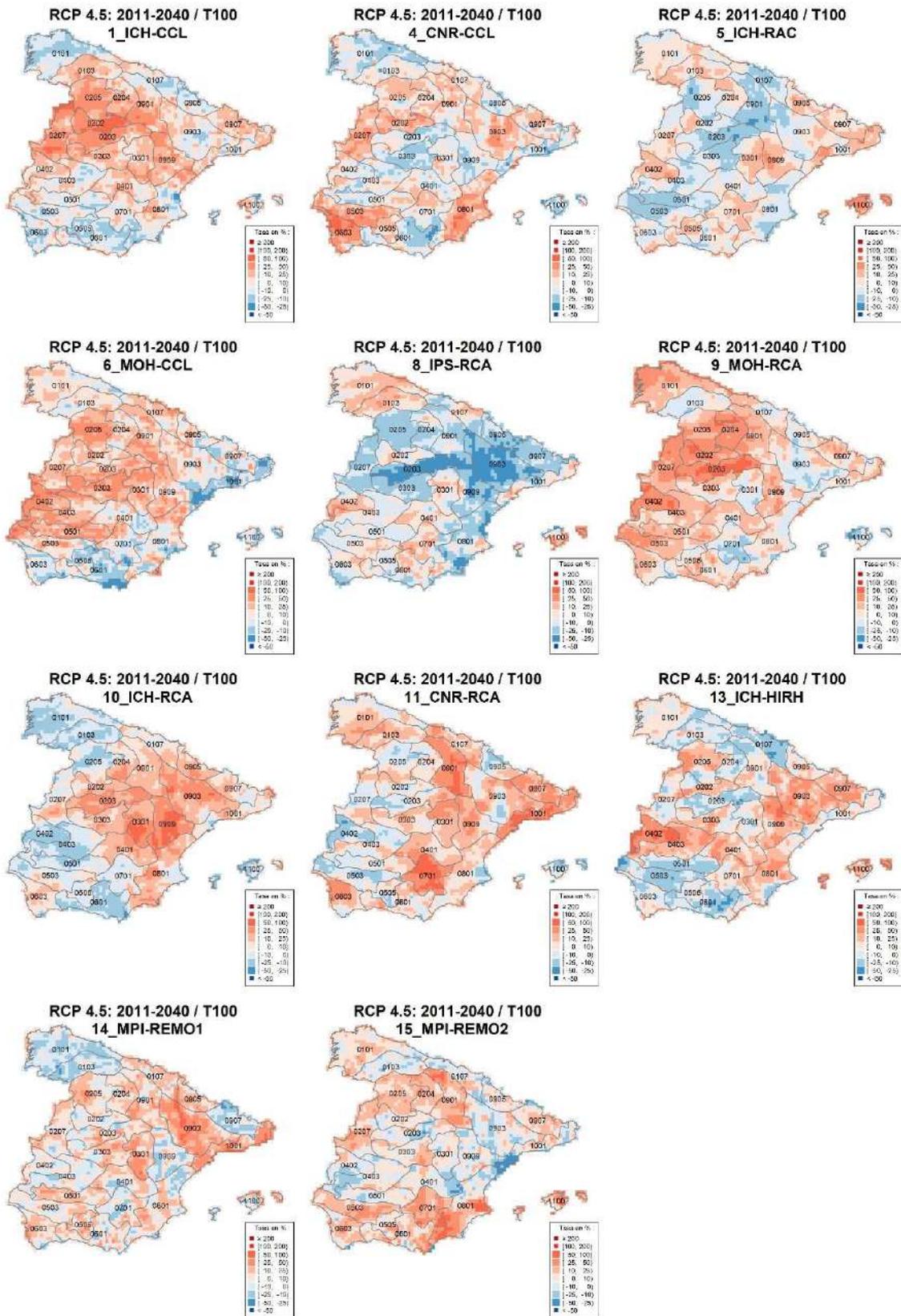


Figura A5.2. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

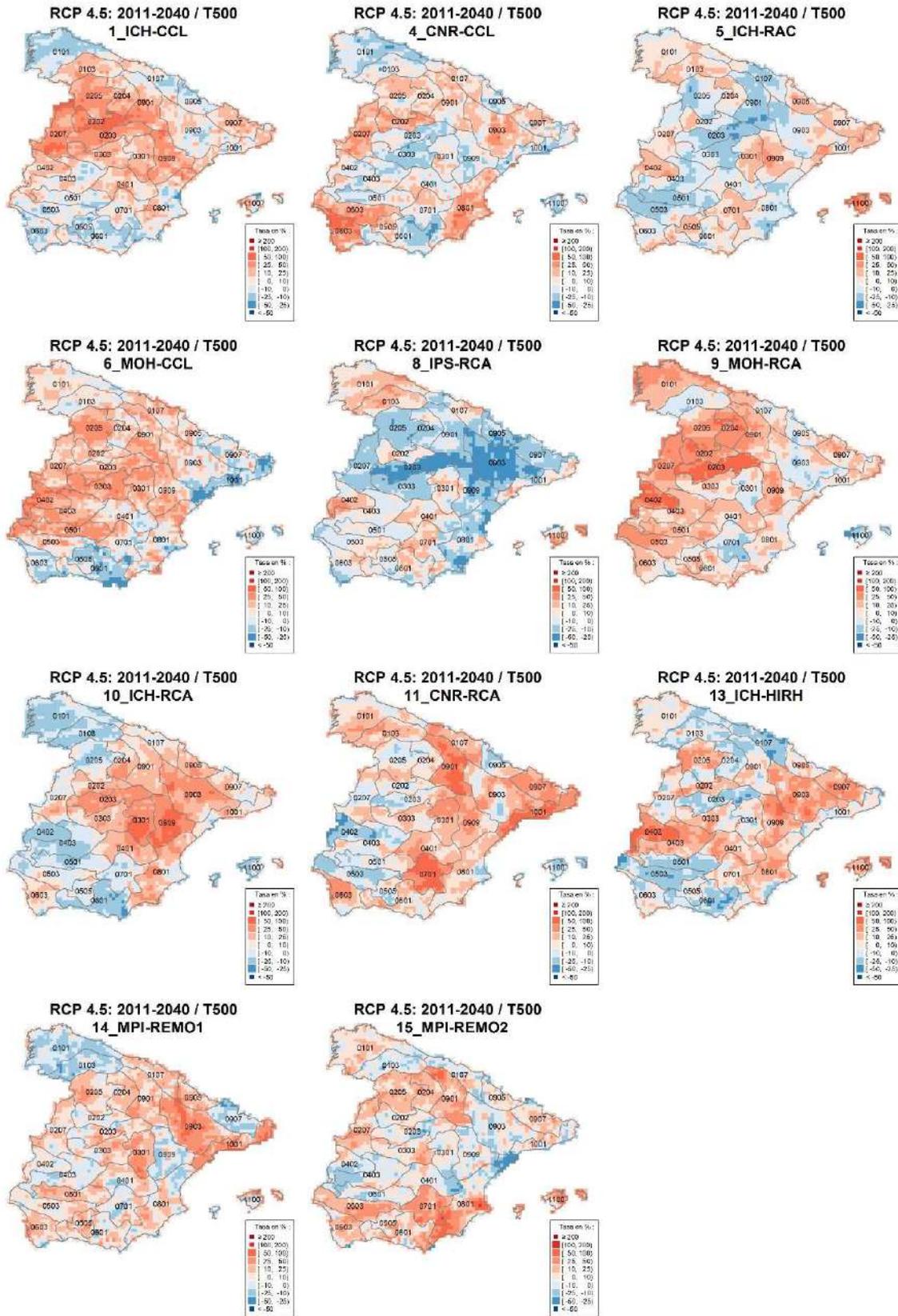


Figura A5.3. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

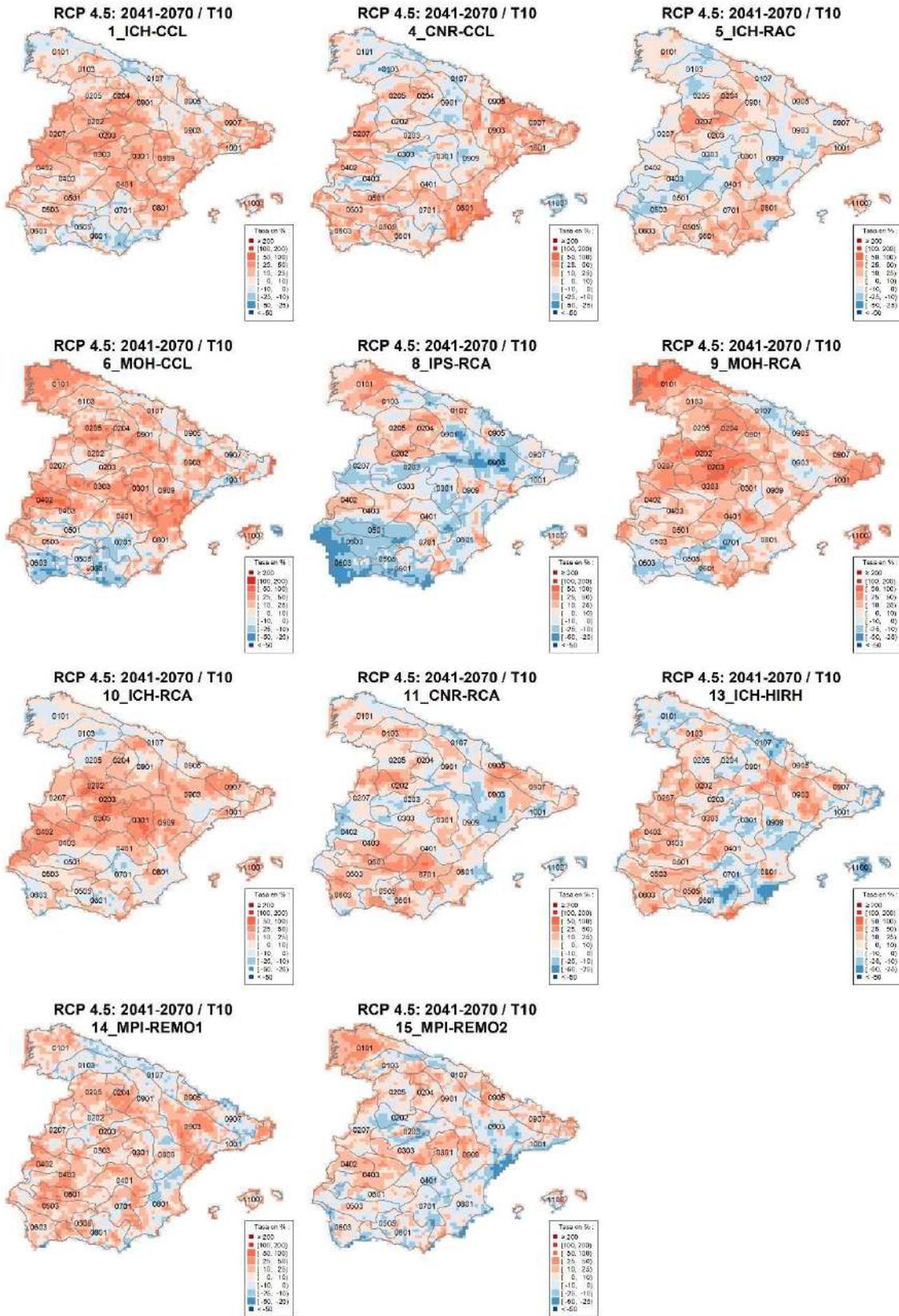


Figura A5.4. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

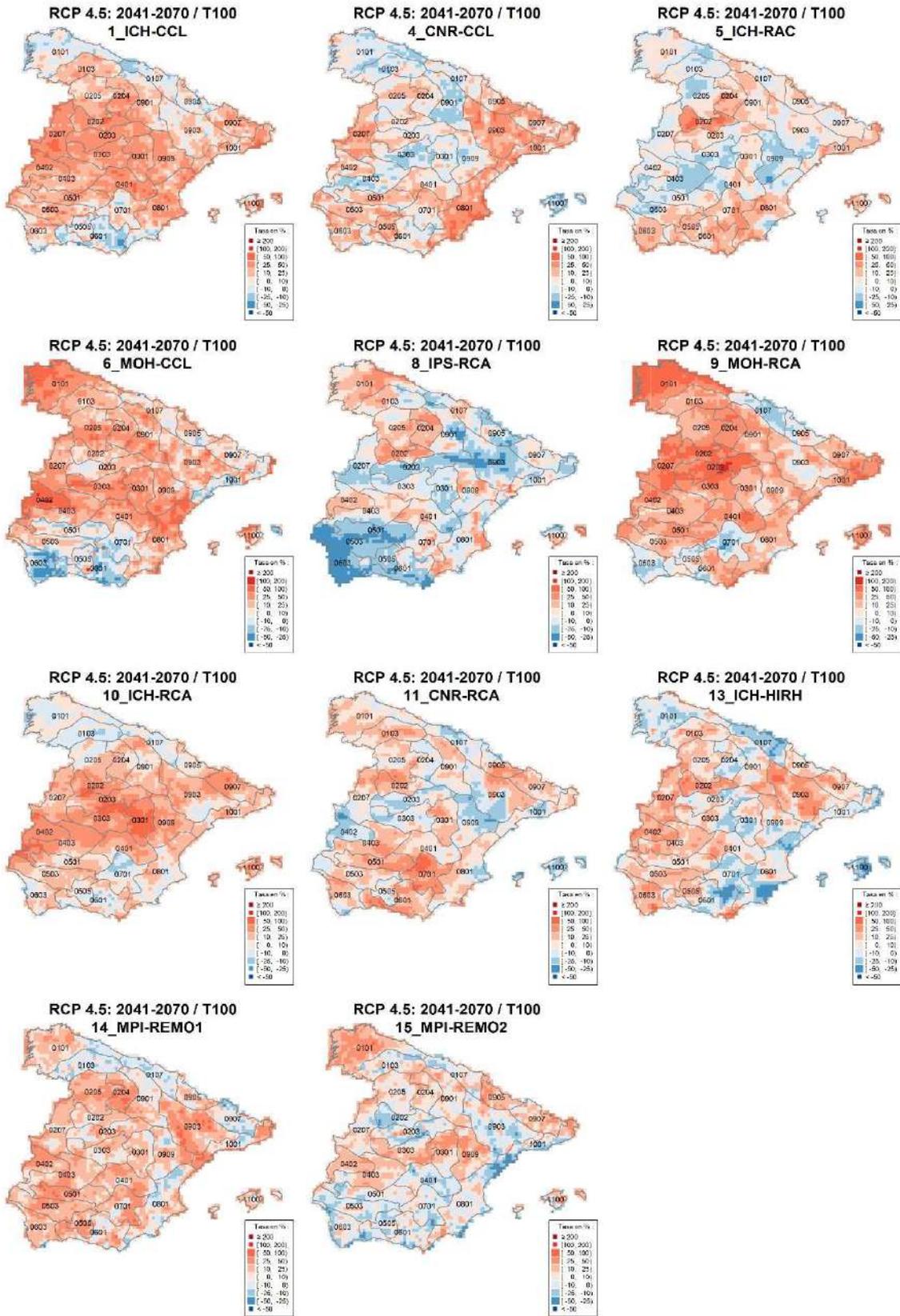


Figura A5.5. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

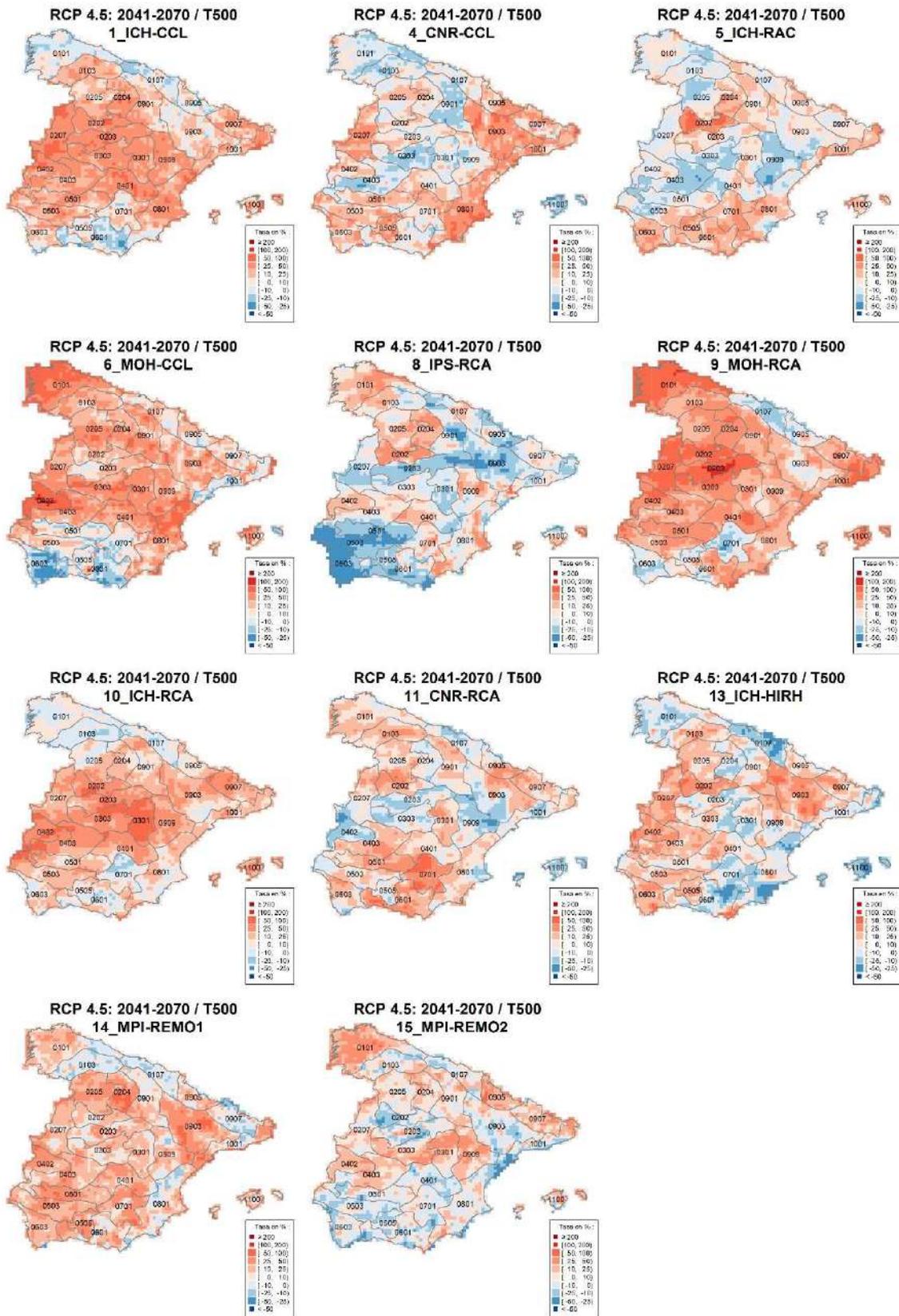


Figura A5.6. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

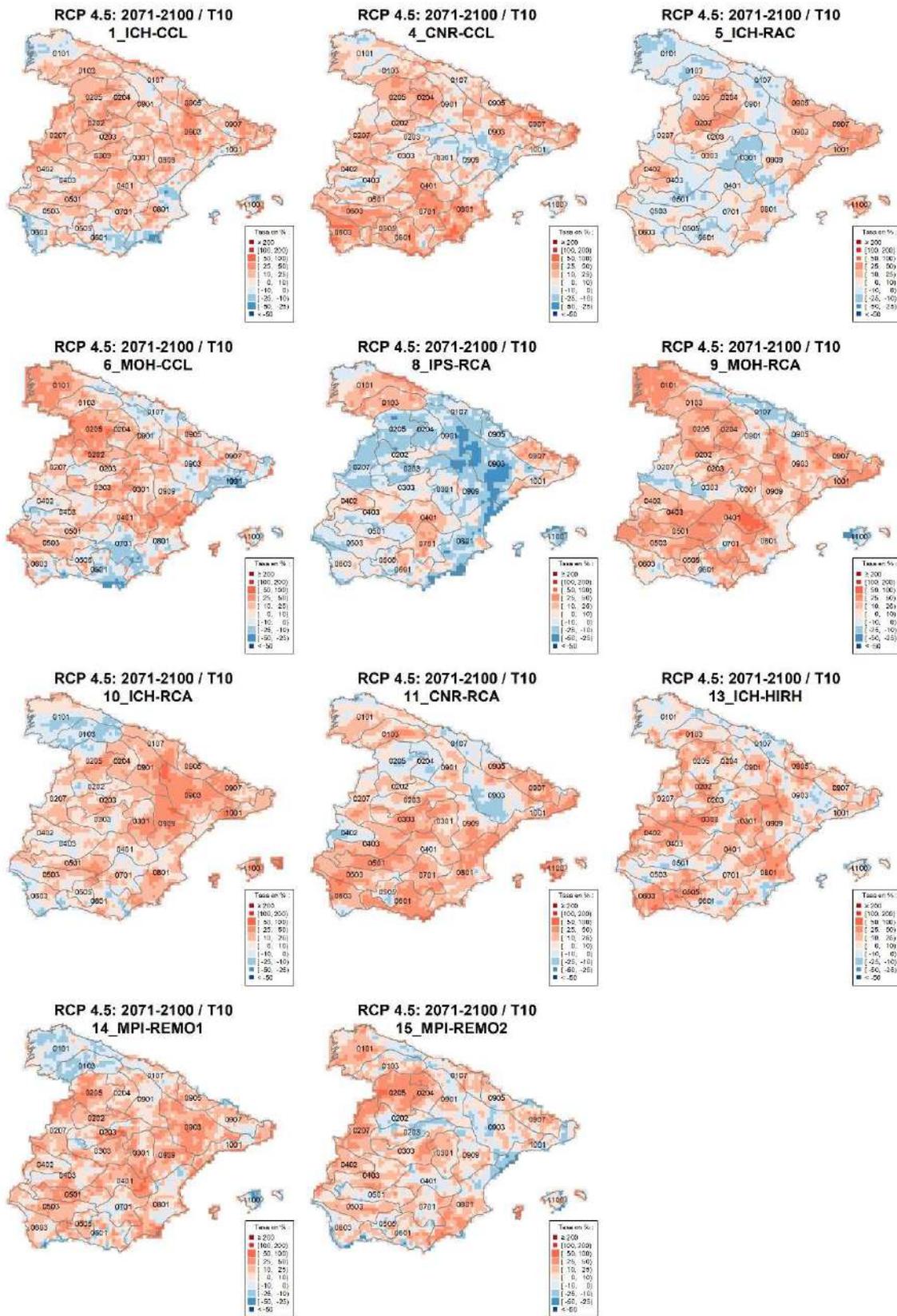


Figura A5.7. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, T = 10 años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

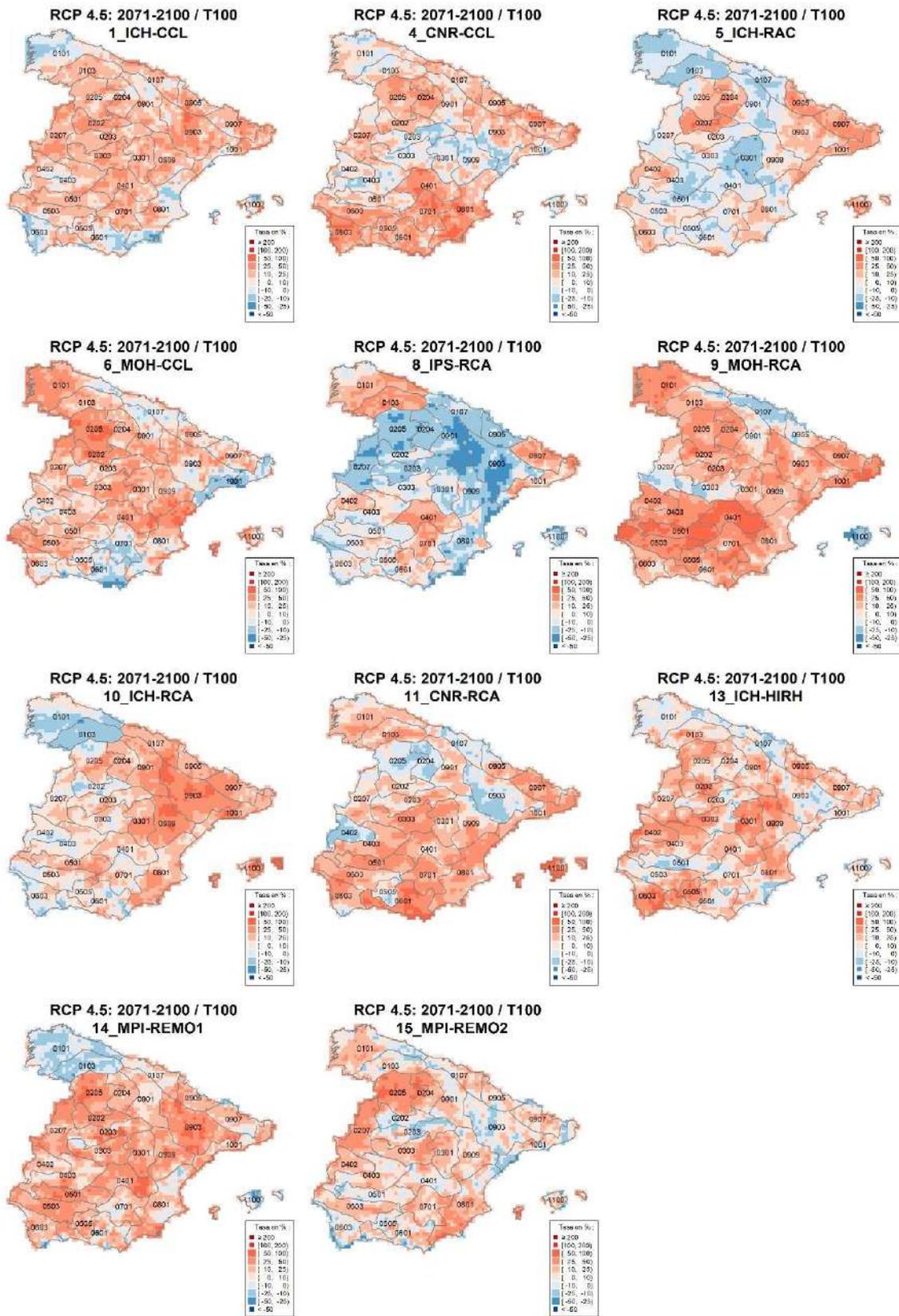


Figura A5.8. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

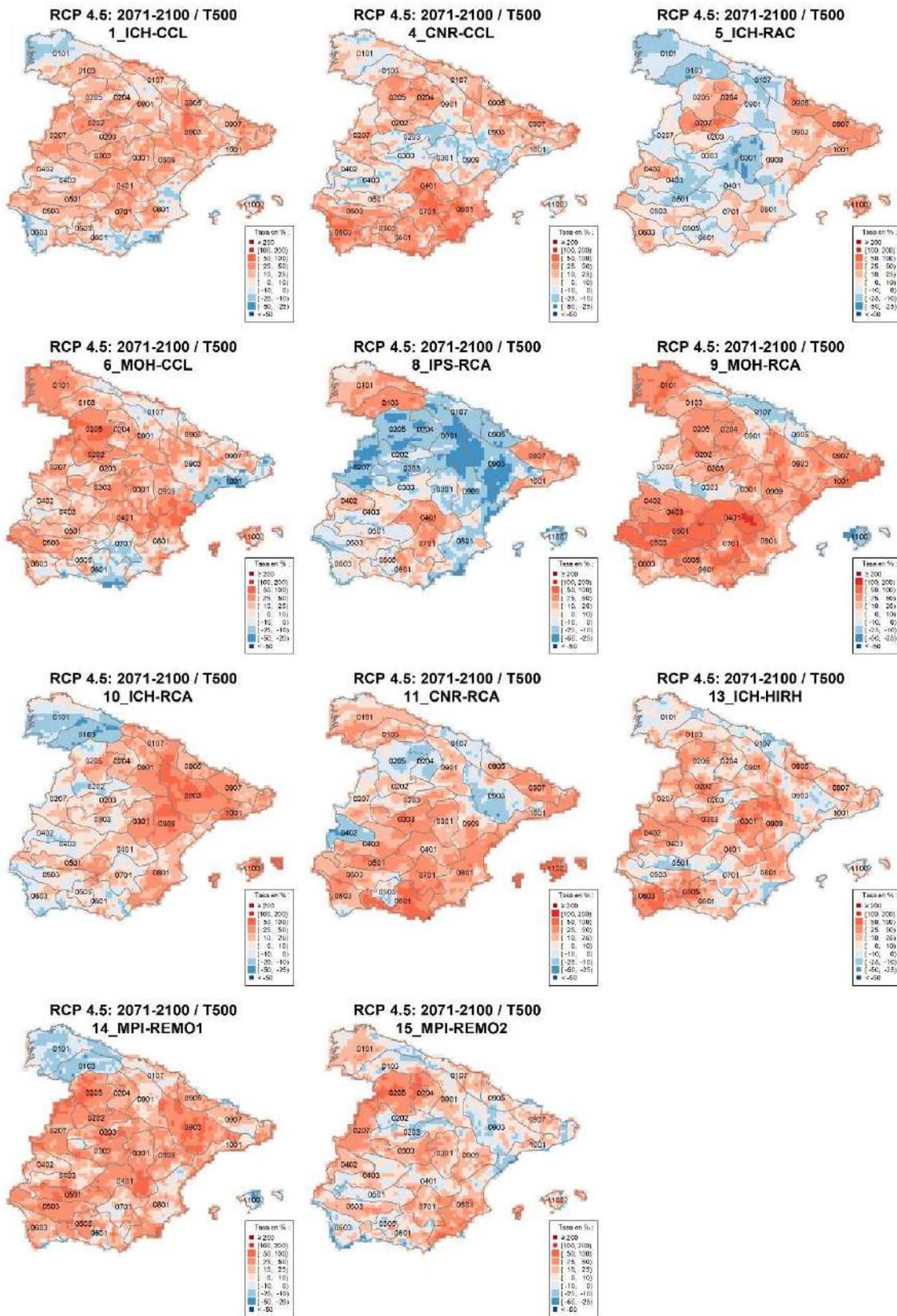


Figura A5.9. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

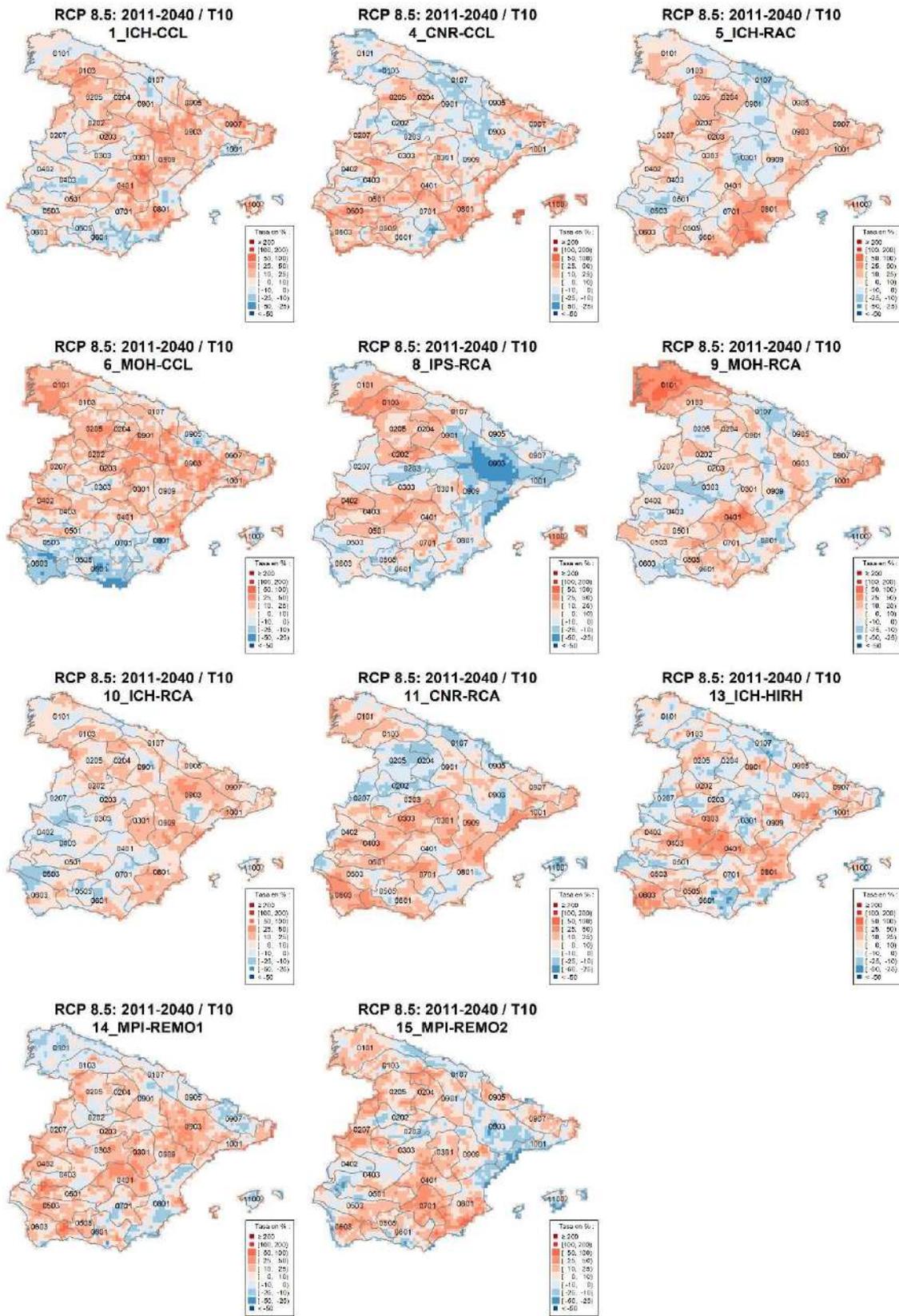


Figura A5.10. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

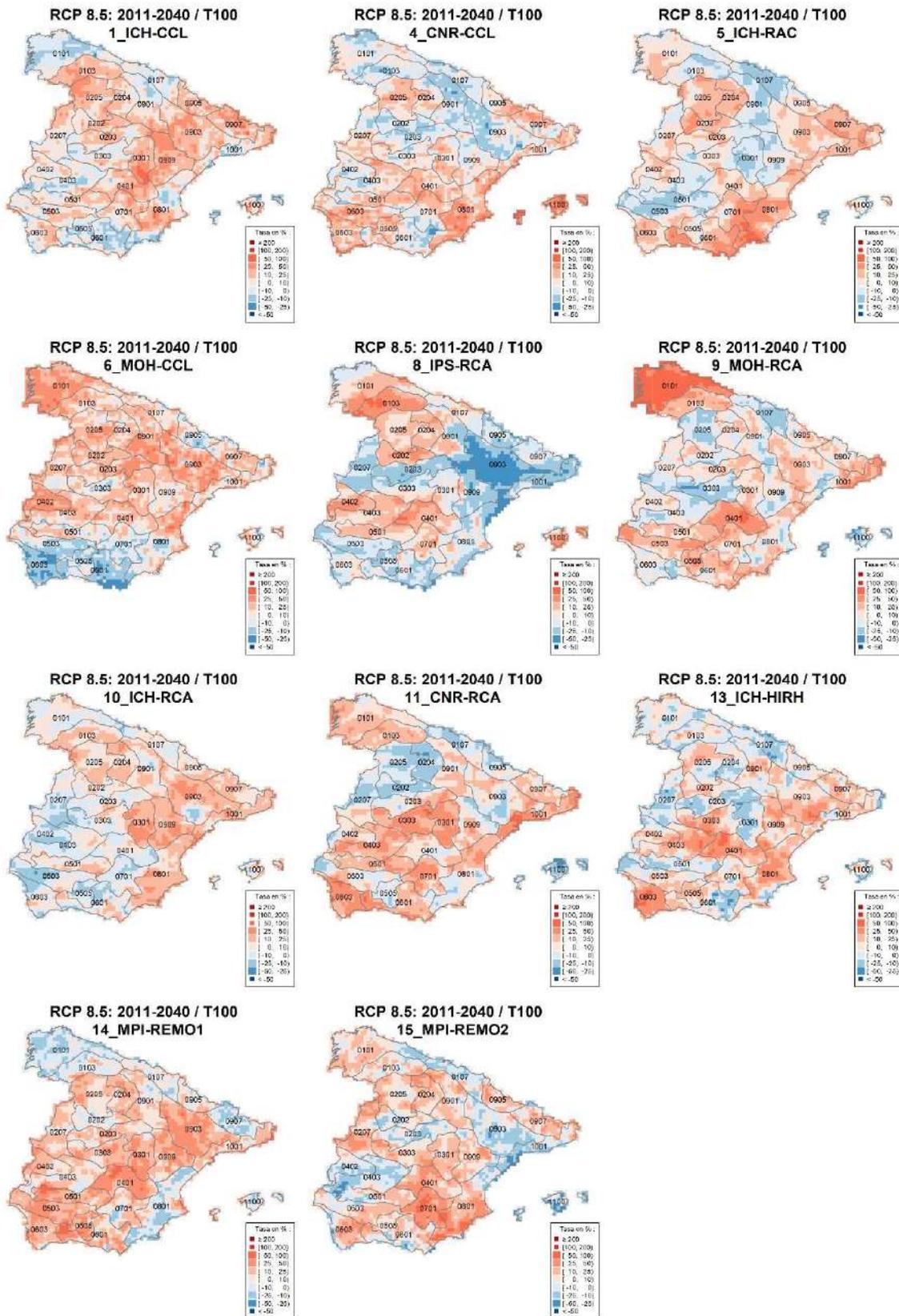


Figura A5.11. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, período de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

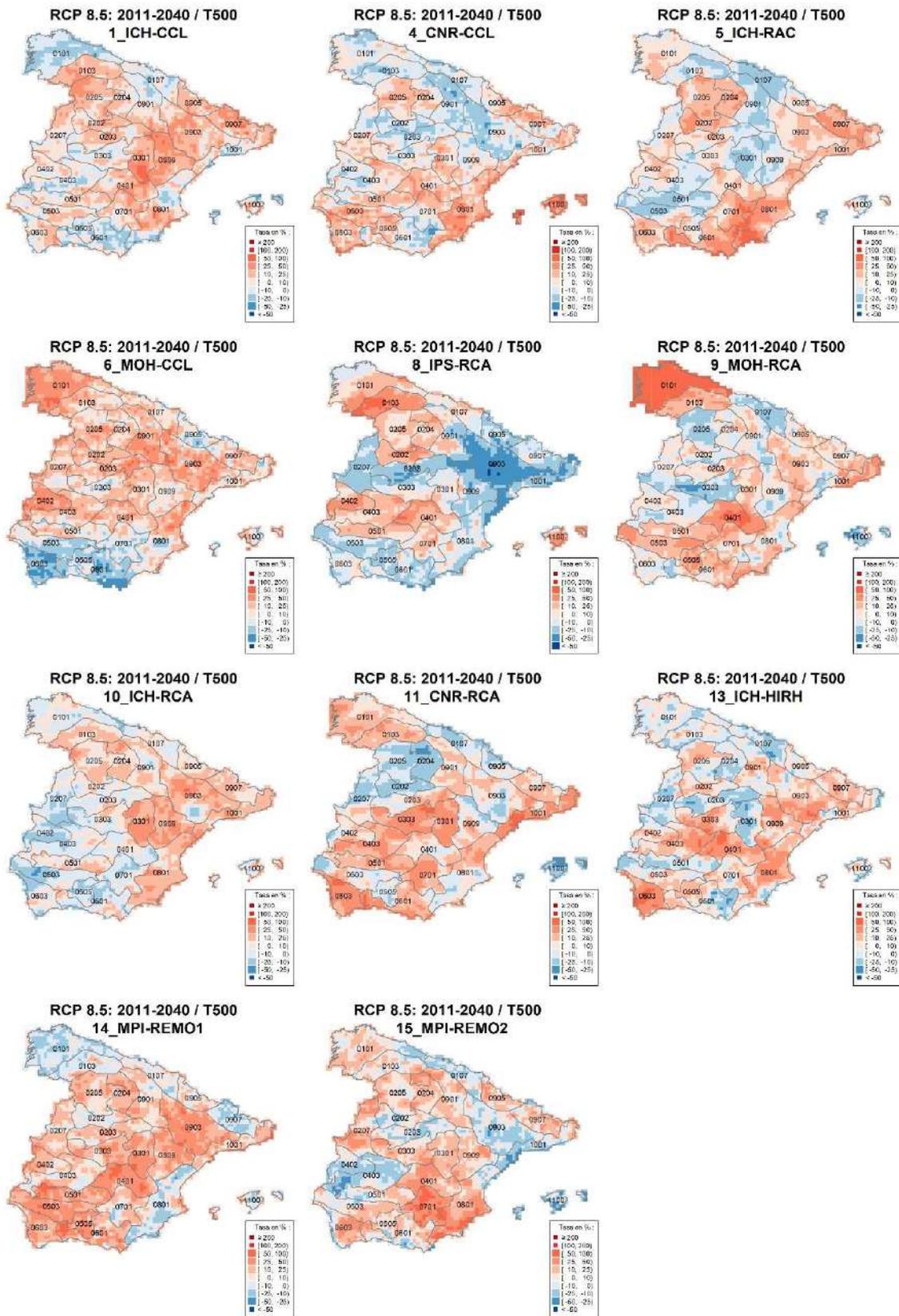


Figura A5.12. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

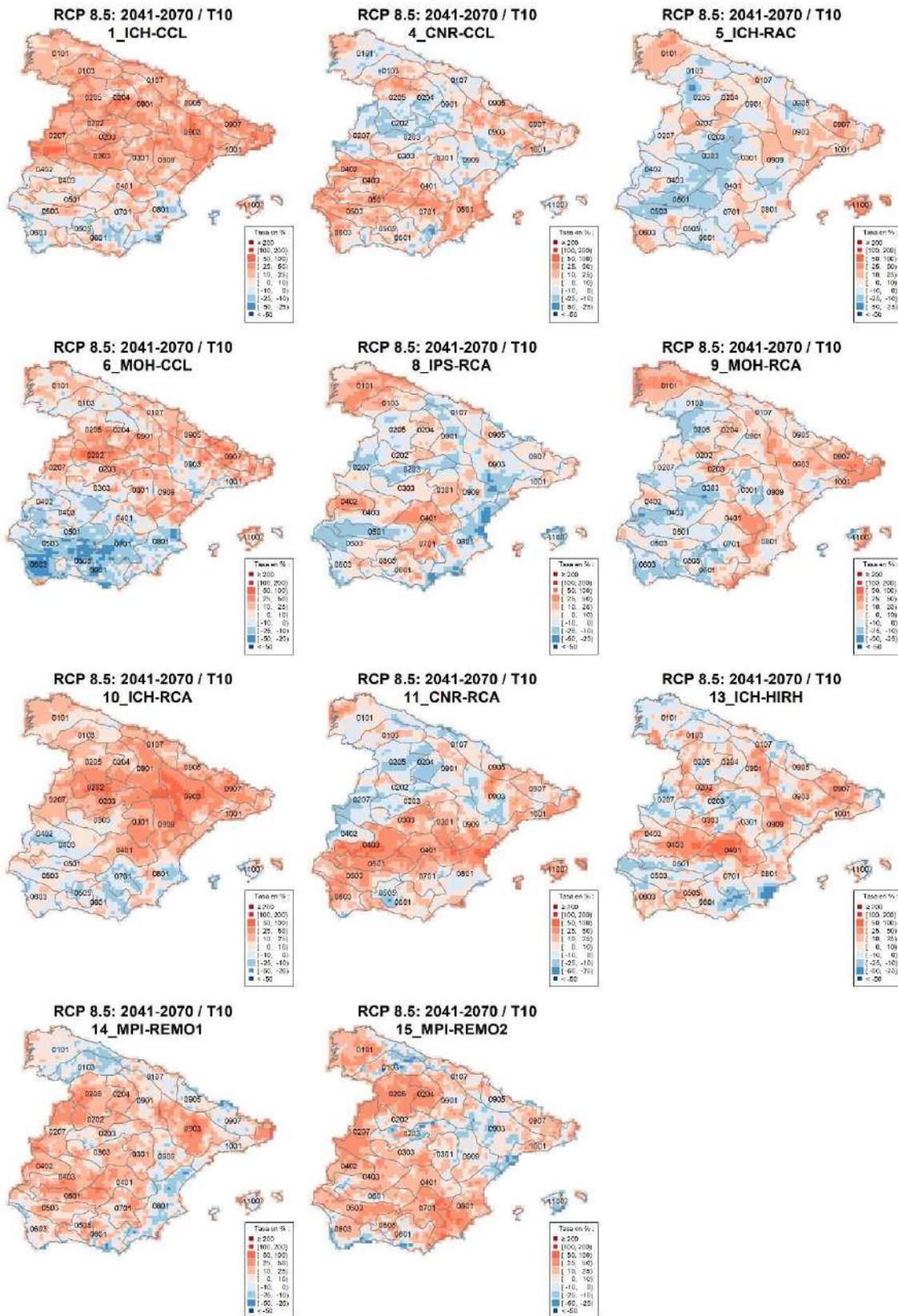


Figura A5.13. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

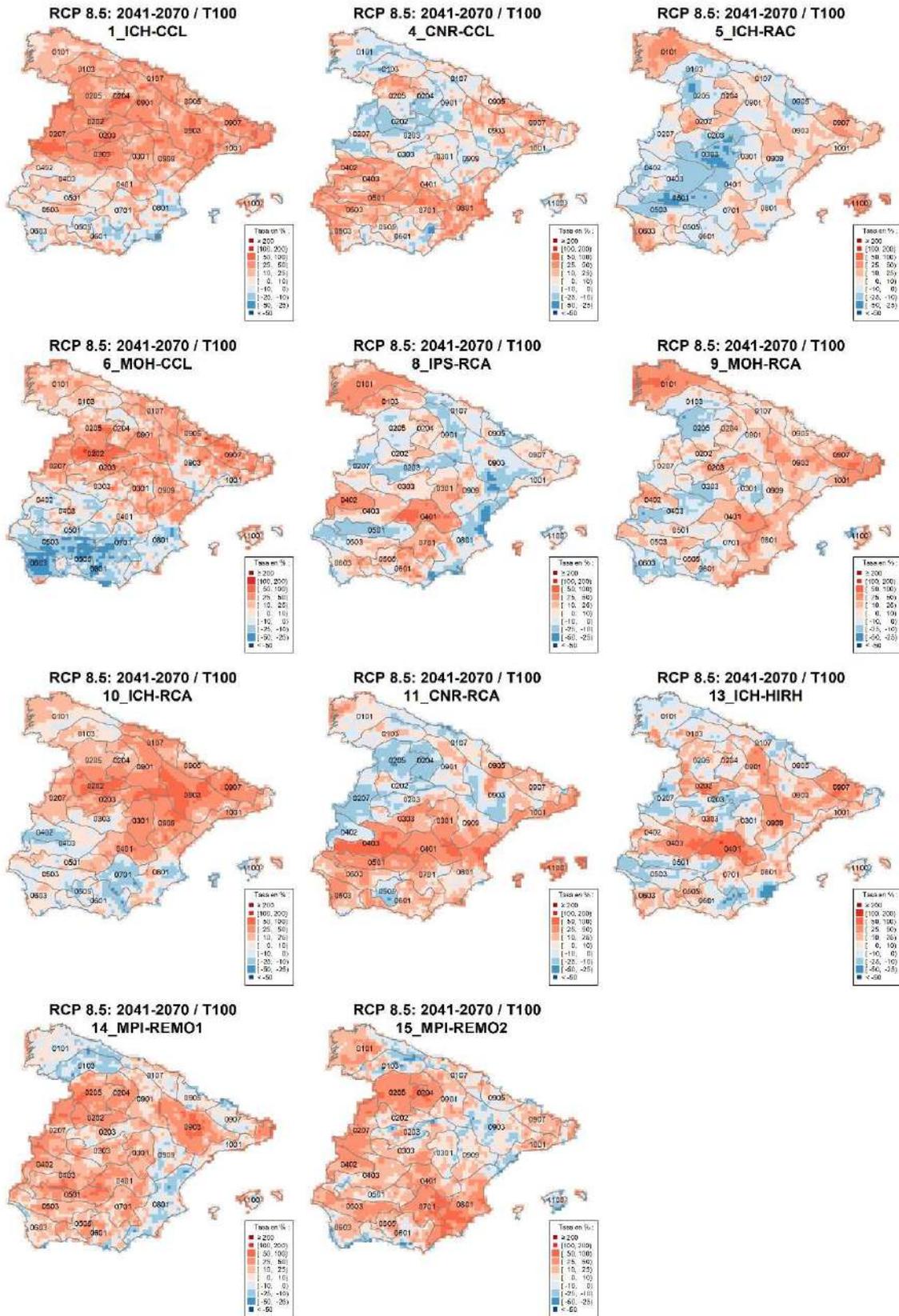


Figura A5.14. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

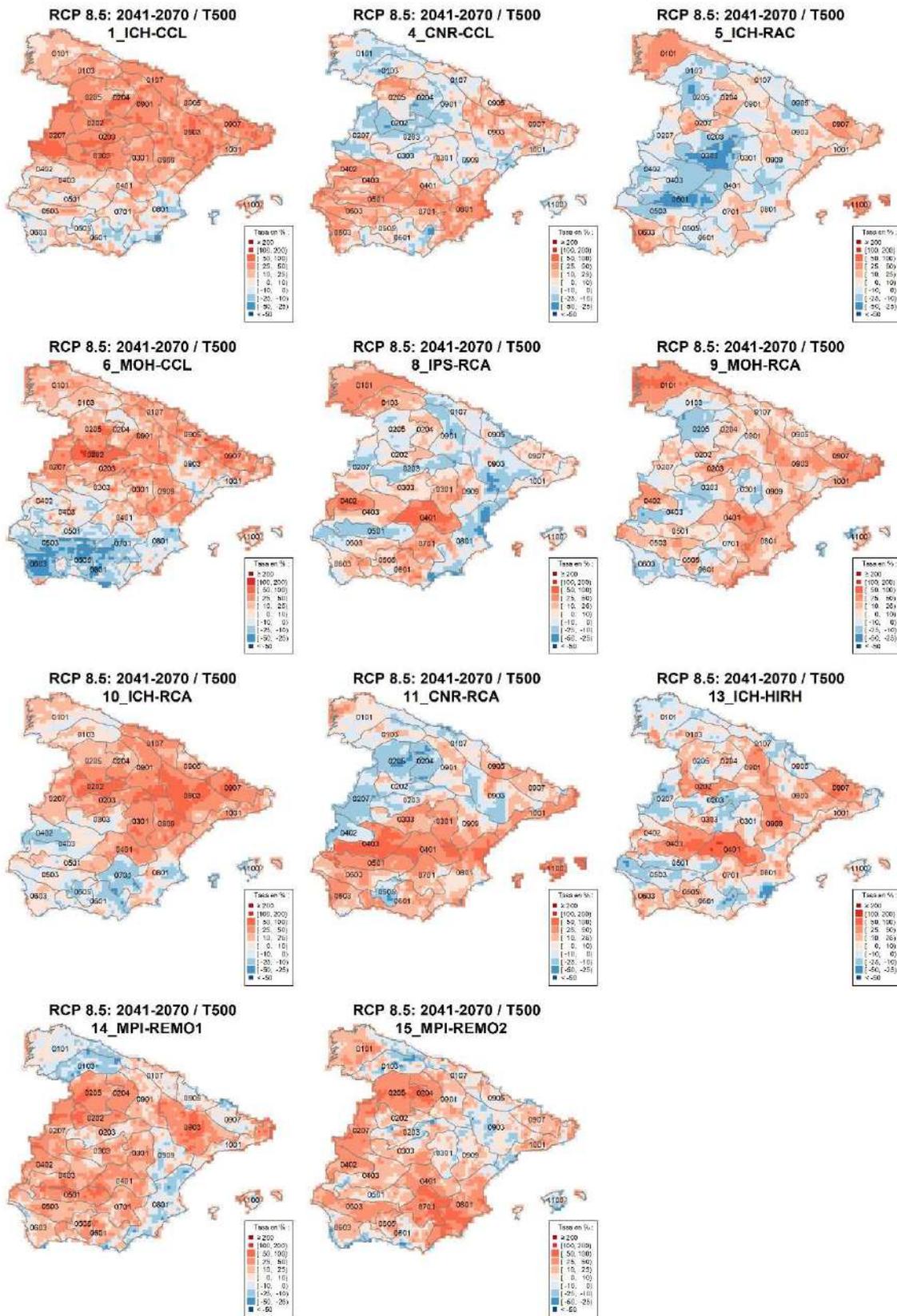


Figura A5.15. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

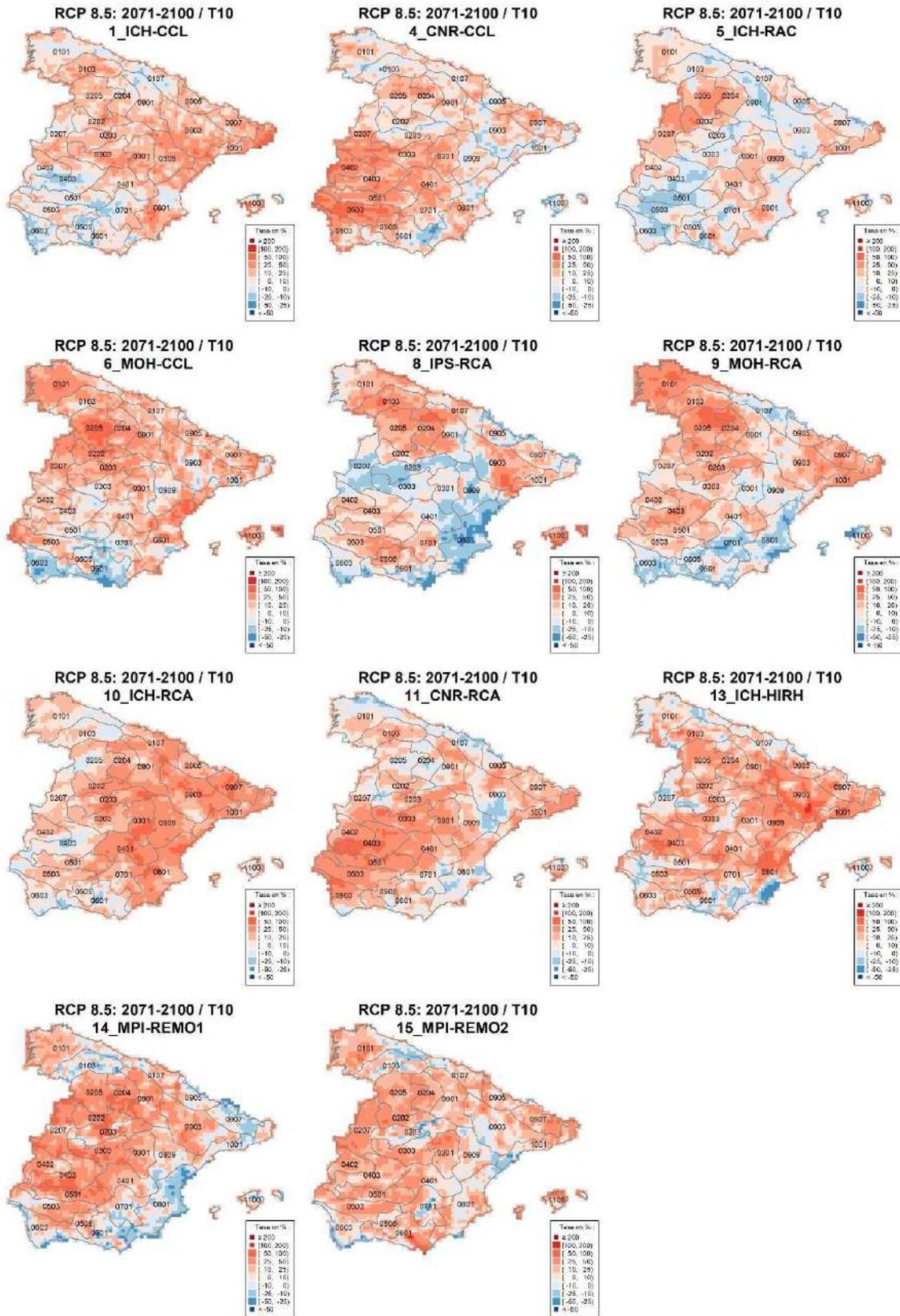


Figura A5.16. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

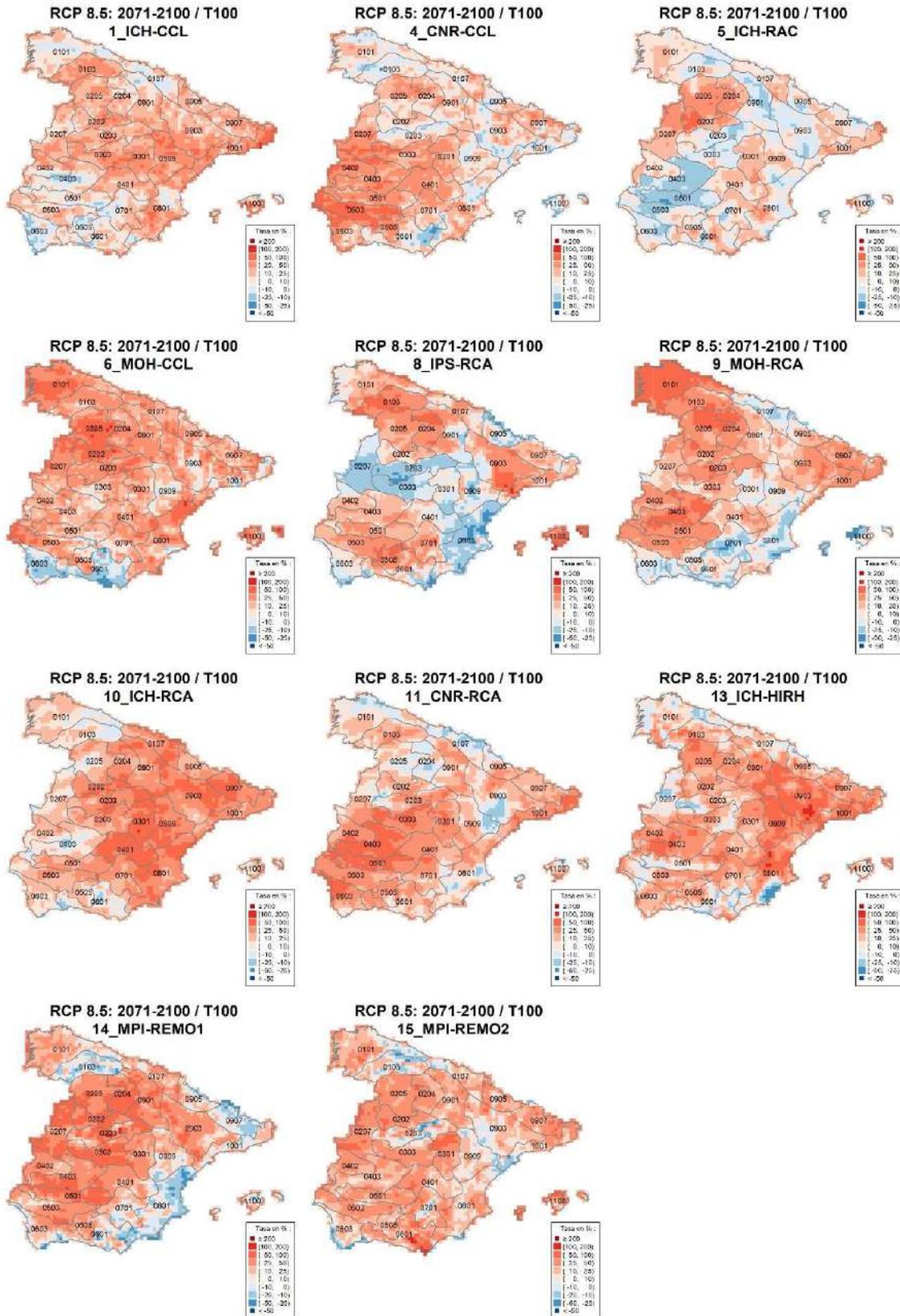


Figura A5.17. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

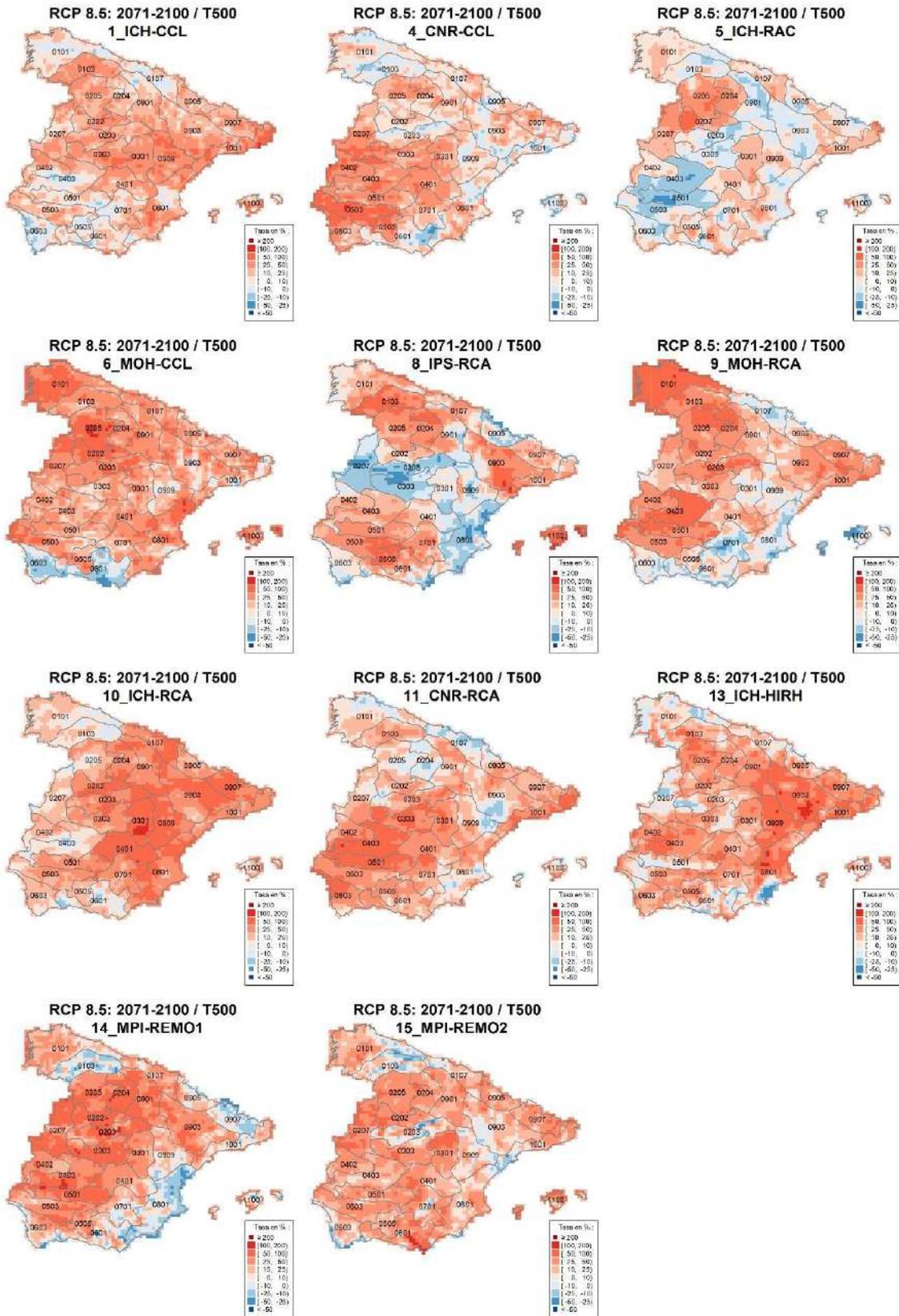


Figura A5.18. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

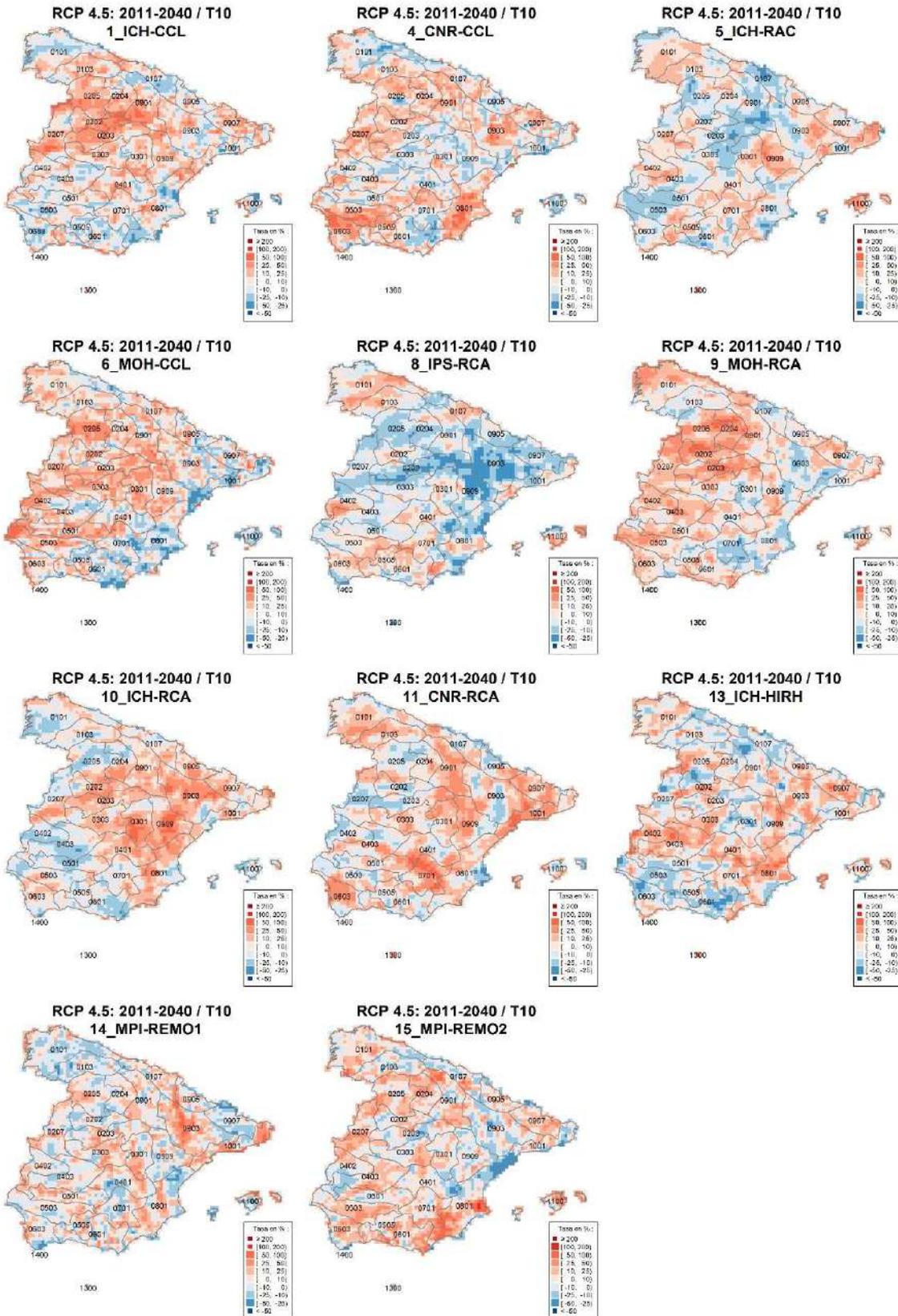


Figura A5.19. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 10$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

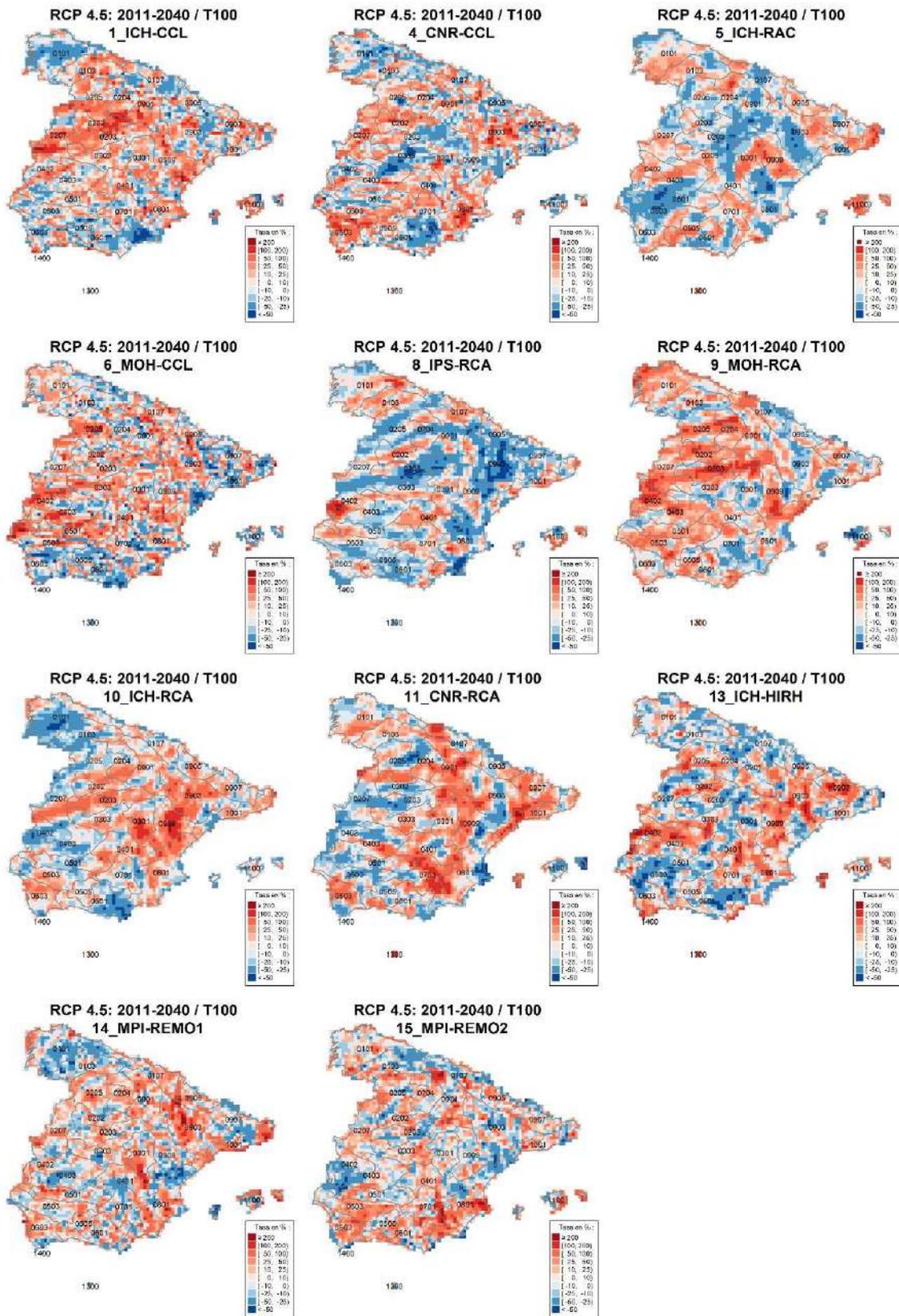


Figura A5.20. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 100$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

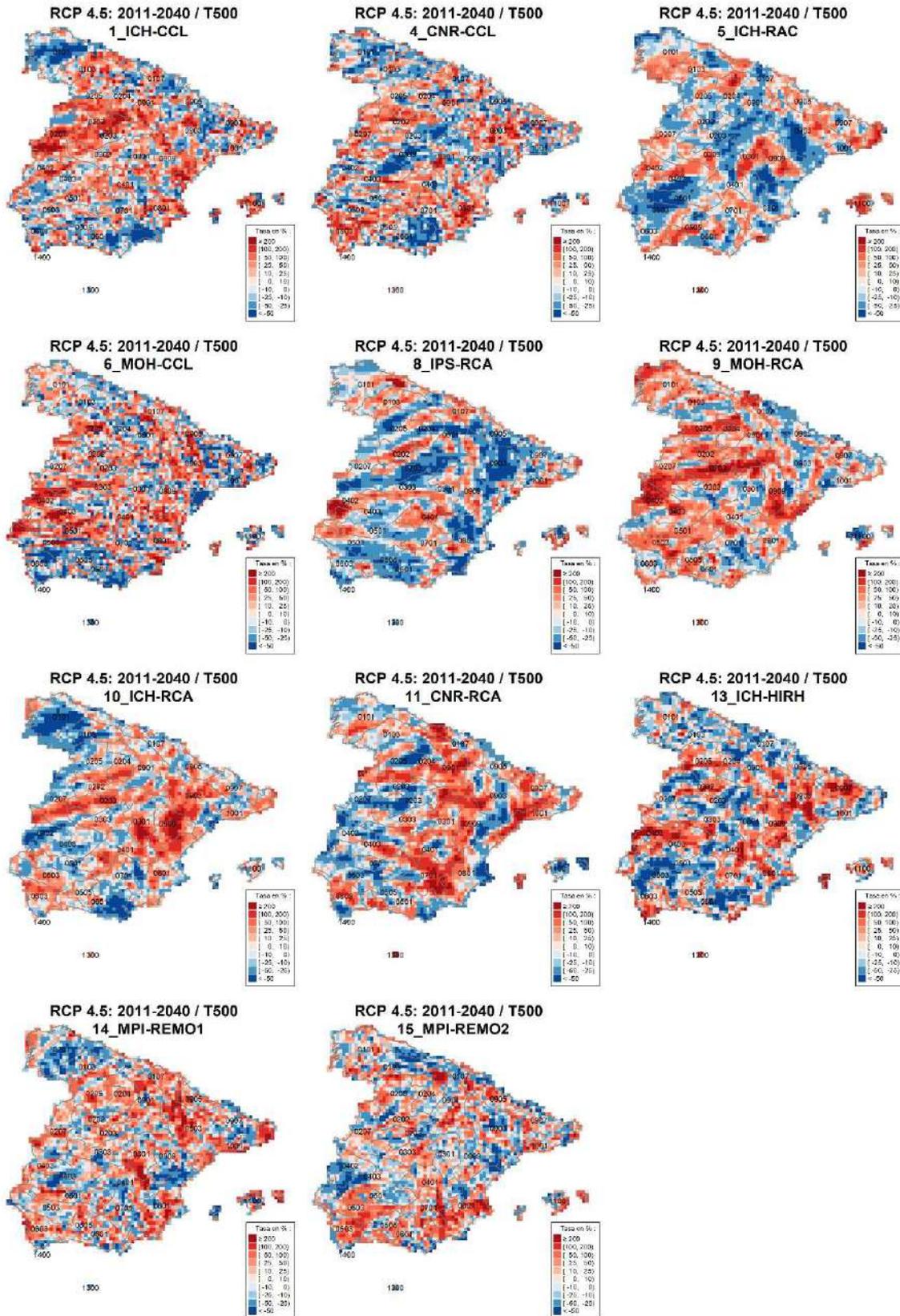


Figura A5.21. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 500$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

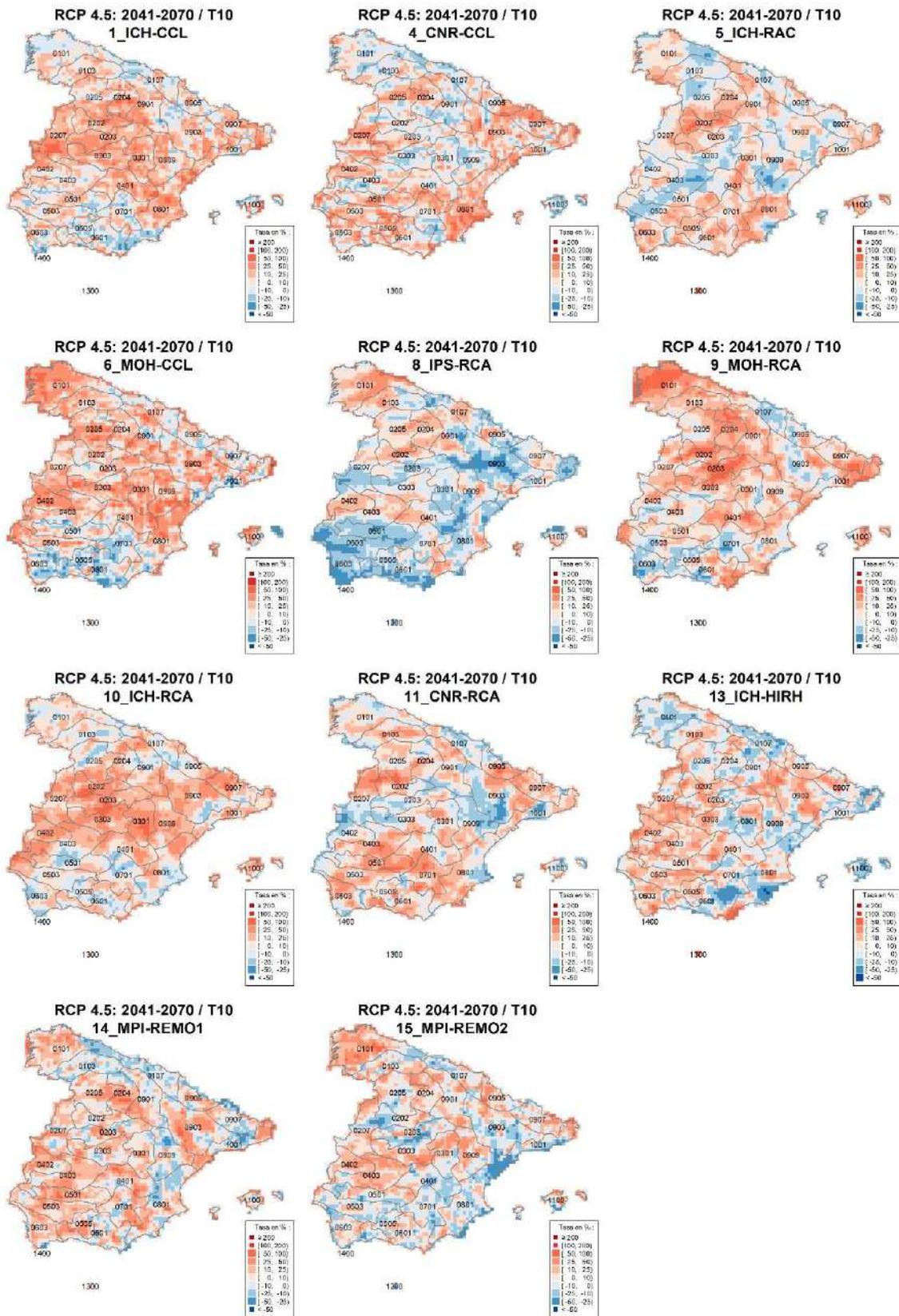


Figura A5.22. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 10$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

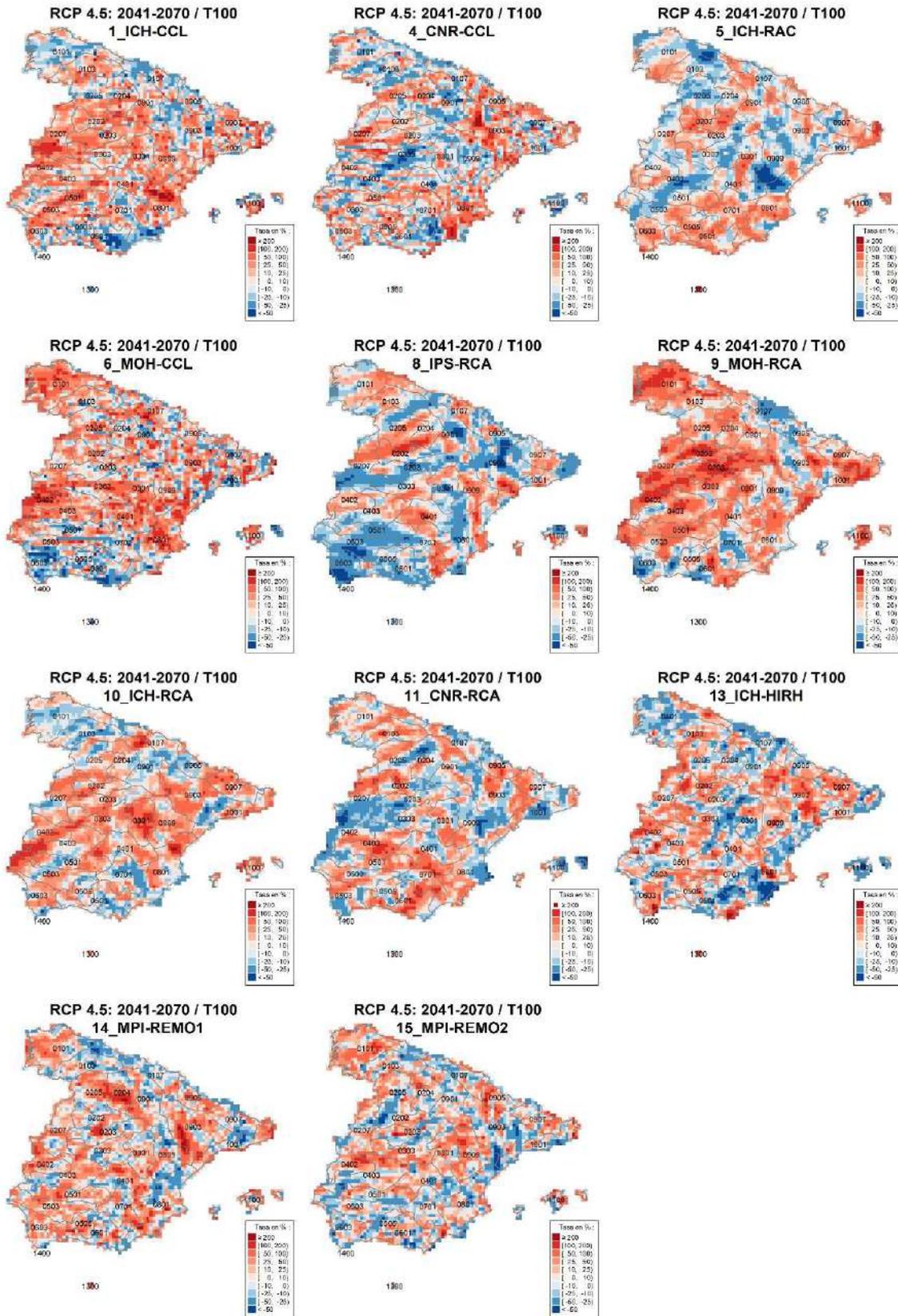


Figura A5.23. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 100$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

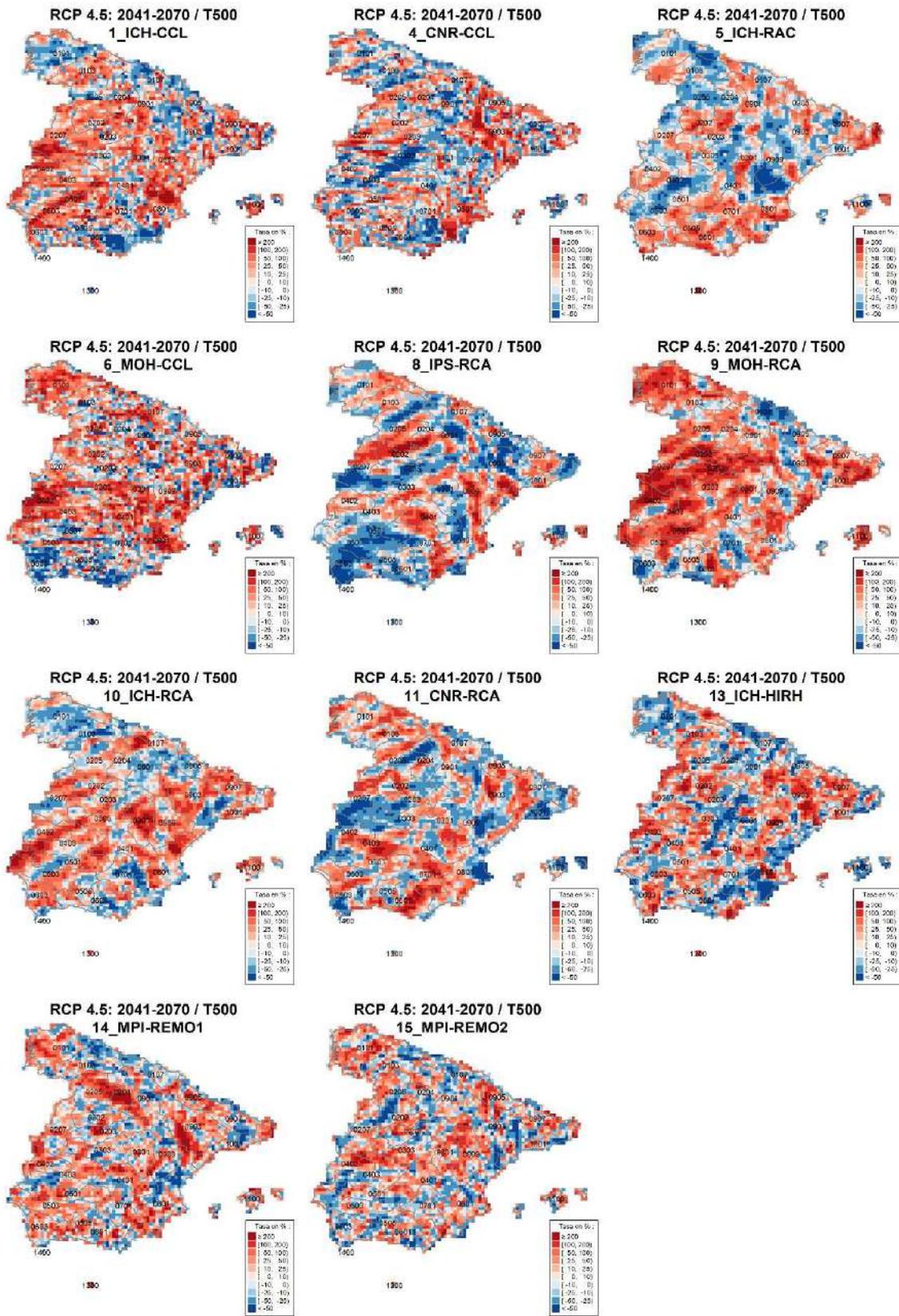


Figura A5.24. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 500$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

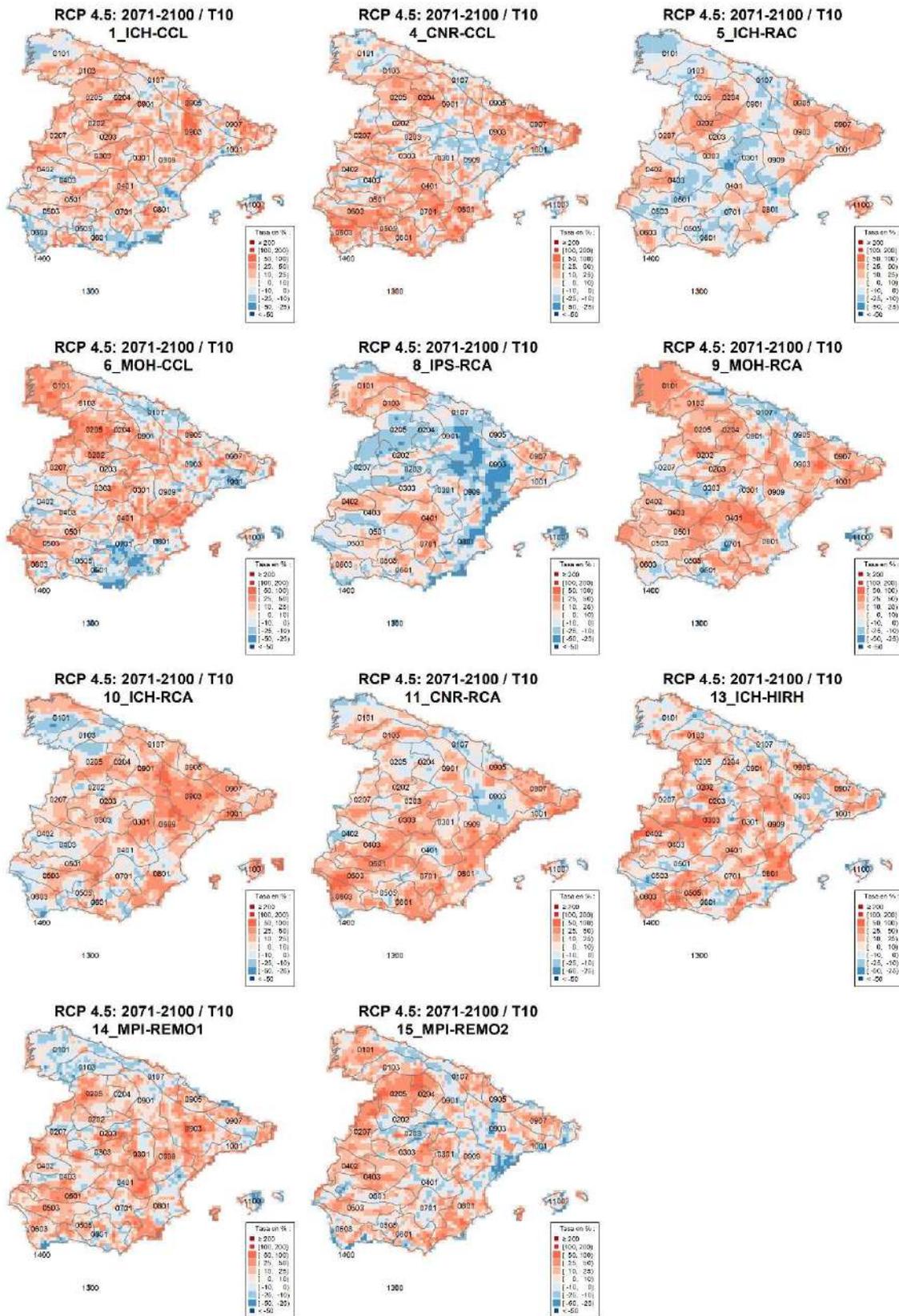


Figura A5.25. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 10$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

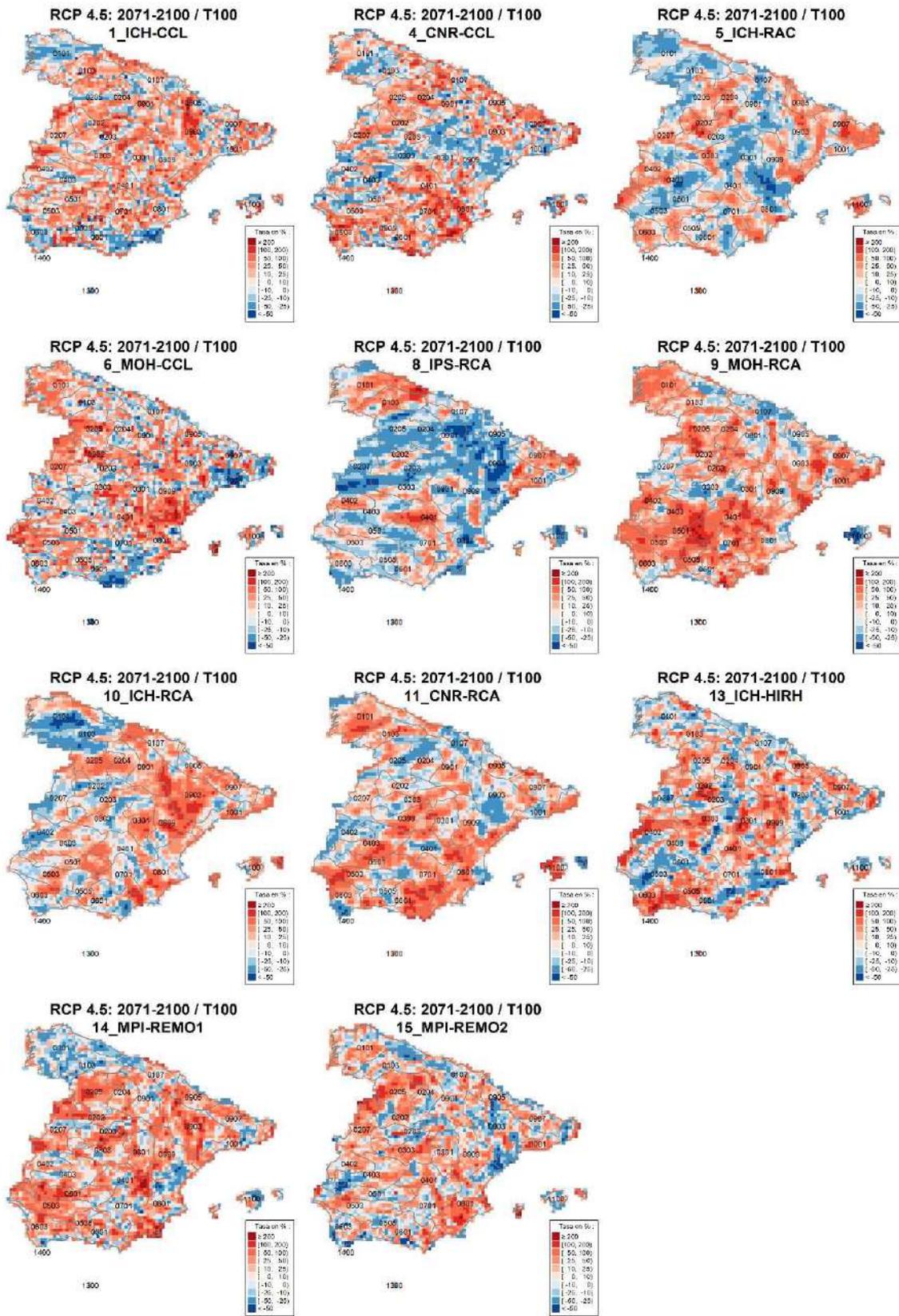


Figura A5.26. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 100$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

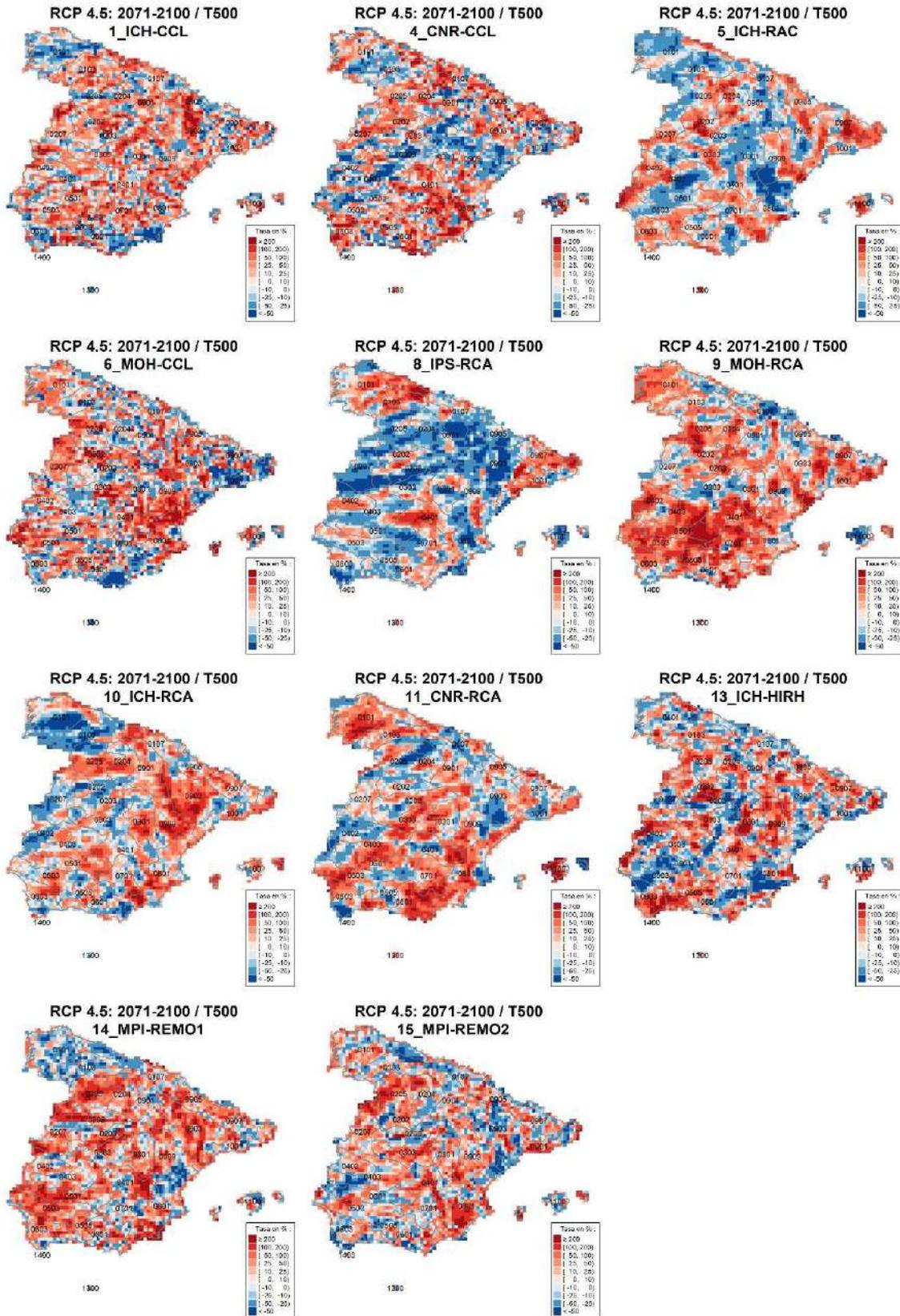


Figura A5.27. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 500$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

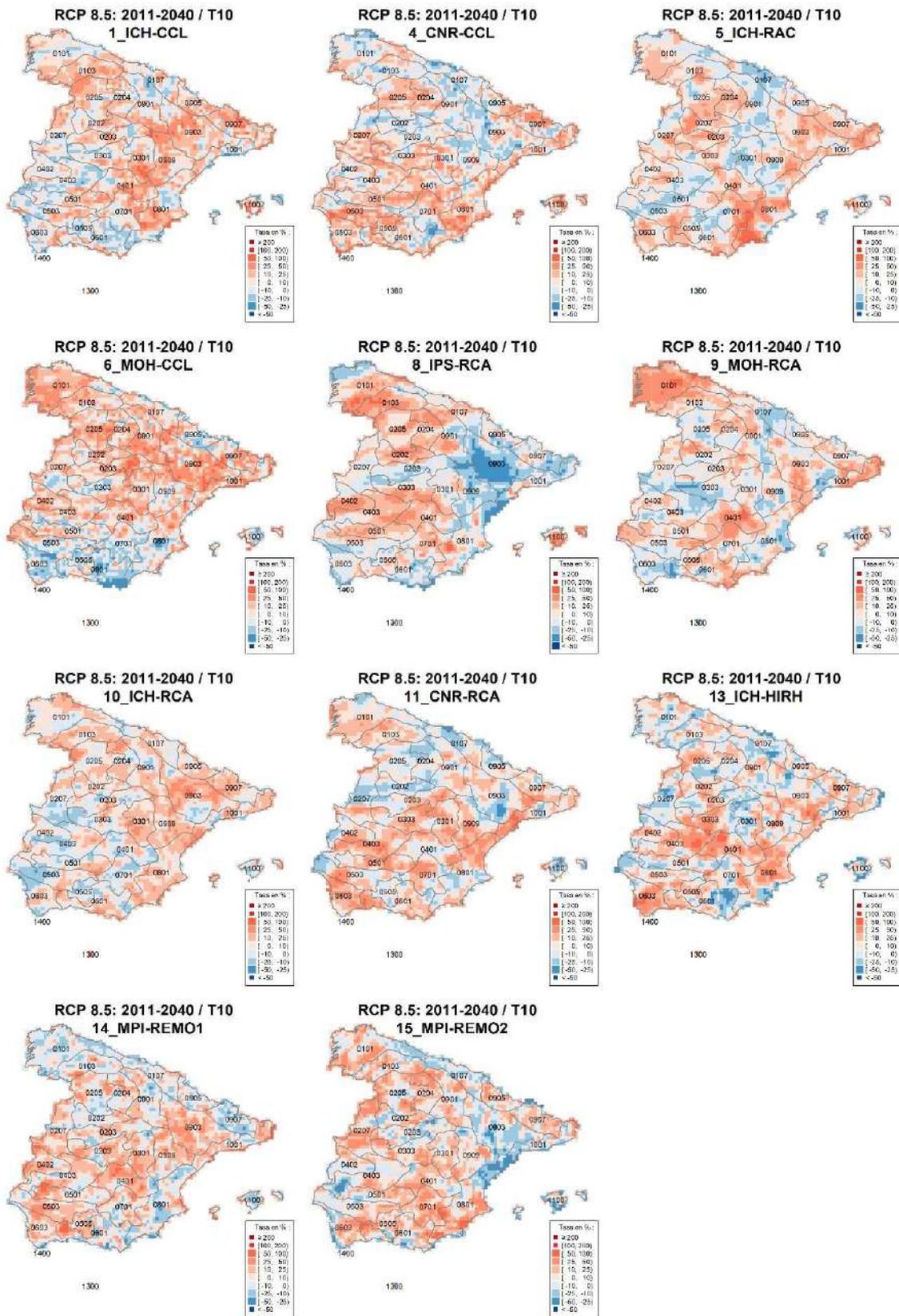


Figura A5.28. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 10$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

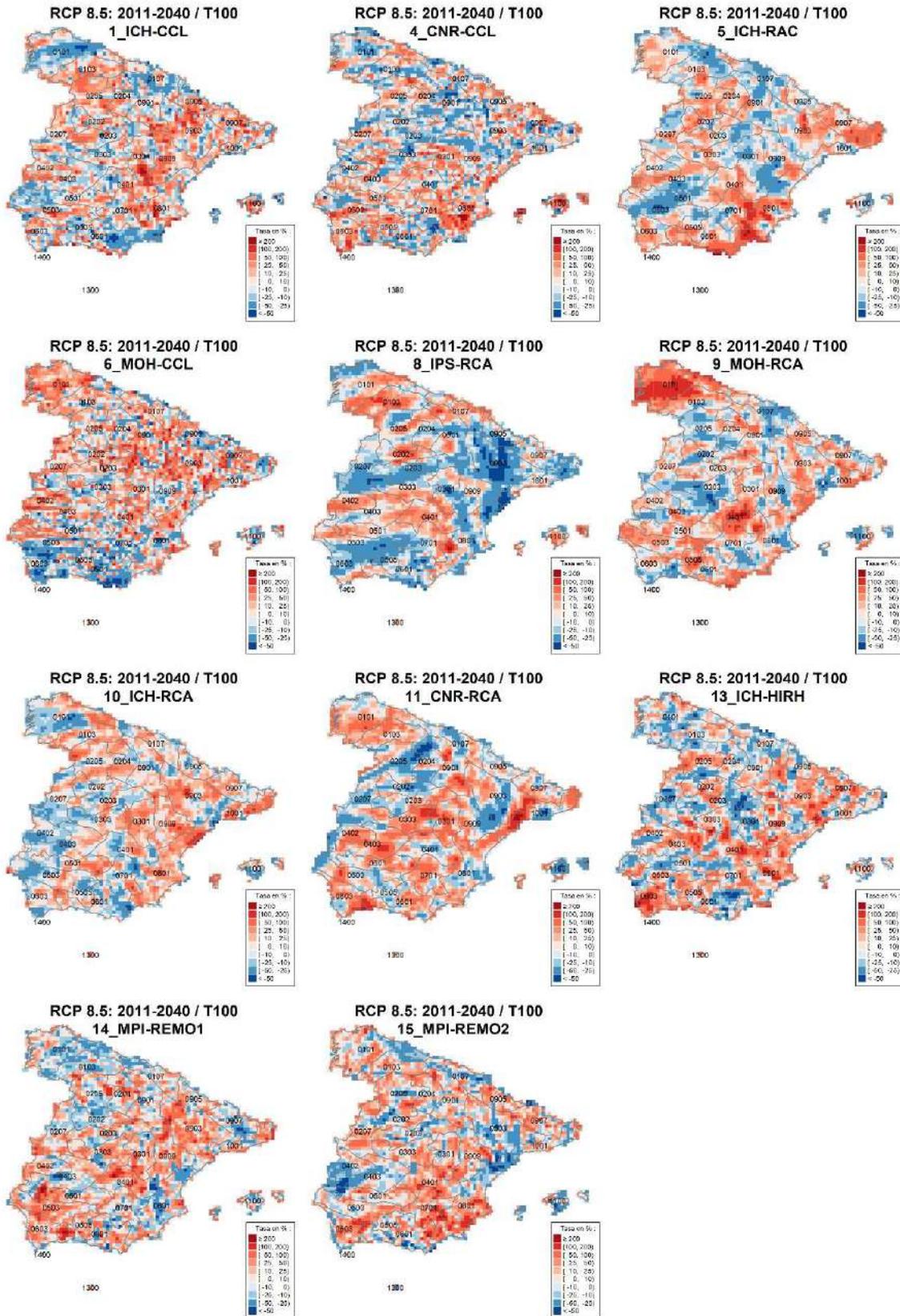


Figura A5.29. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 100$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

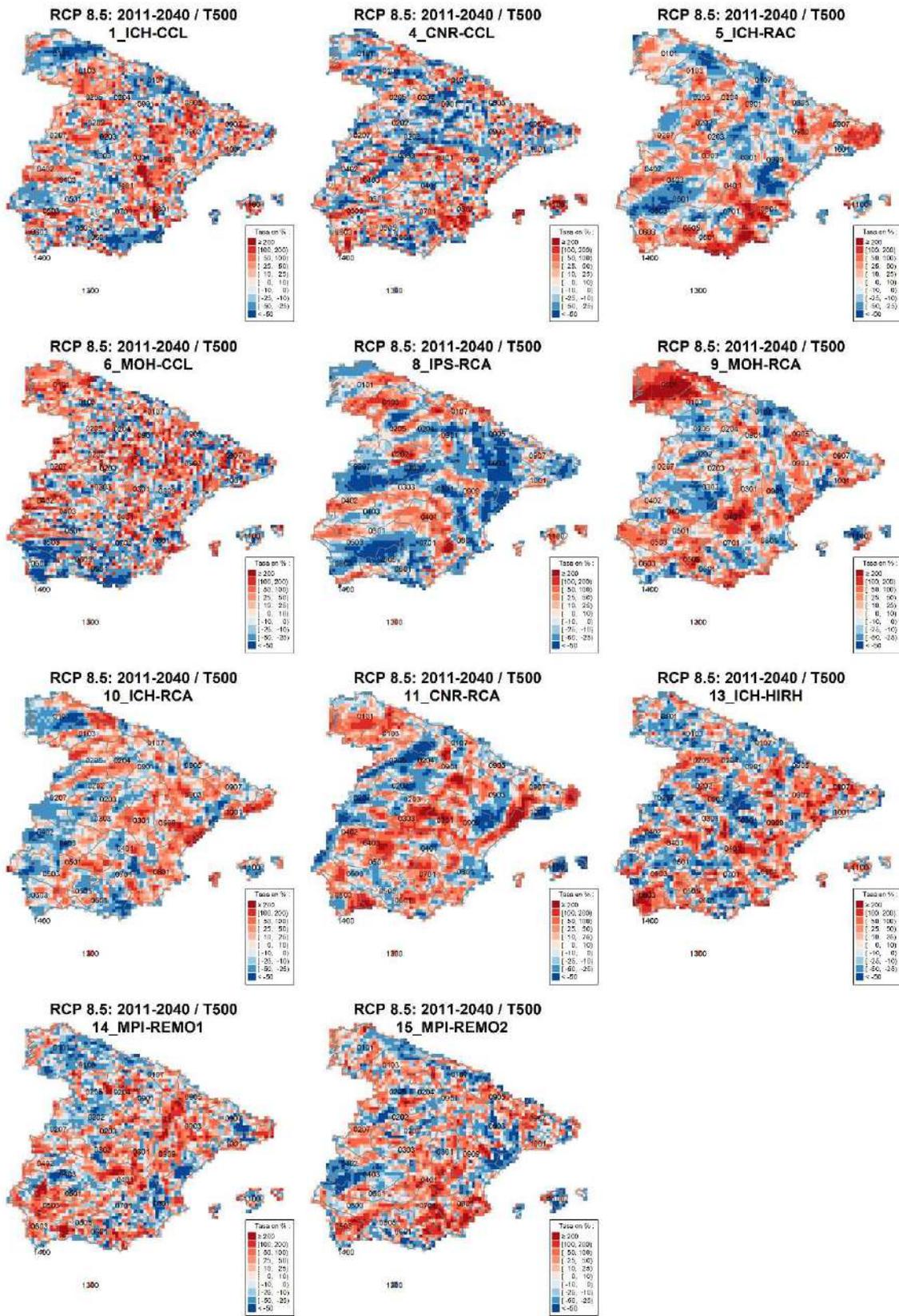


Figura A5.30. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 500$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

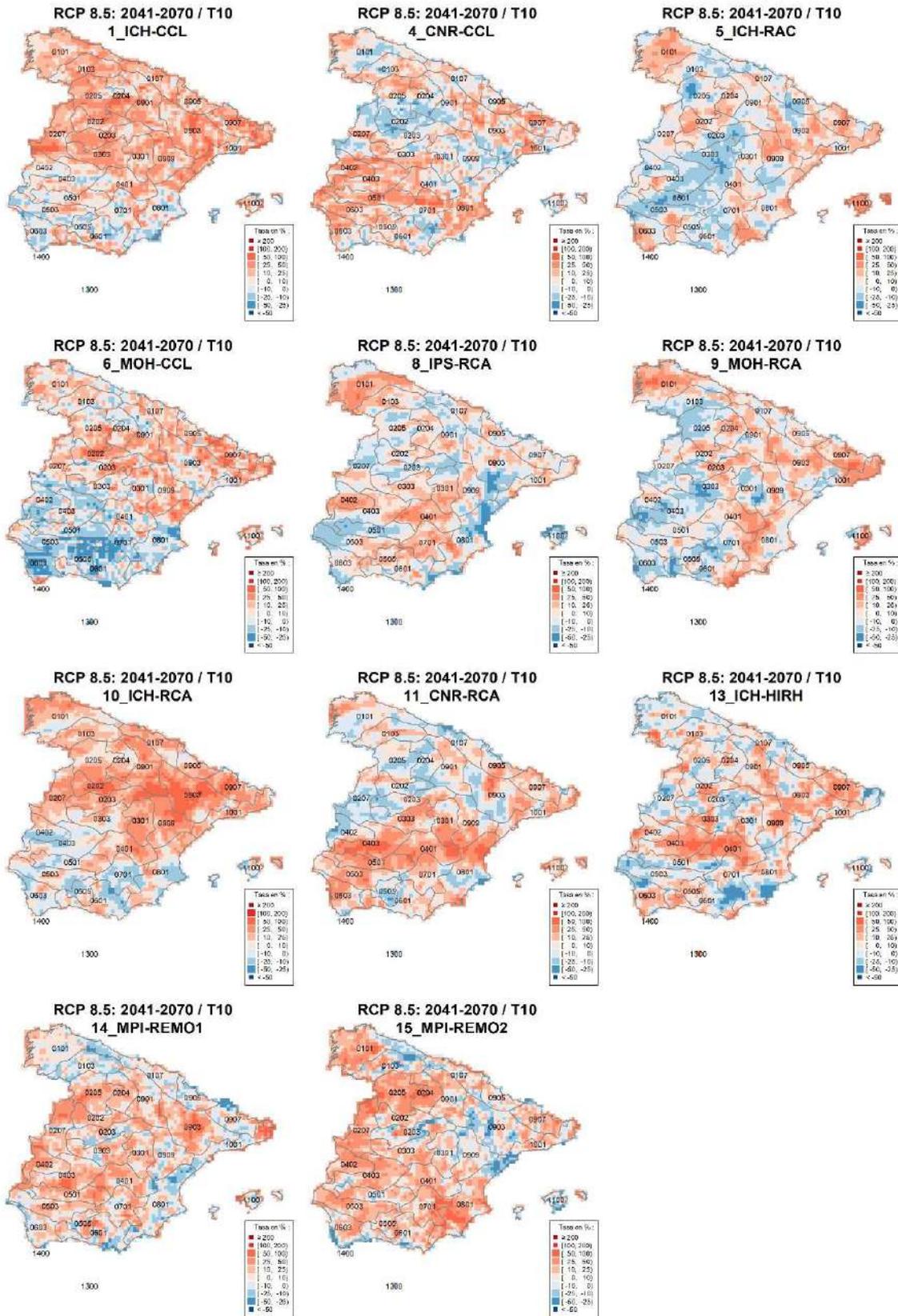


Figura A5.31. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 10$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

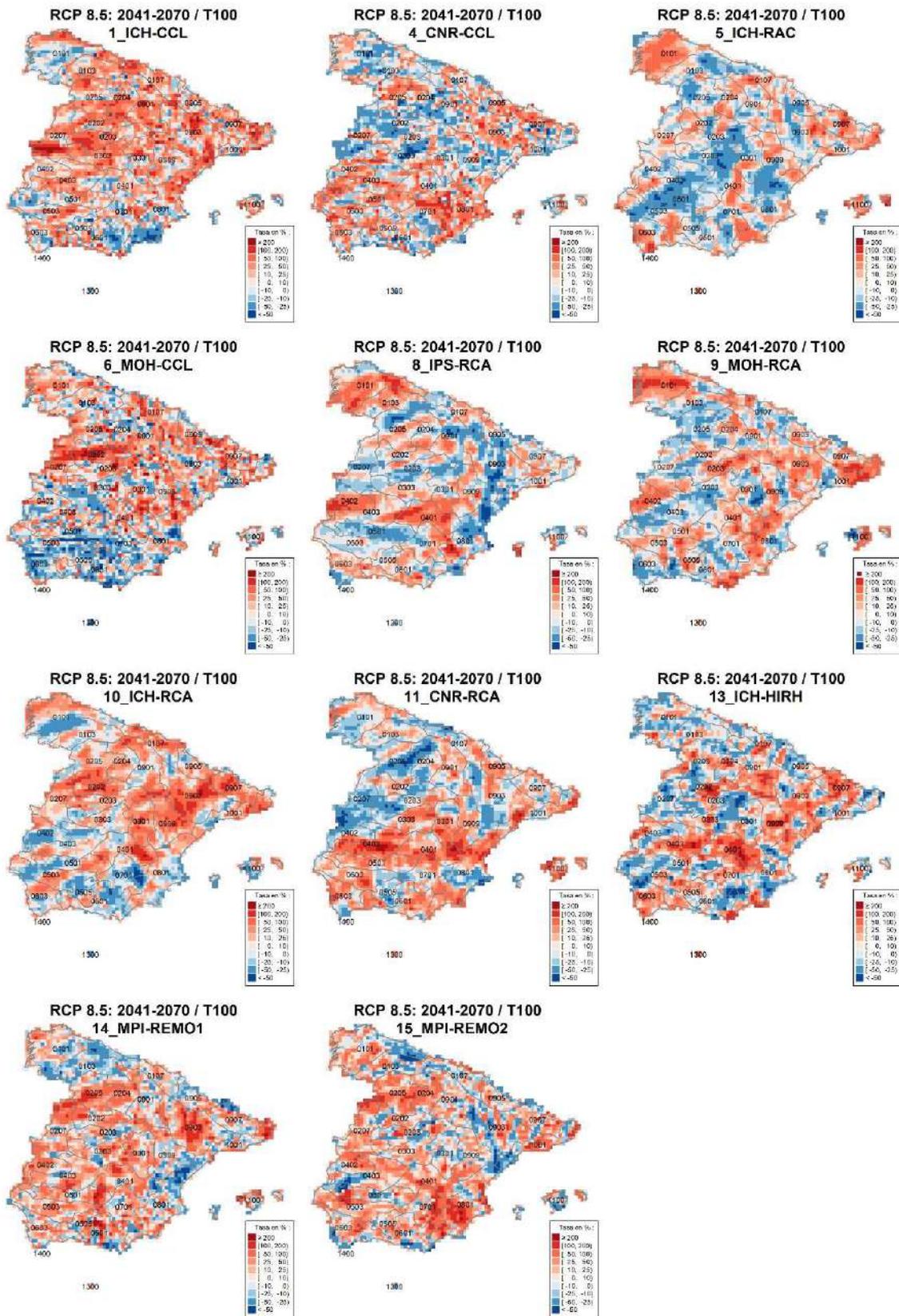


Figura A5.32. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 100$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

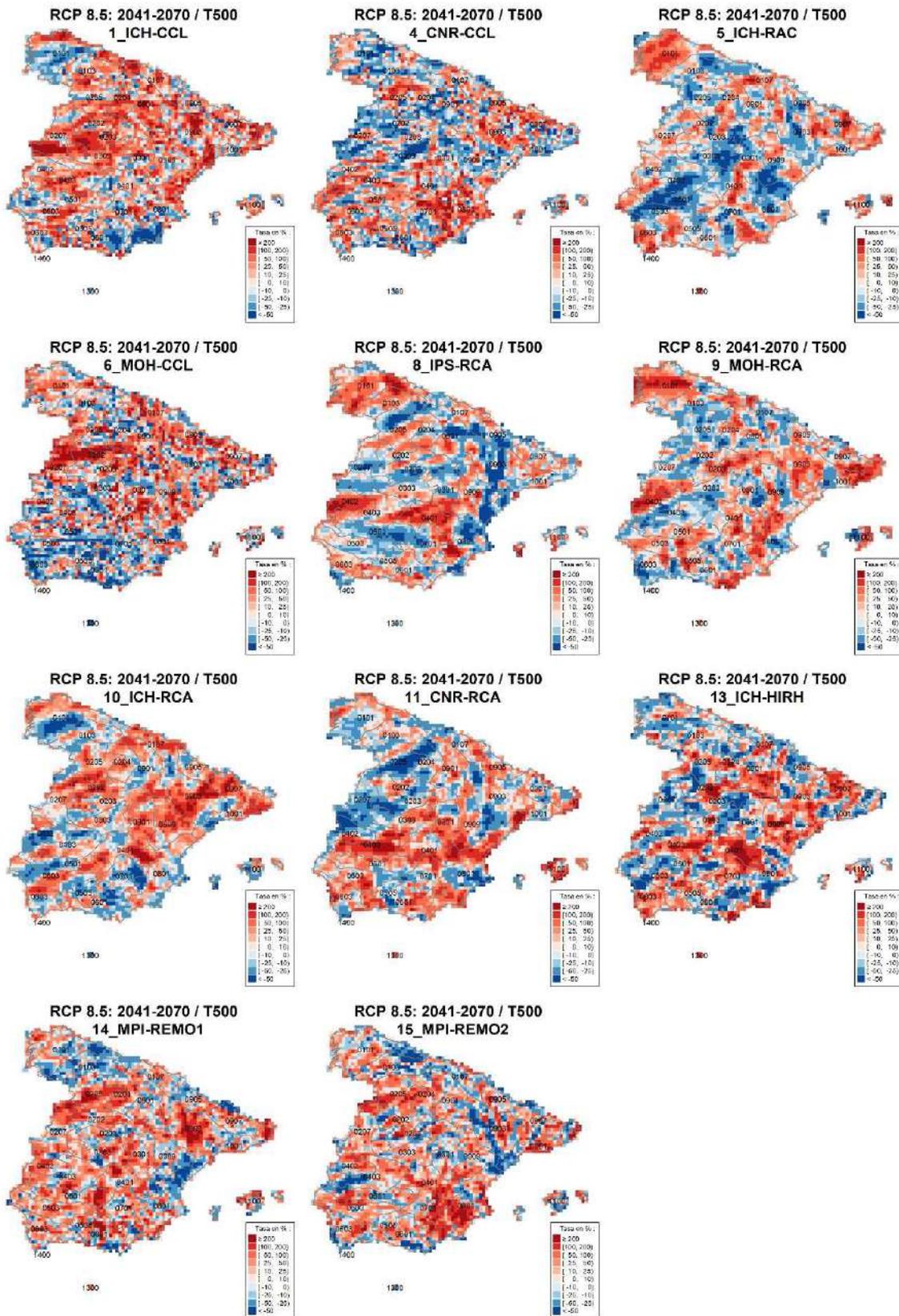


Figura A5.33. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 500$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

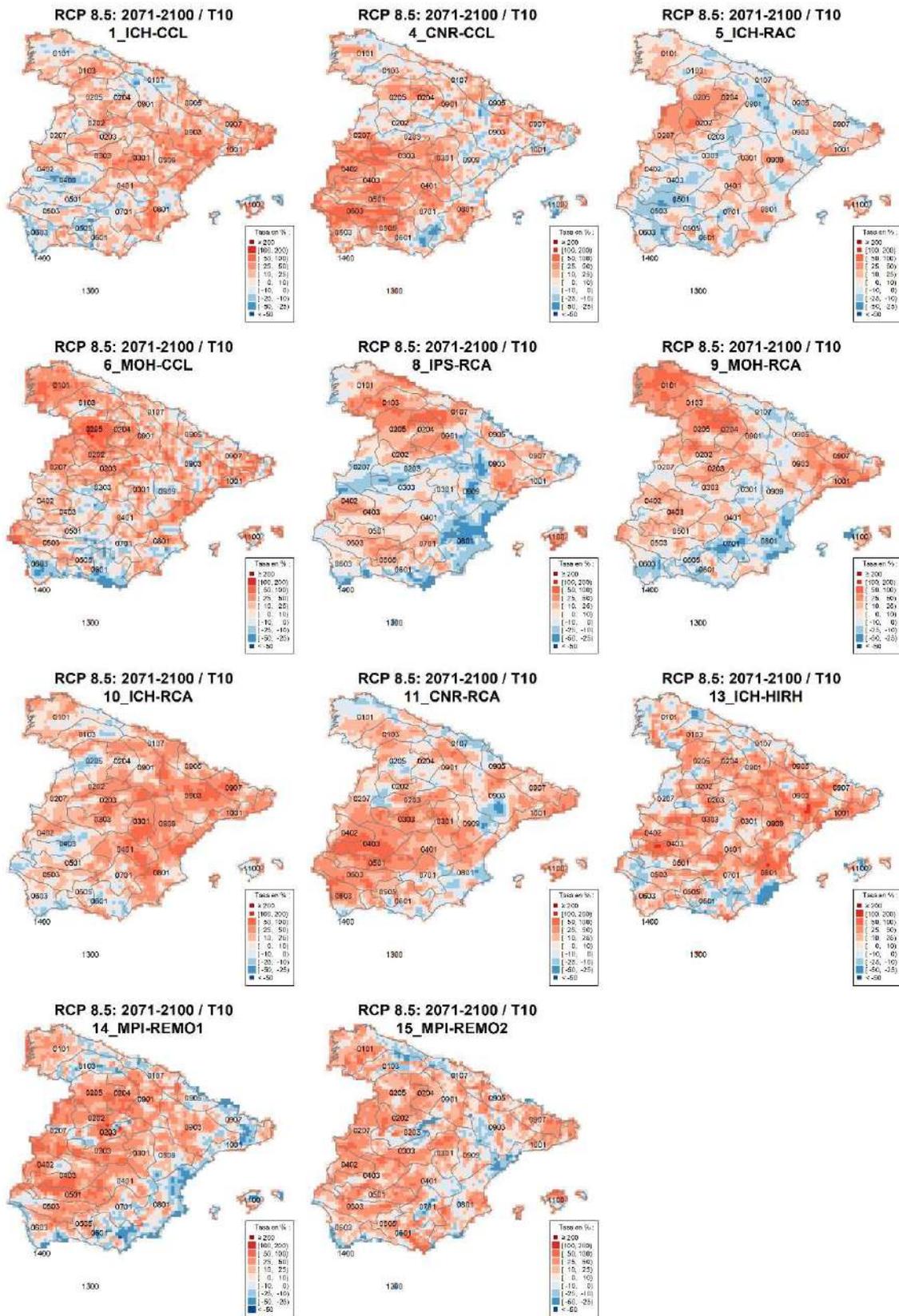


Figura A5.34. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 10$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

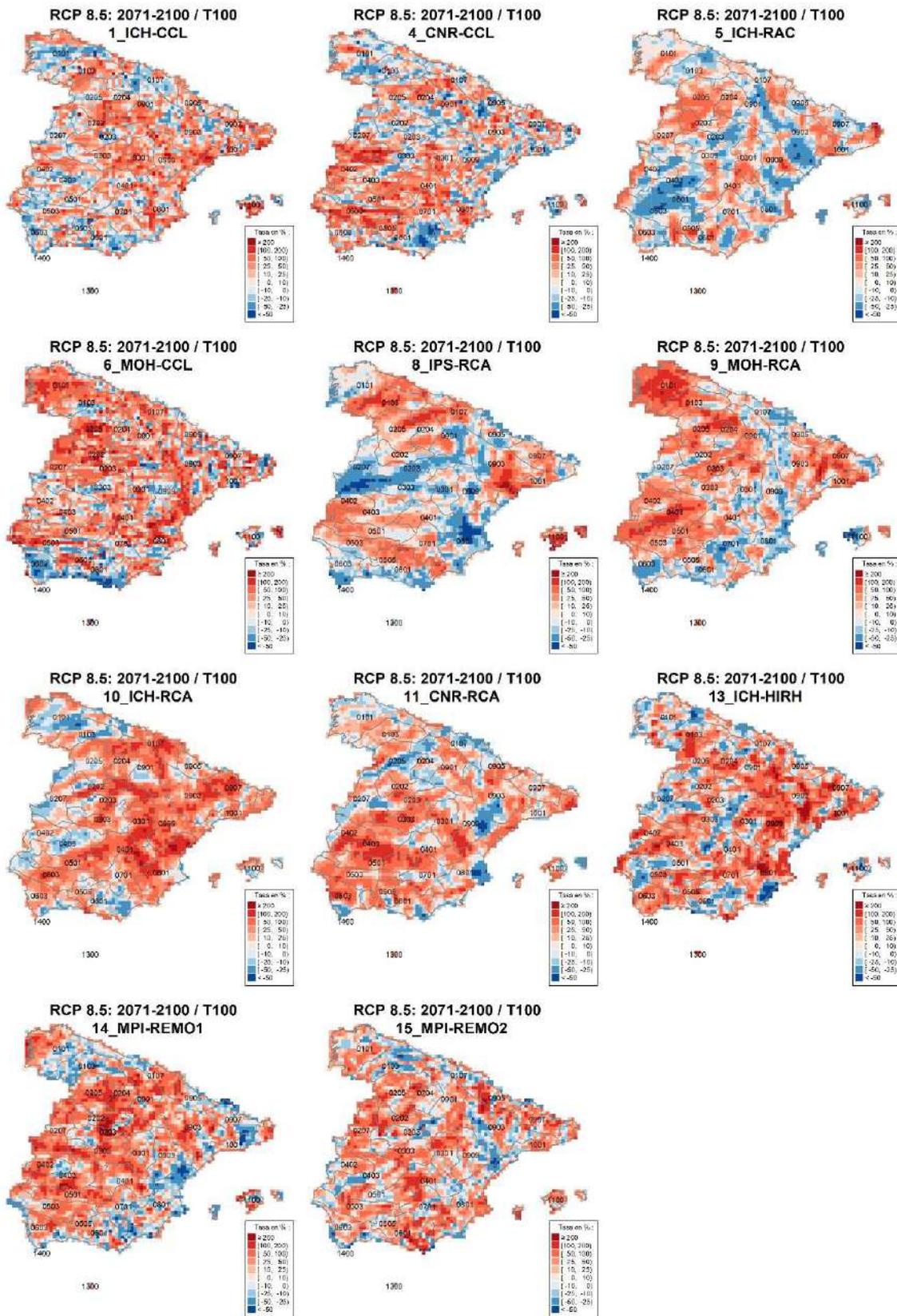


Figura A5.35. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 100$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.

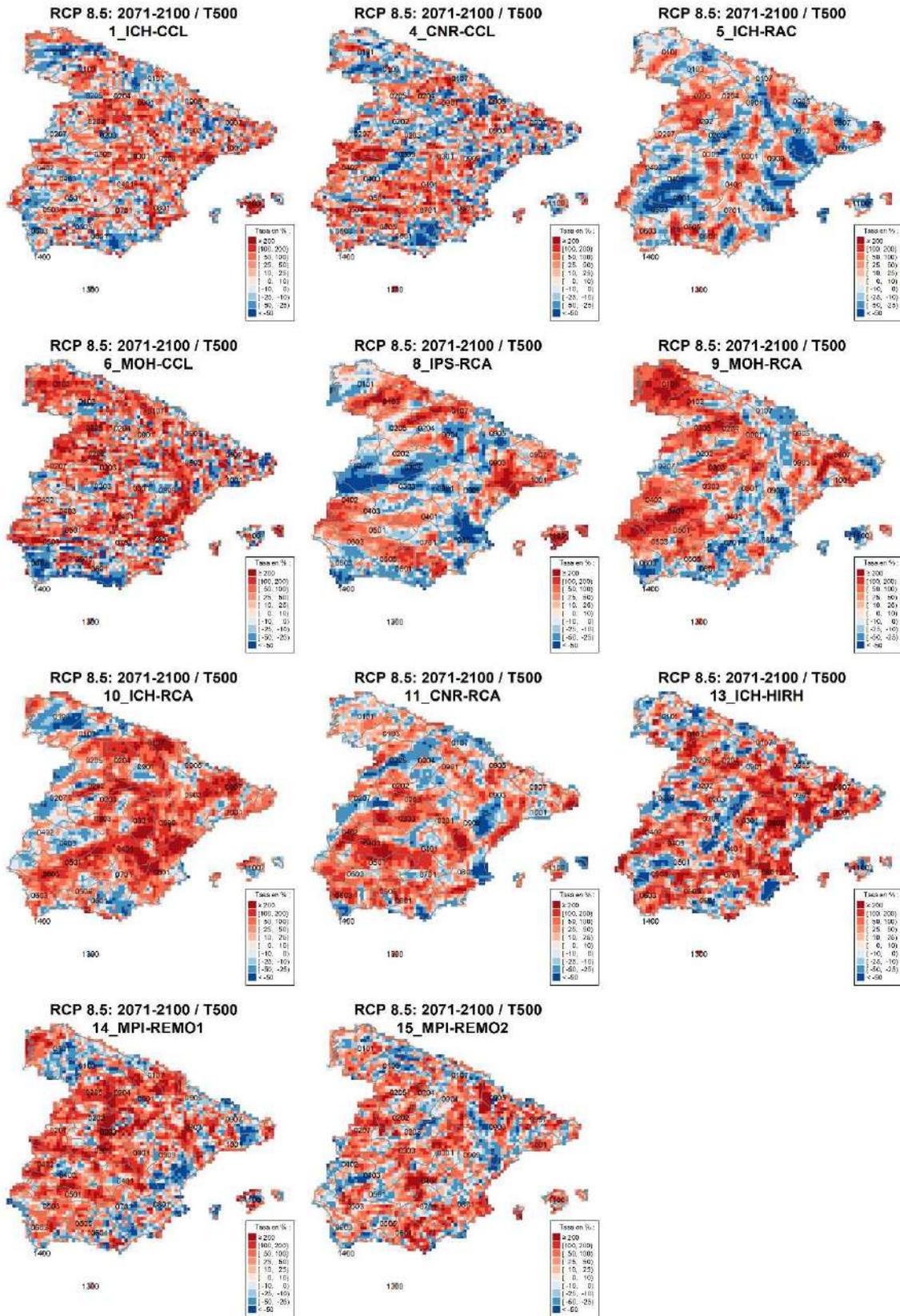


Figura A5.36. Tasas de cambio en cuantil para cada modelo climático común en toda la zona de estudio para el modelo GEV-L, $T = 500$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual.



CEDEX

Anexo nº 6

Mapas de tasas de cambio en cuantil significativas para $\alpha = 0.10$ asociadas con el modelo SQRT-R para cada modelo climático común en relación a la precipitación diaria máxima anual



Este Anexo nº 6 incluye los mapas en los que se indican las celdas y regiones con cambios en cuantil significativos para $\alpha = 0.10$ asociados con el modelo SQRT-R para cada uno de los 11 modelos climáticos comunes en la Península y Baleares en relación a la precipitación diaria máxima anual para los distintos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) y periodos de retorno ($T = 10, 100$ y 500 años) (Figuras A6.1 a A6.18).

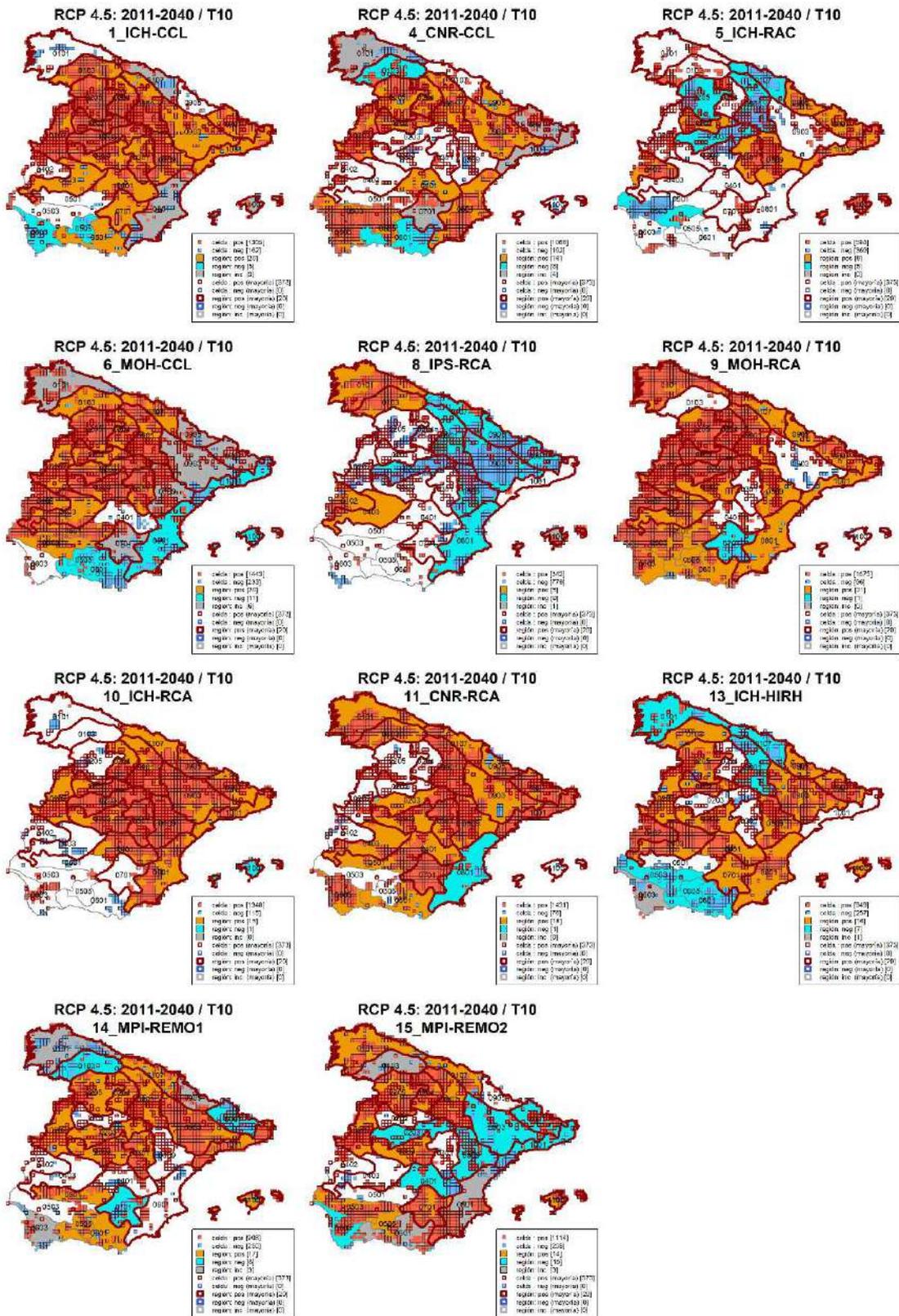


Figura A6.1. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

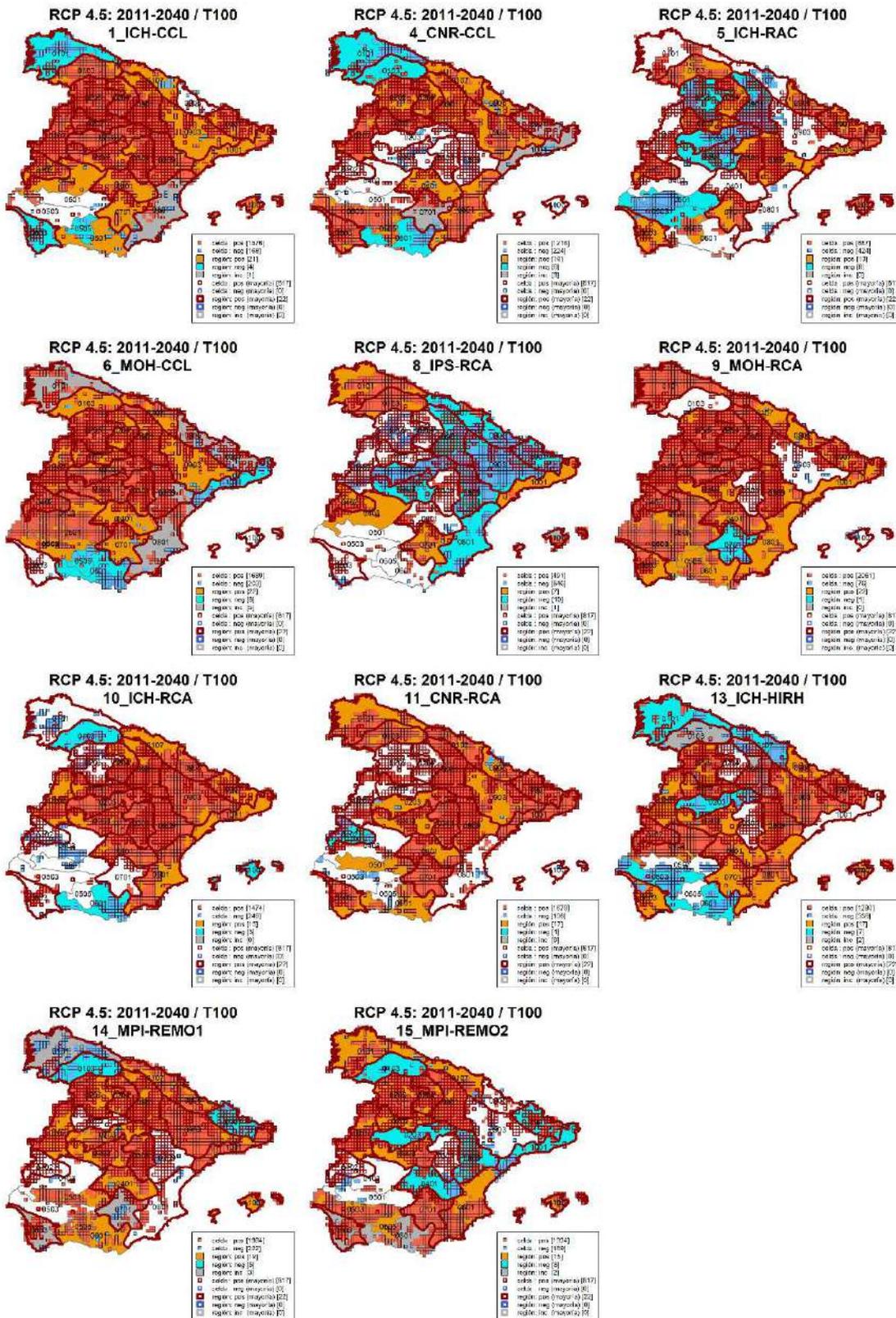


Figura A6.2. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).



CEDEX

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN ESPAÑA

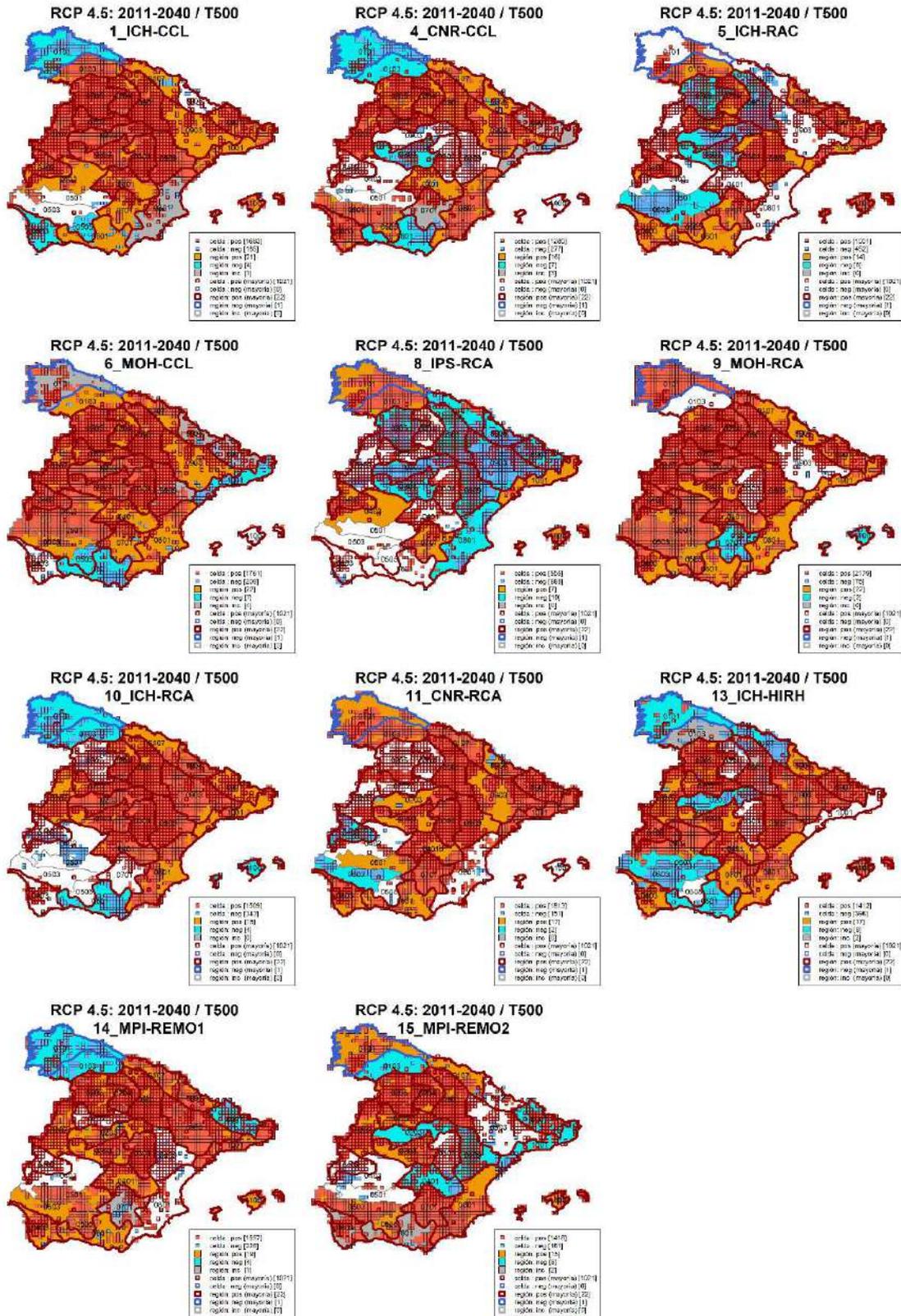


Figura A6.3. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativos para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

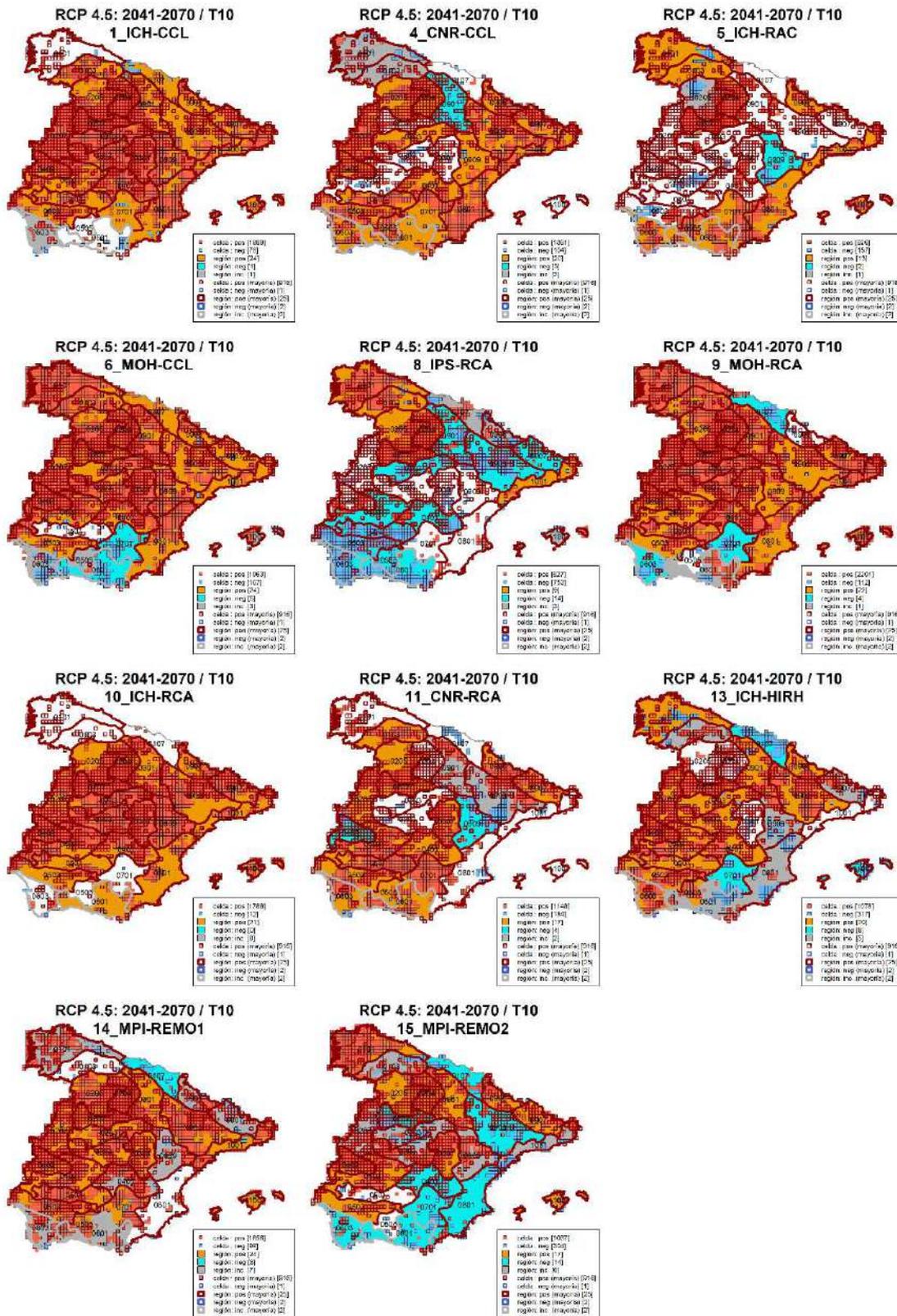


Figura A6.4. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

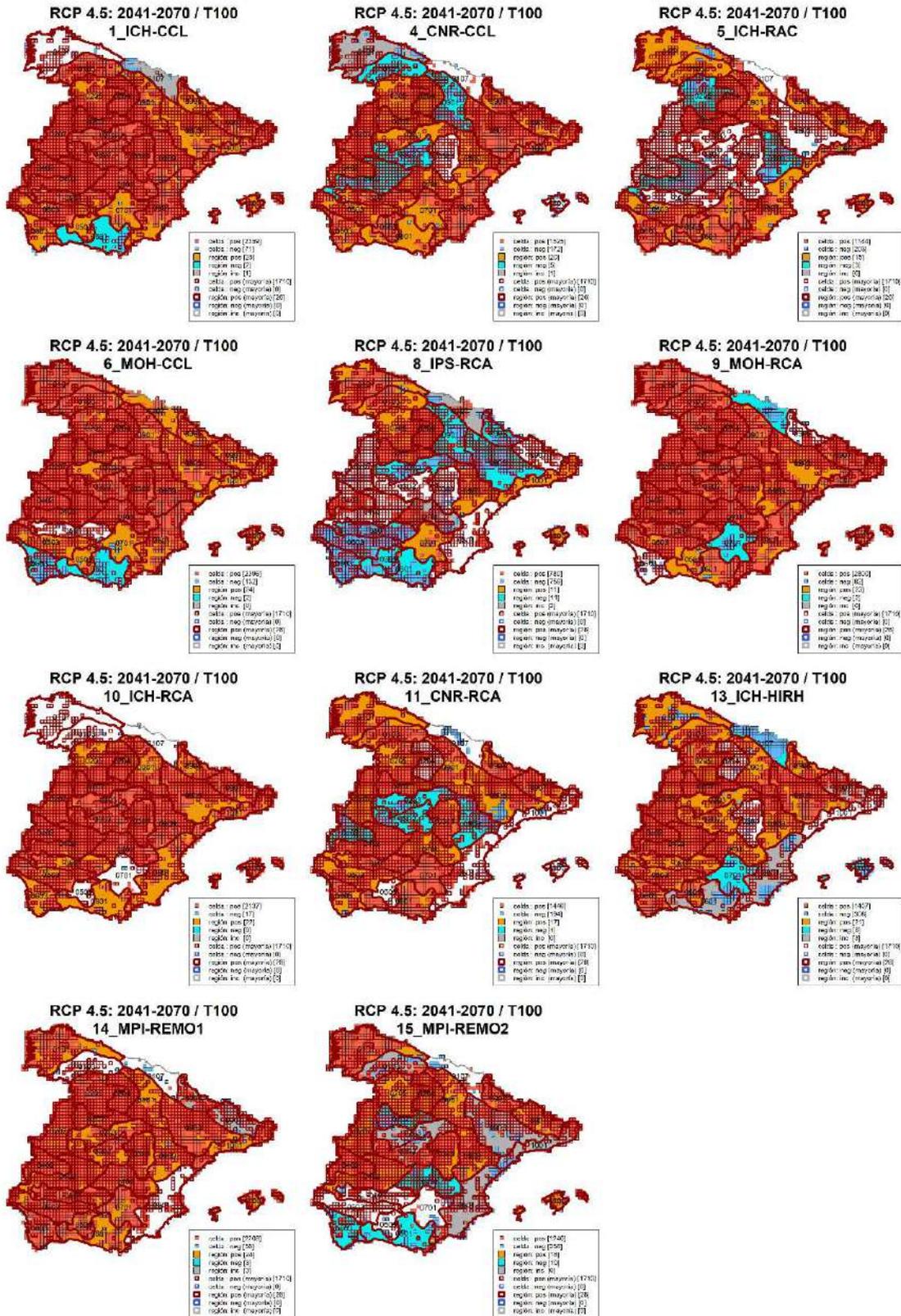


Figura A6.5. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

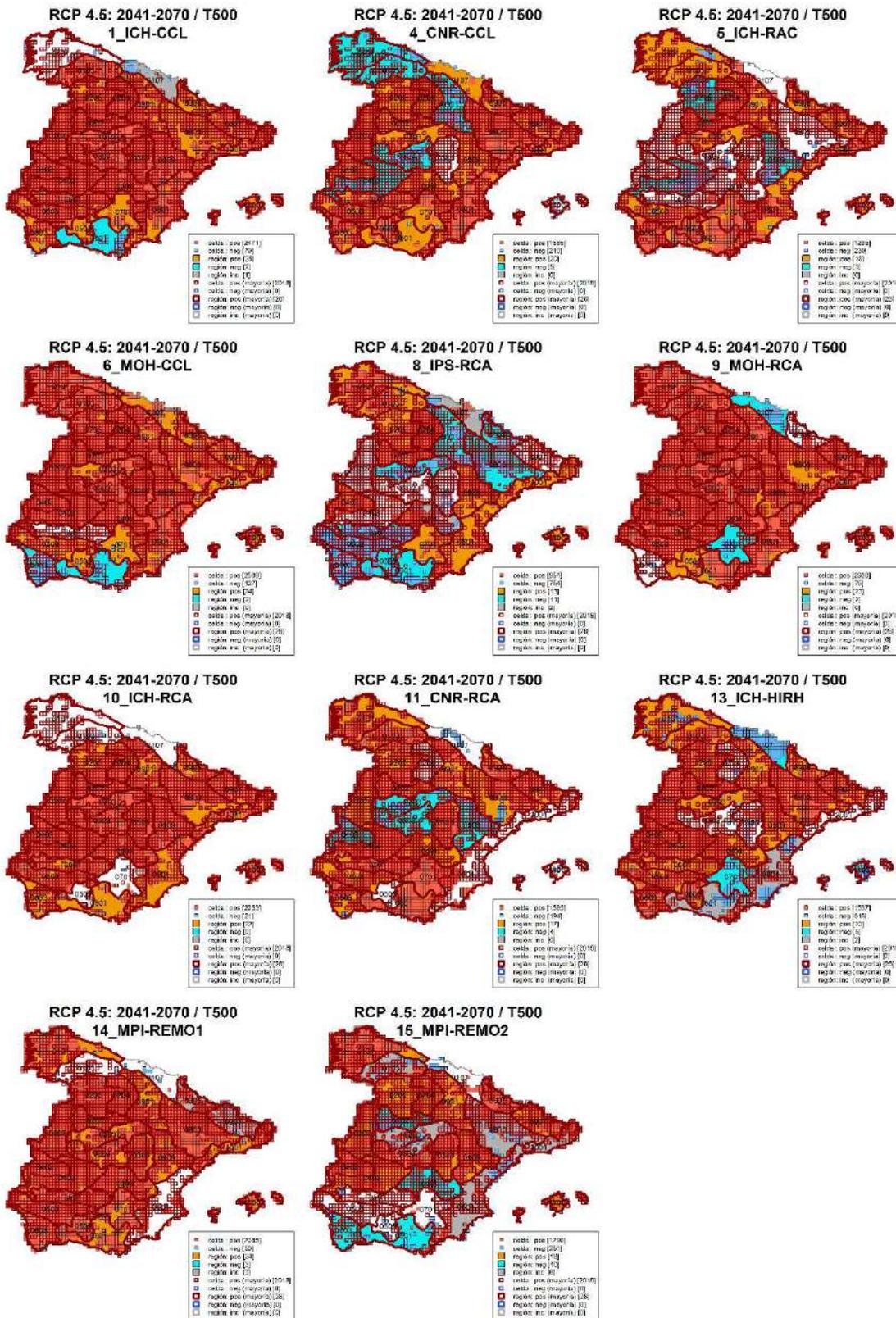


Figura A6.6. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

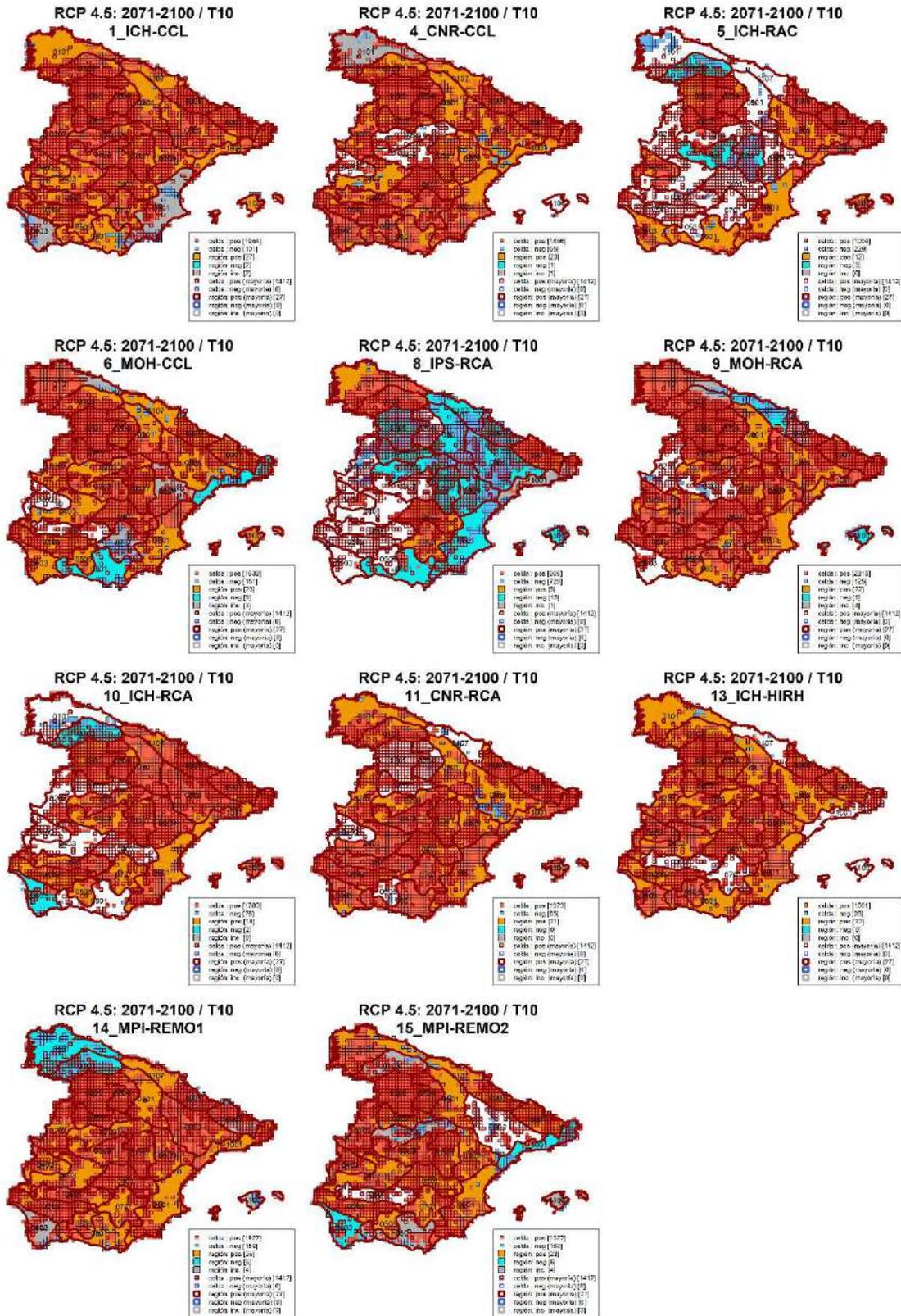


Figura A6.7. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

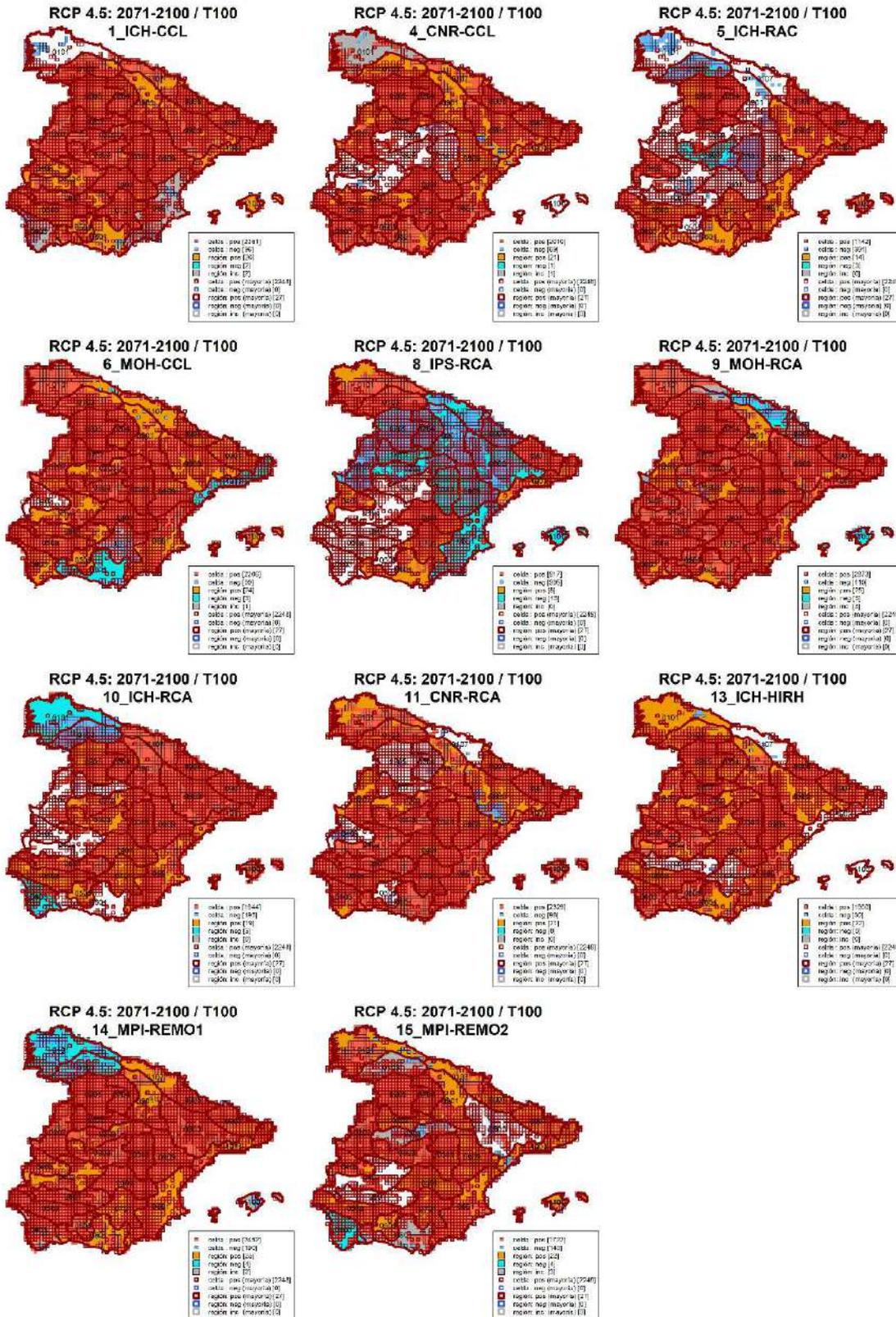


Figura A6.8. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

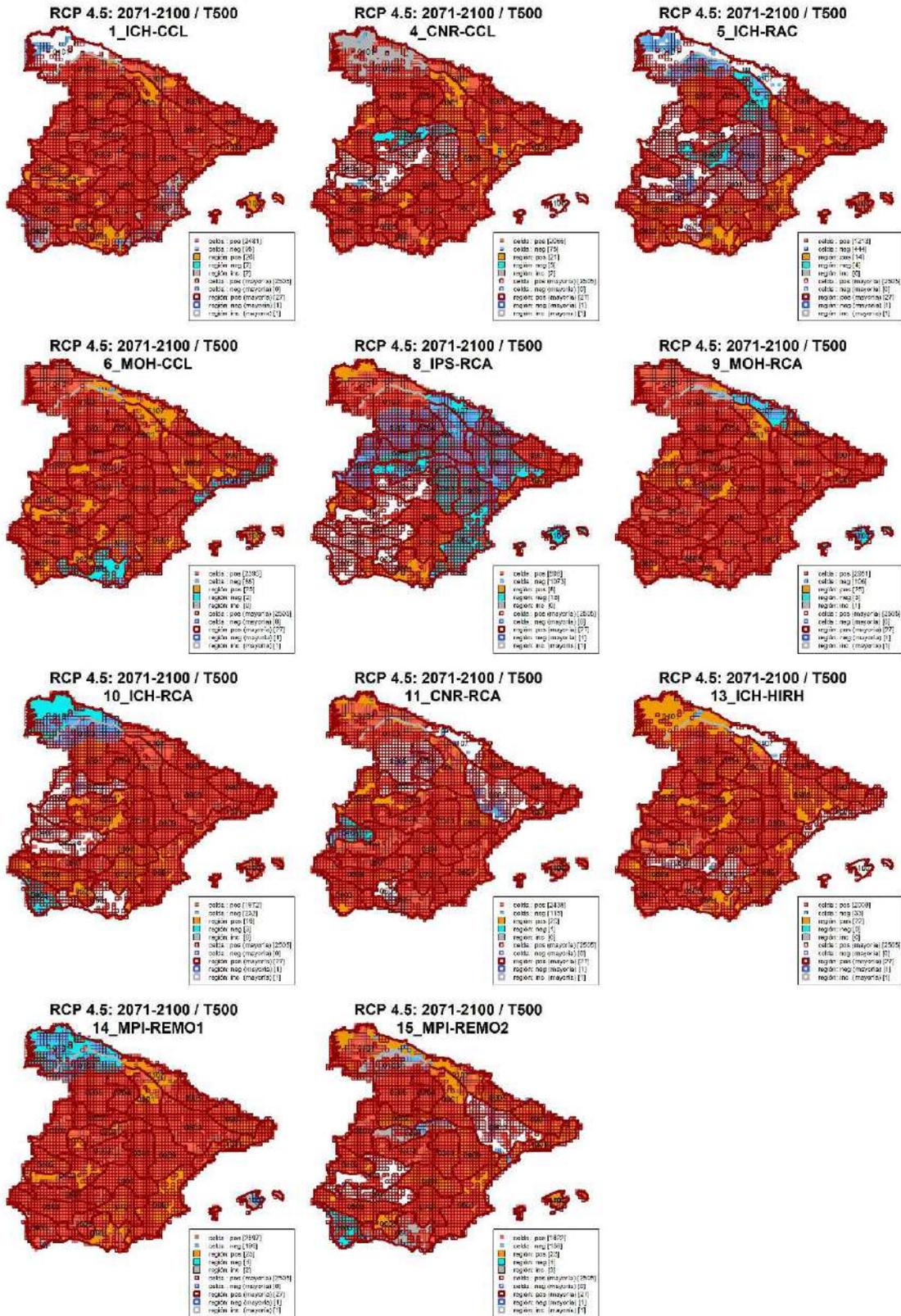


Figura A6.9. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativos para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 4.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

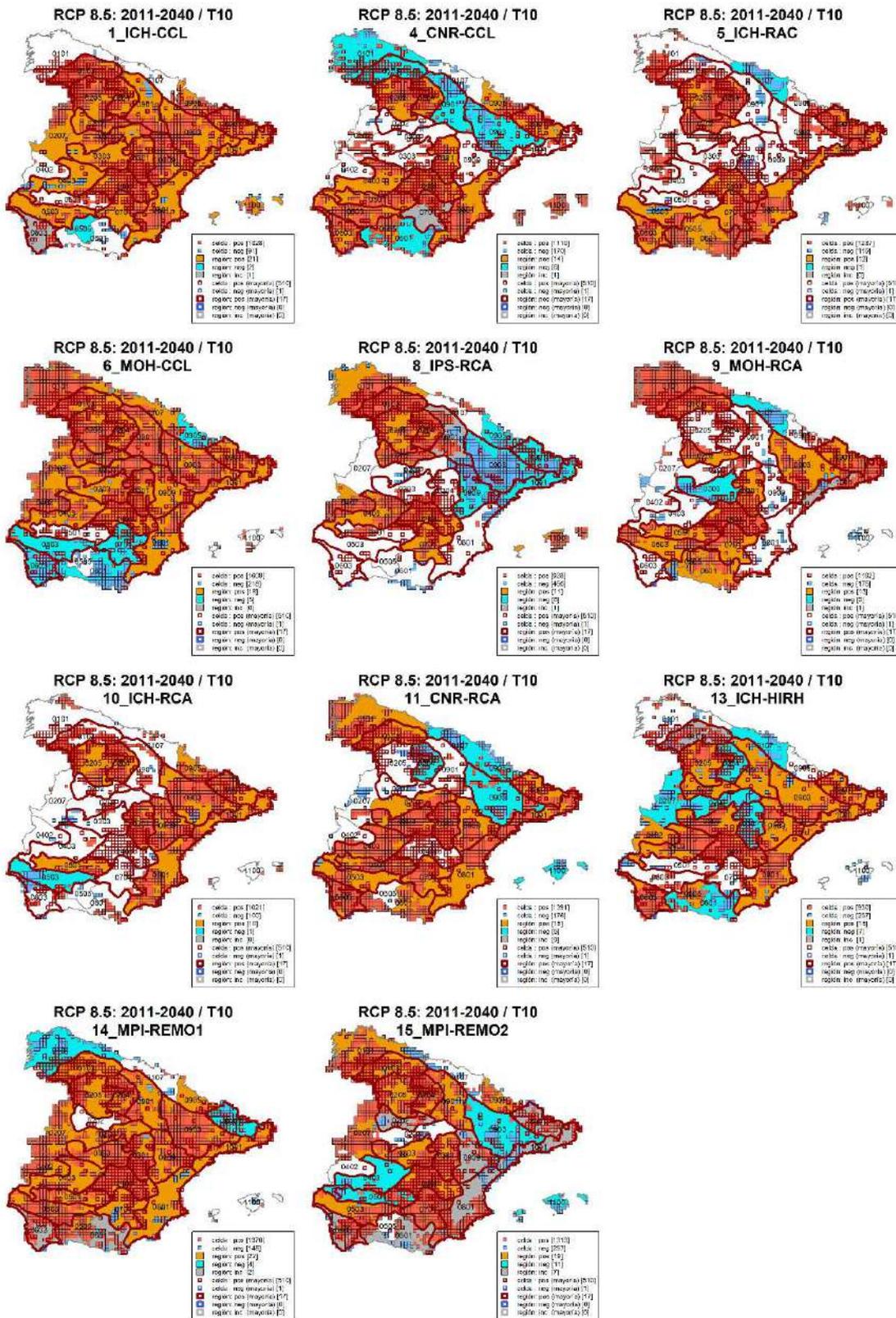


Figura A6.10. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

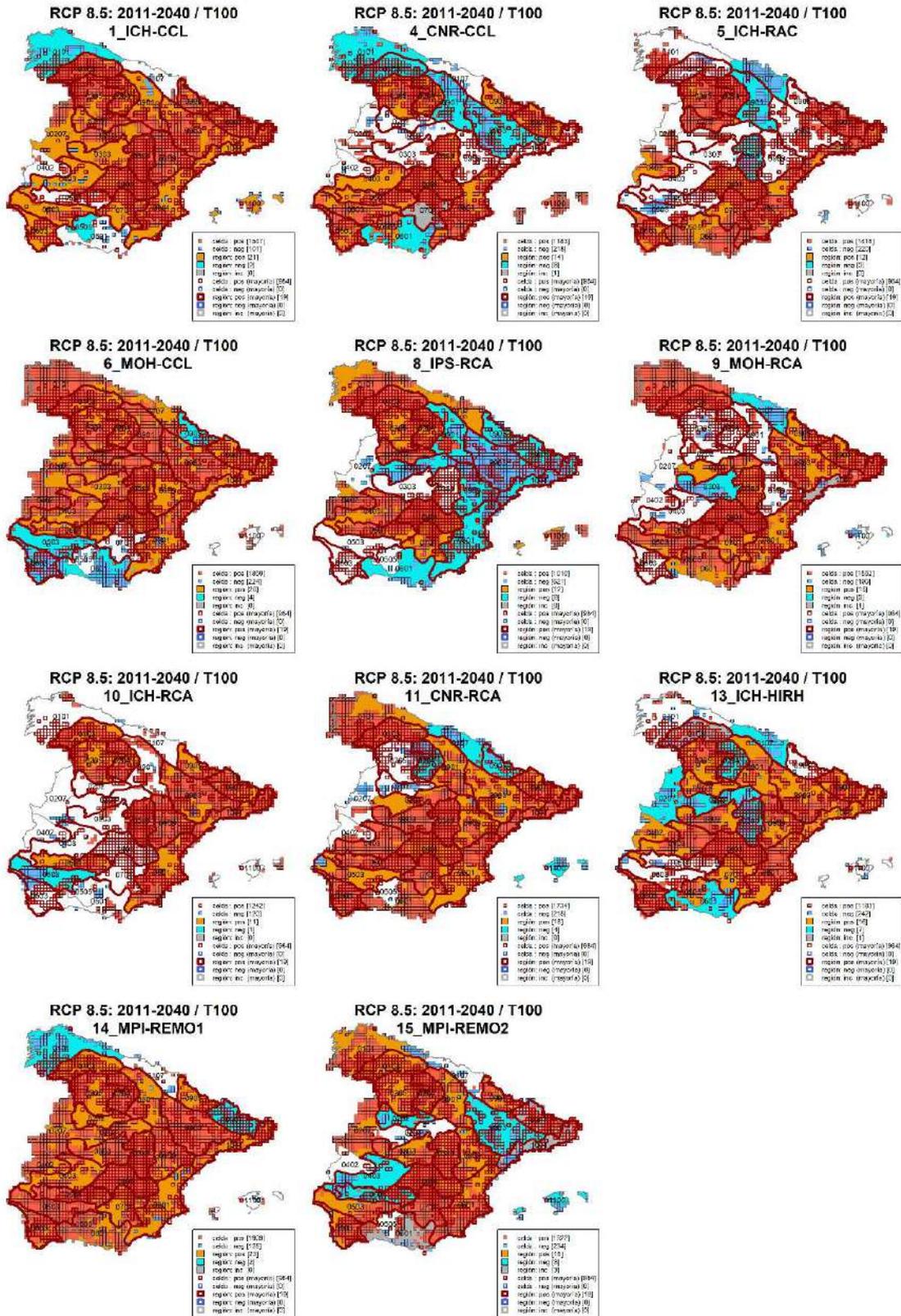


Figura A6.11. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

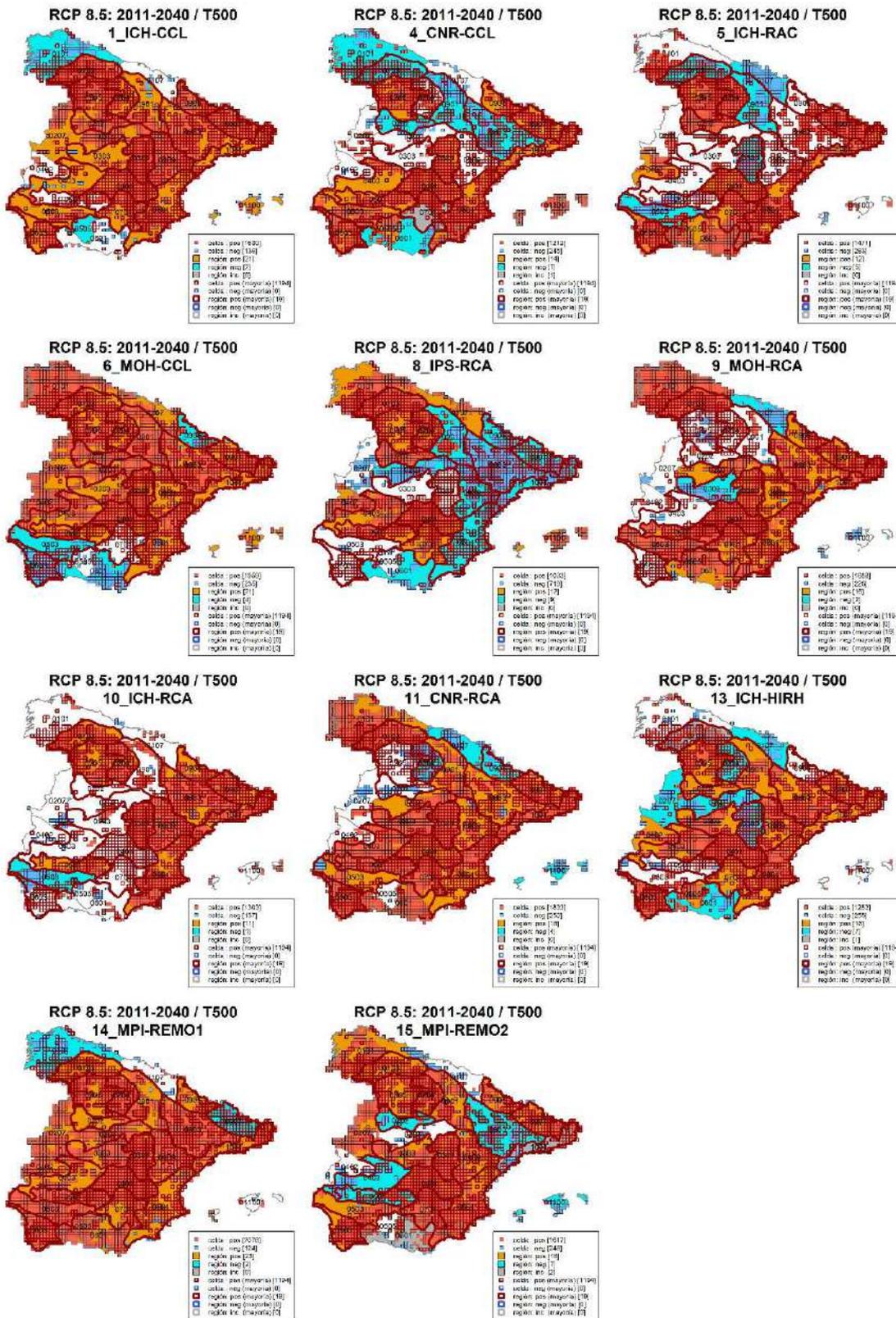


Figura A6.12. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2011-2040 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

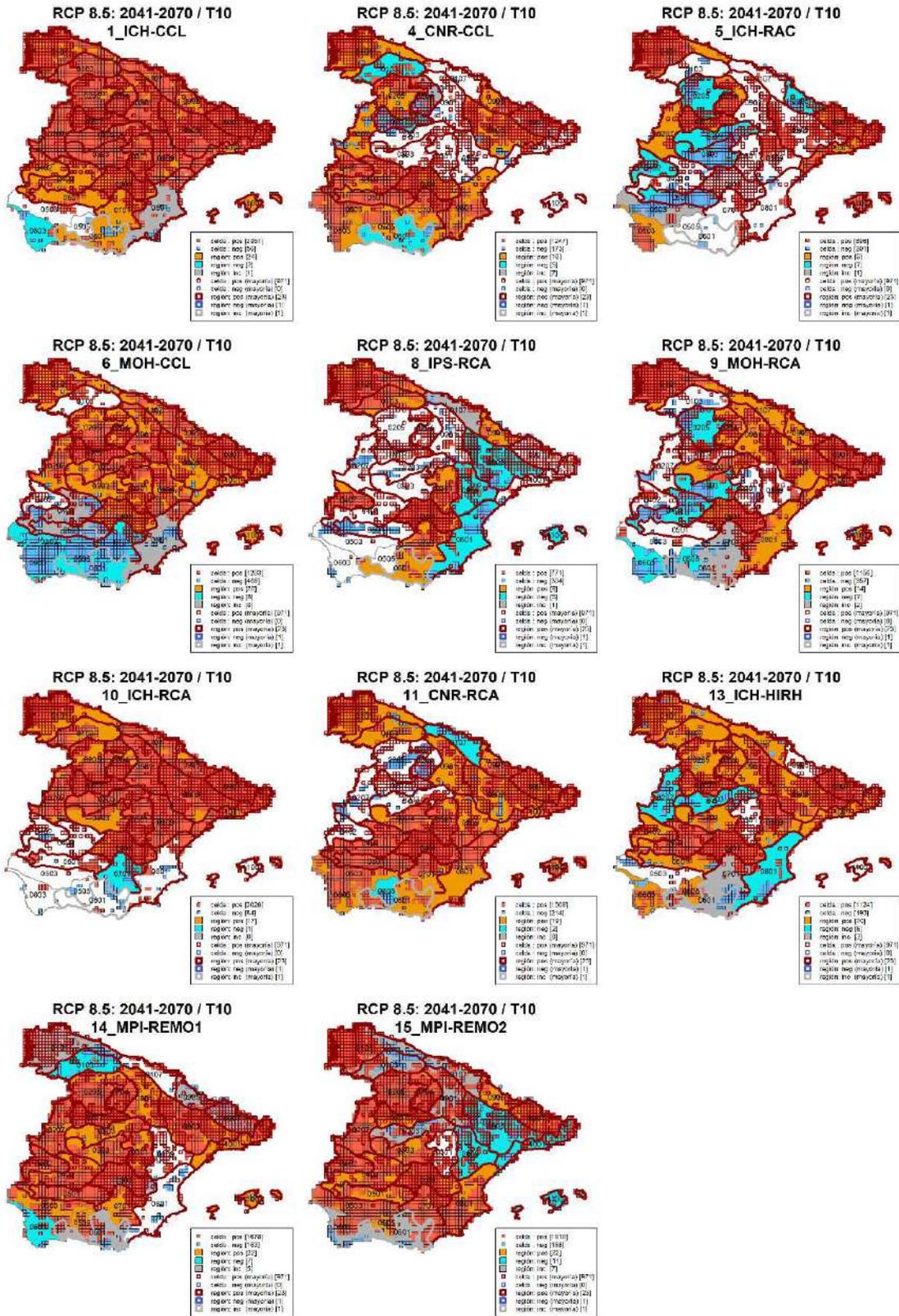


Figura A6.13. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. ("pos" = positivo; "neg" = negativo; "inc" = inconsistente).

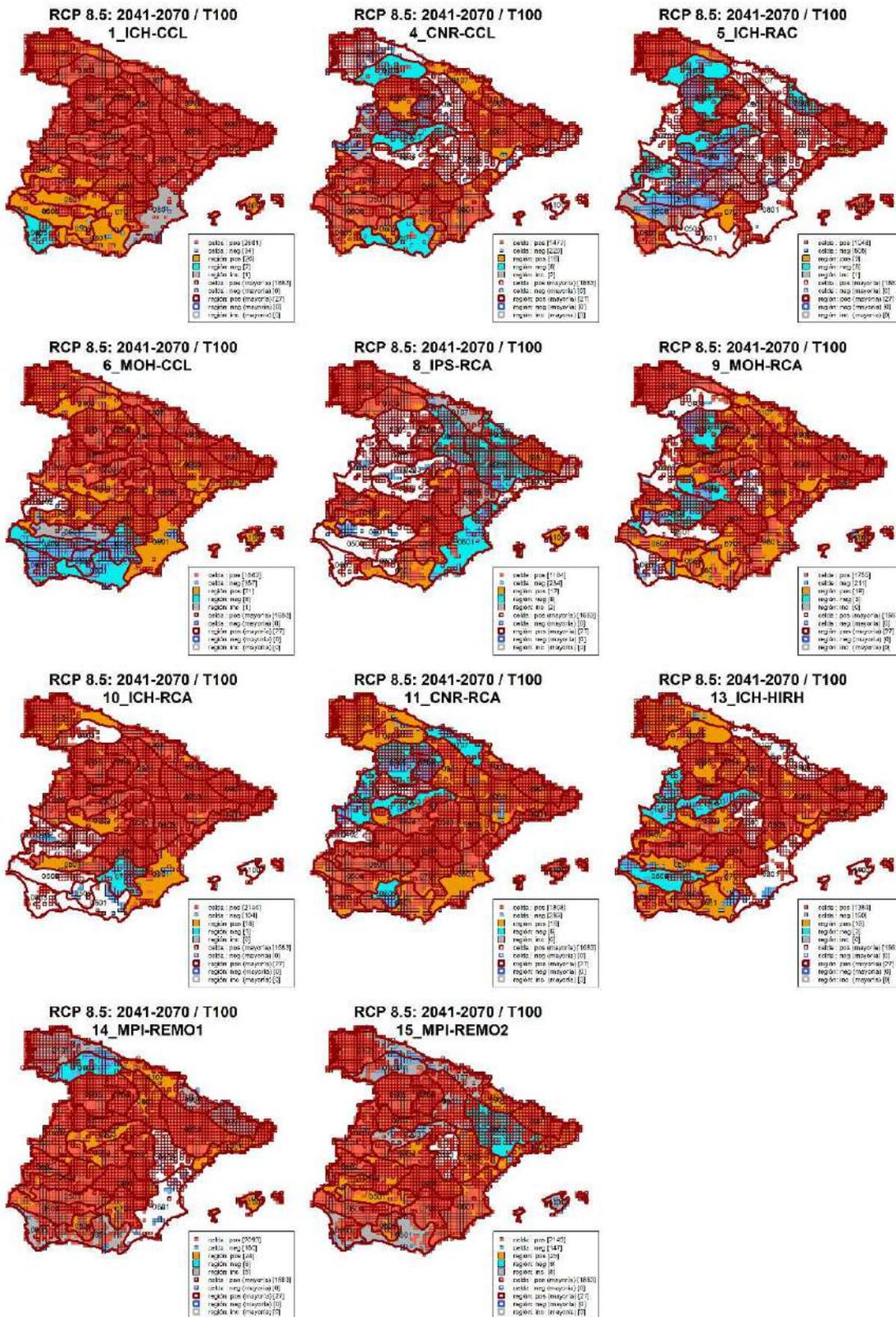


Figura A6.14. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

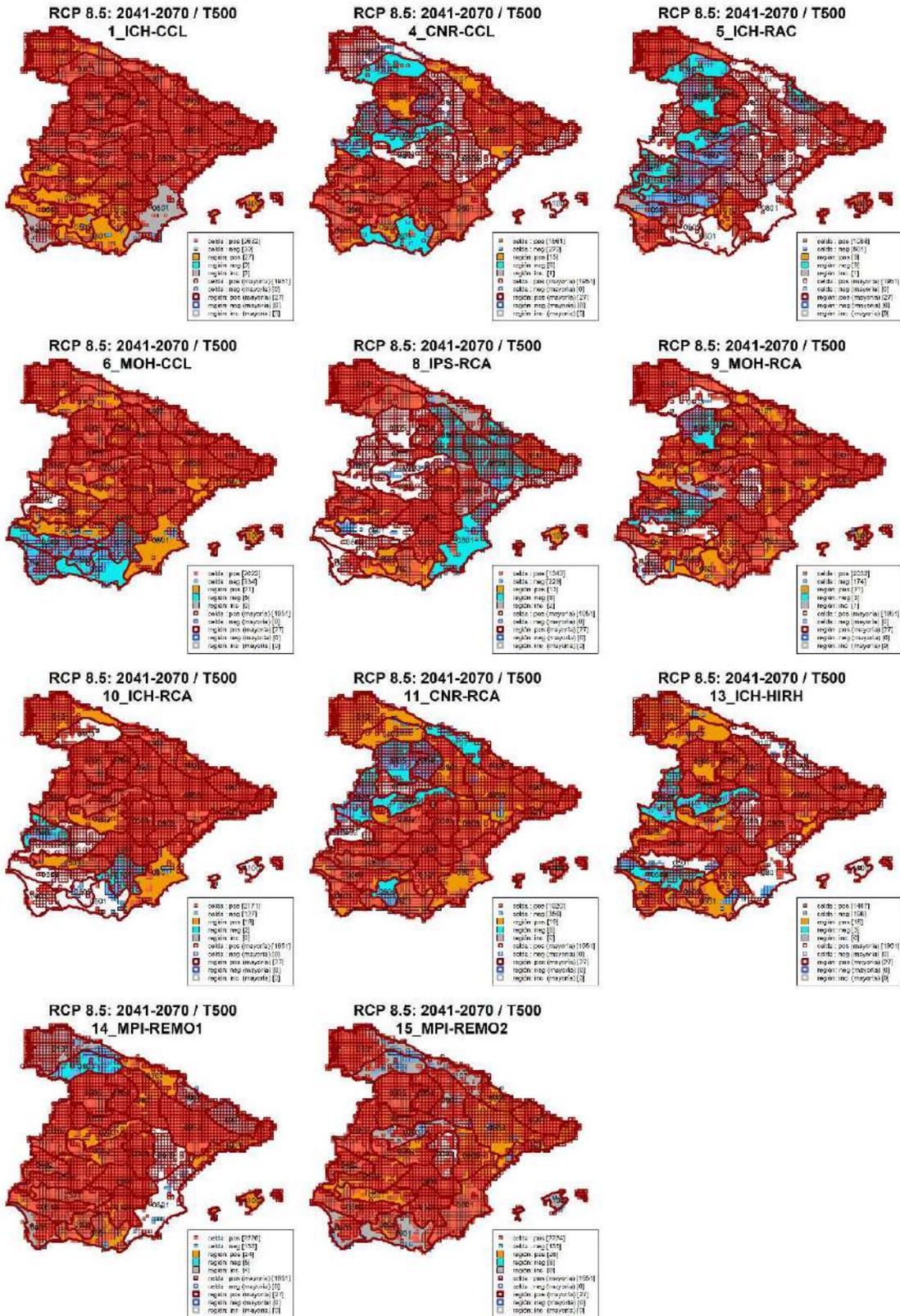


Figura A6.15. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2041-2070 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

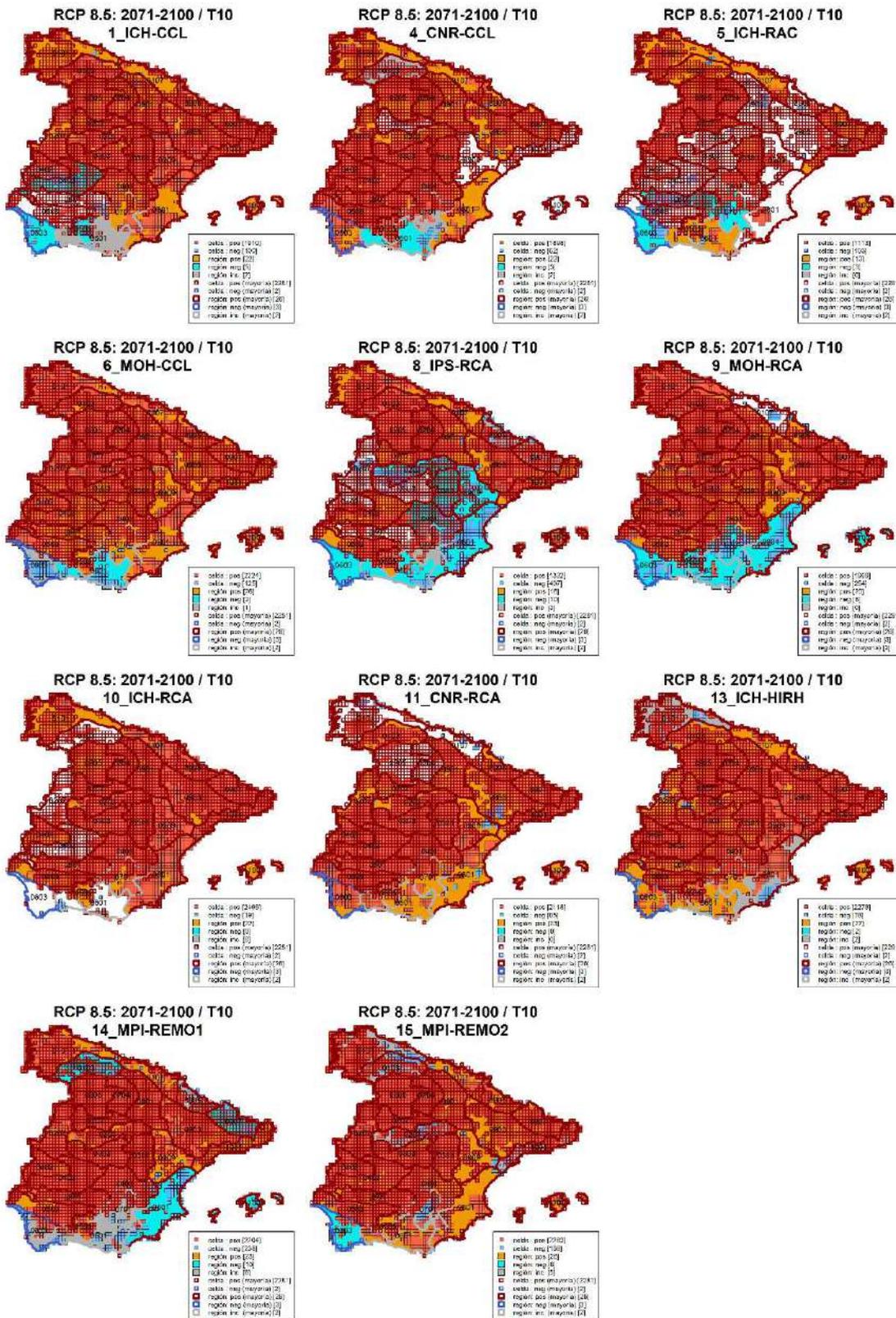


Figura A6.16. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 10$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

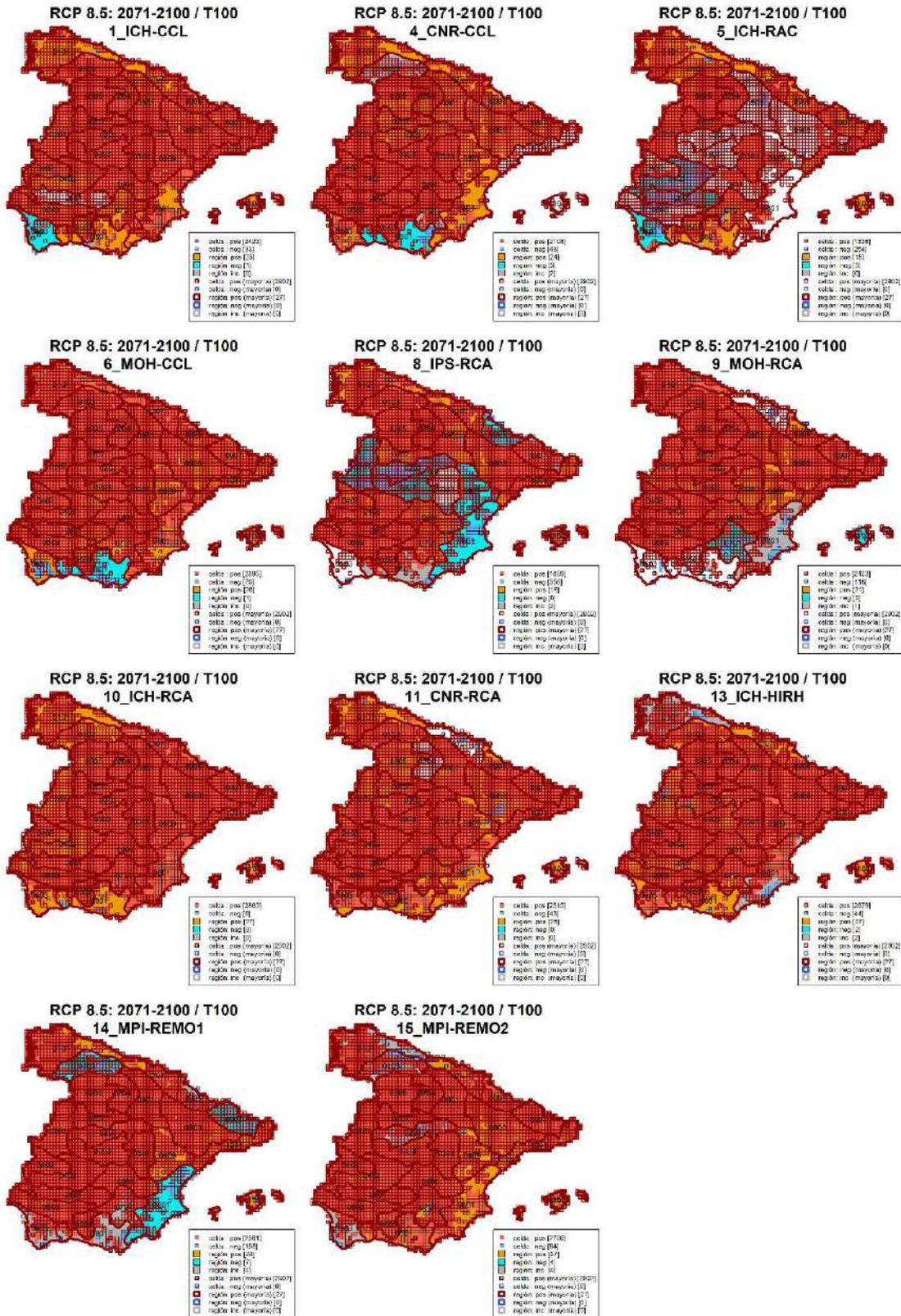


Figura A6.17. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 100$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).

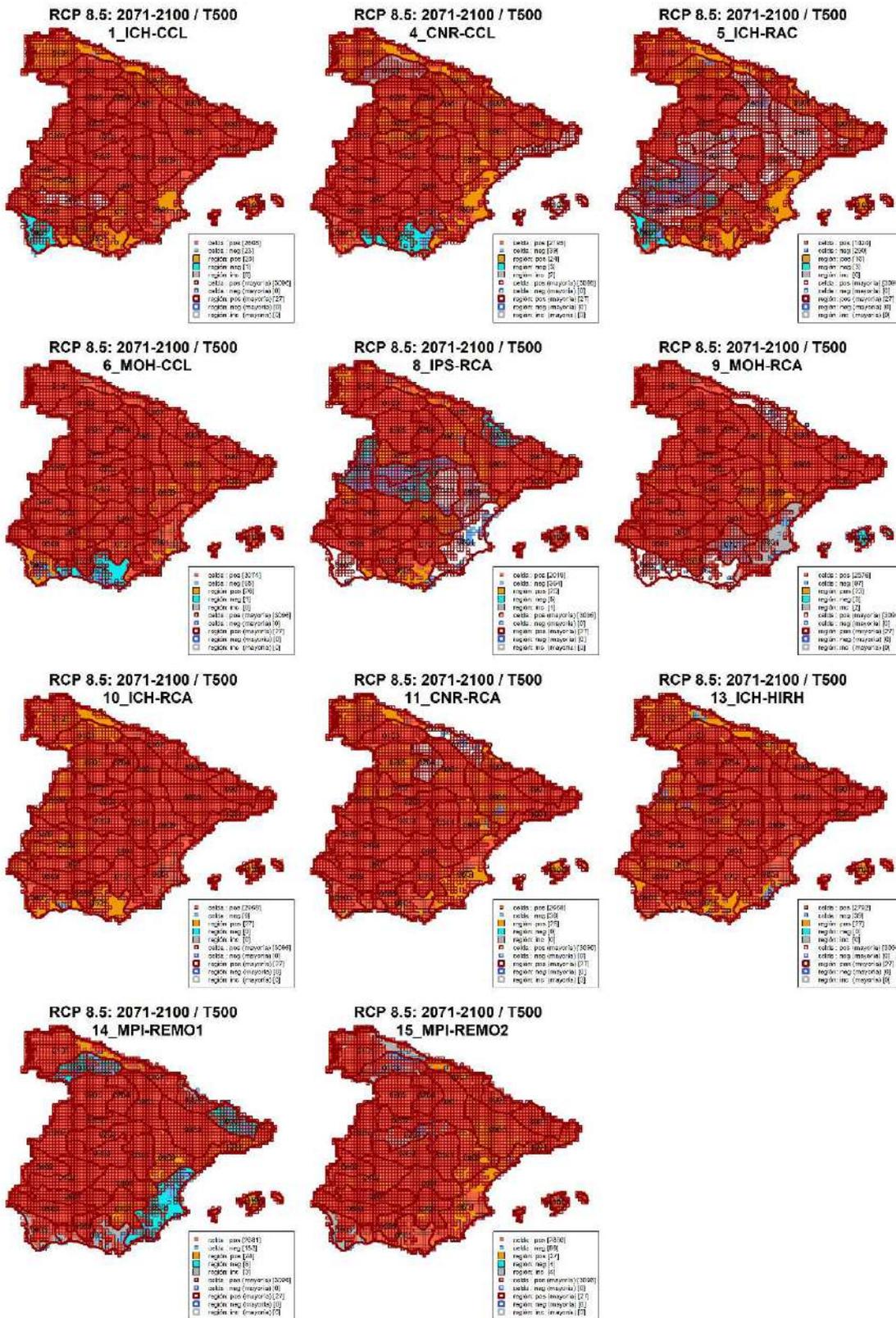


Figura A6.18. Celdas y regiones con cambios en cuantil significativo para $\alpha = 0.10$ identificadas para cada modelo climático común en la Península y Baleares para el modelo SQRT-R, $T = 500$ años, periodo de impacto 2071-2100 y escenario RCP 8.5 en relación a la precipitación diaria máxima anual. (“pos” = positivo; “neg” = negativo; “inc” = inconsistente).



CEDEX

Anexo nº 7

**Mapas de tasas de cambio en cuantil medias para el modelo
GEV-L indicando significancia para $\alpha = 0.33$**

Este Anexo nº 7 incluye los mapas de tasas de cambio en cuantil medias para toda la zona de estudio en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L, indicando cambios en cuantil significativos para $\alpha = 0.33$. Los mapas están asociados a la precipitación diaria máxima anual, la precipitación convectiva diaria máxima anual y la precipitación horaria máxima anual, para los distintos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) y periodos de retorno (T = 10, 100 y 500 años) (Figuras A7.1 a A7.6).

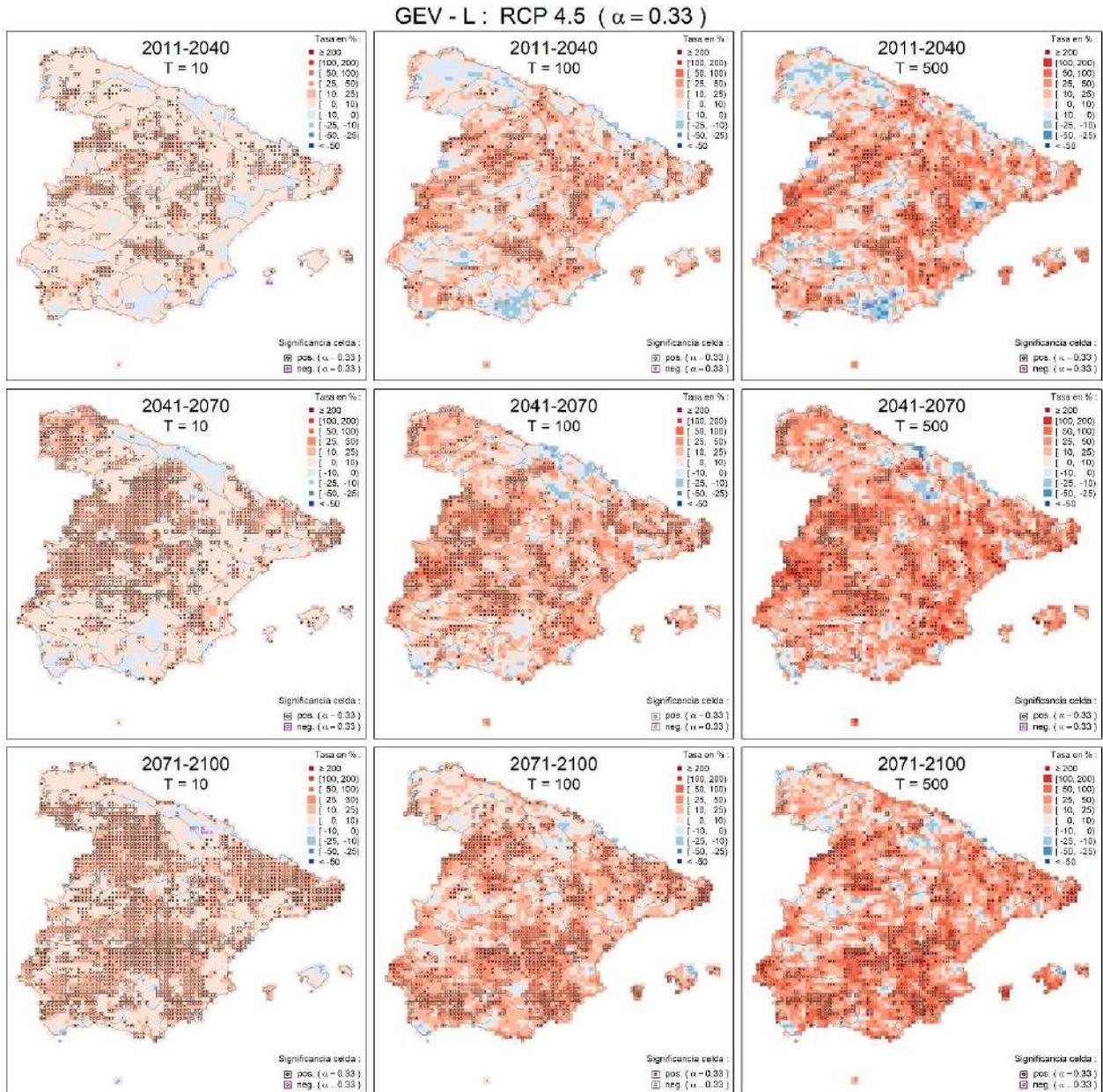


Figura A7.1. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.33$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

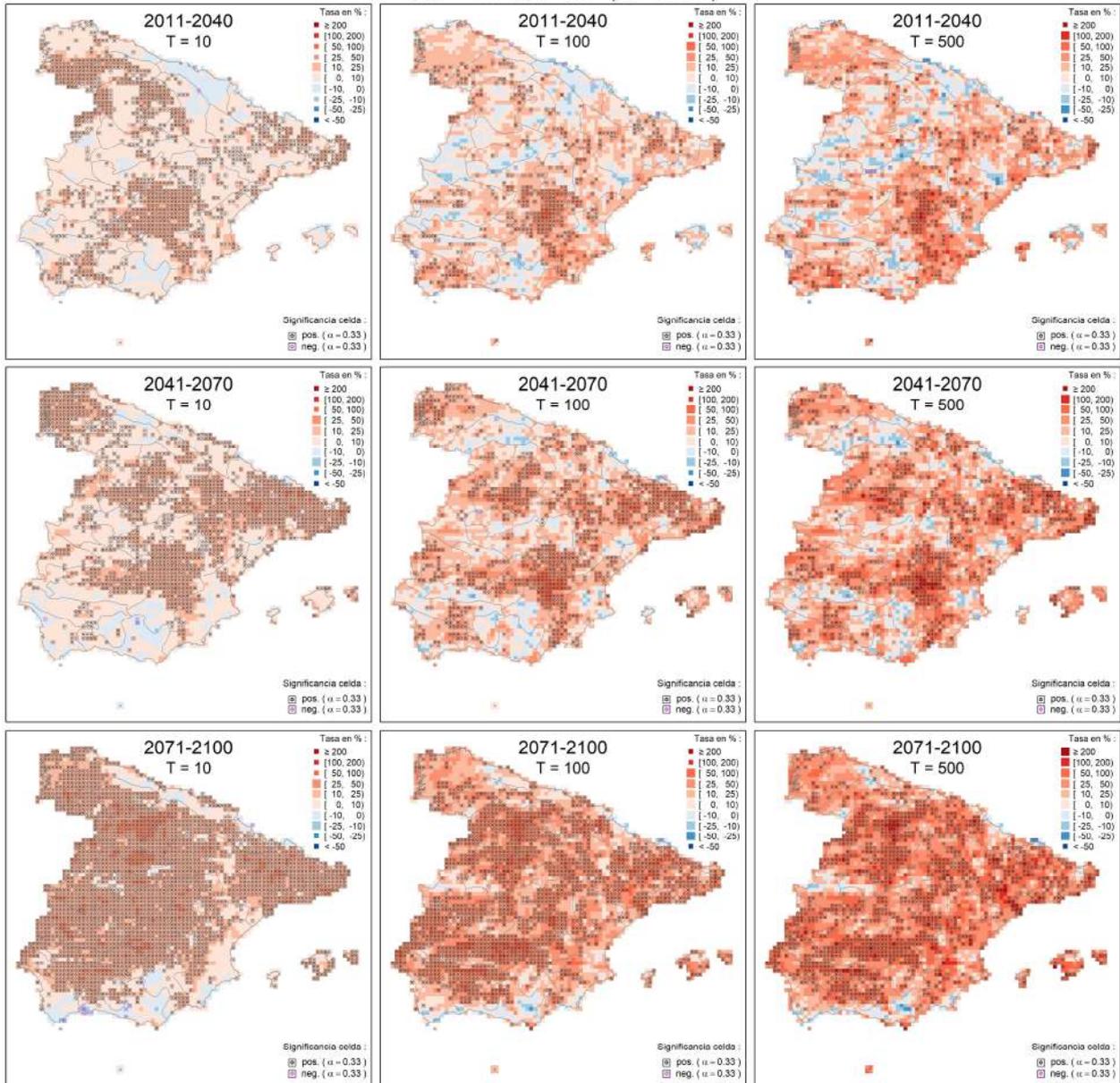
GEV - L : RCP 8.5 ($\alpha = 0.33$)

Figura A7.2. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.33$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

GEV - L : RCP 4.5 ($\alpha = 0.33$)

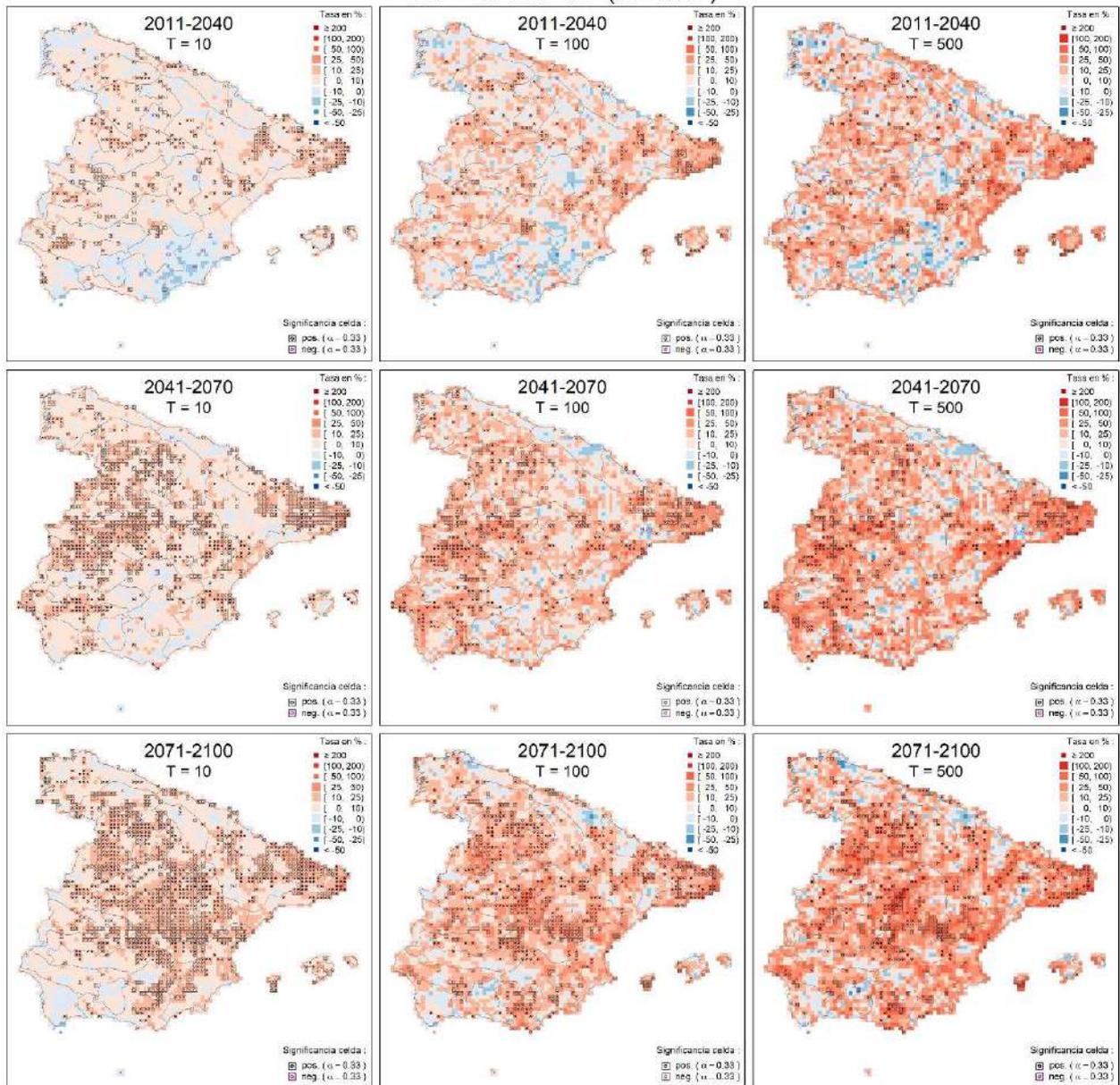


Figura A7.3. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.33$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

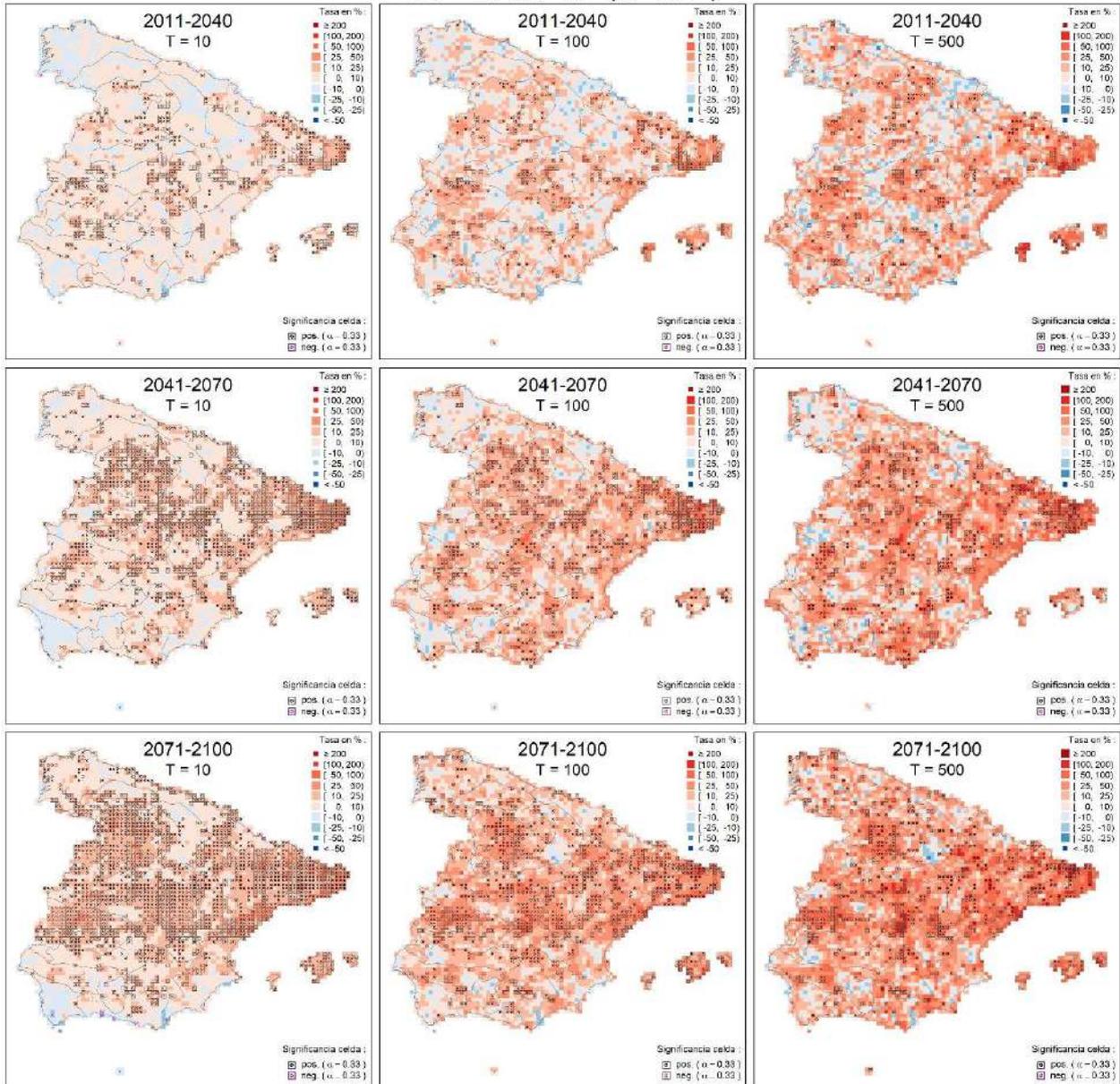
GEV - L : RCP 8.5 ($\alpha = 0.33$)

Figura A7.4. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación convectiva diaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.33$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

GEV - L : RCP 4.5 ($\alpha = 0.33$)

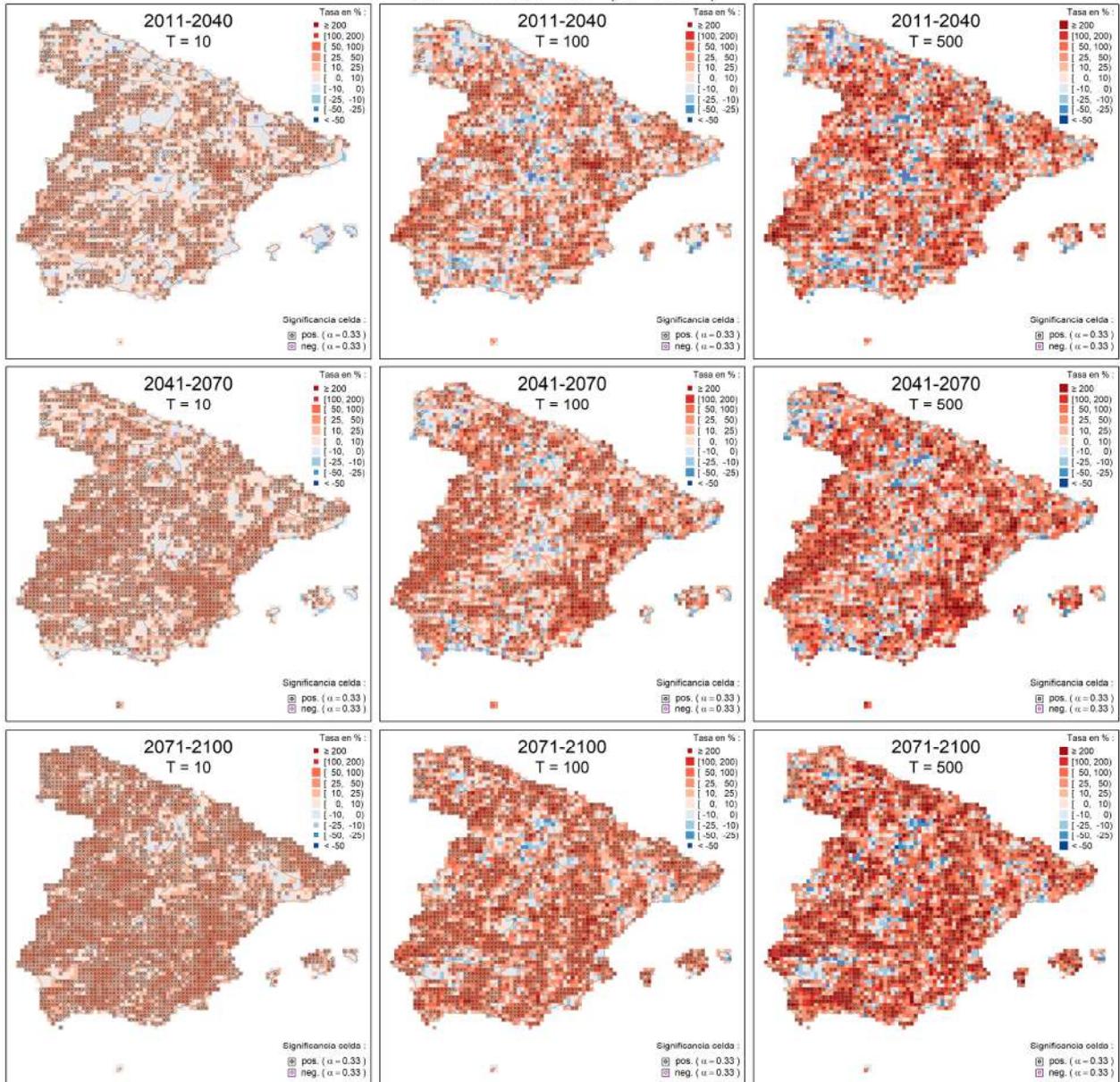


Figura A7.5. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.33$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 4.5.

GEV - L : RCP 8.5 ($\alpha = 0.33$)

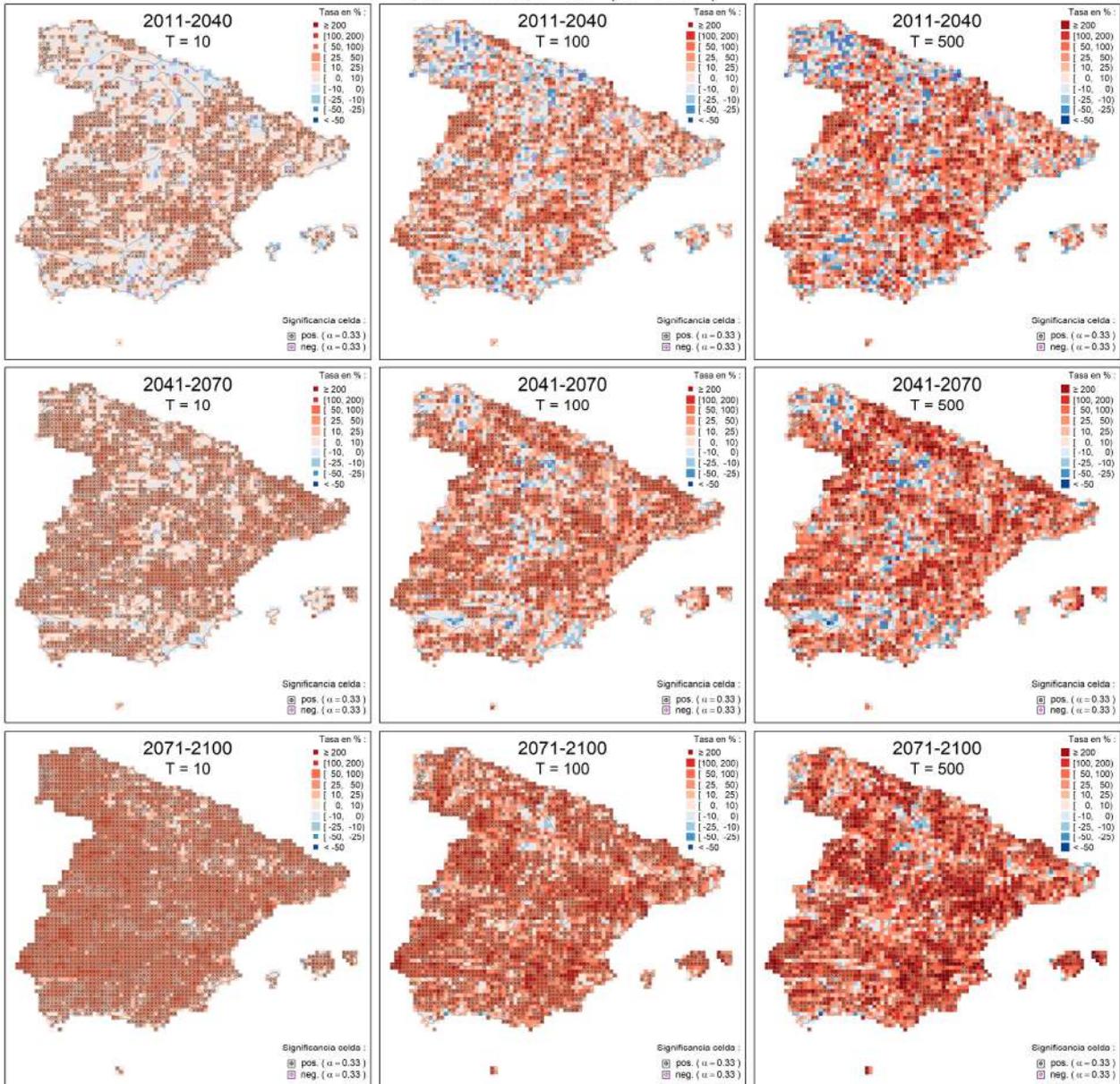


Figura A7.6. Tasas de cambio en cuantil medias en toda la zona de estudio para precipitación horaria máxima anual, indicando significancia para $\alpha = 0.33$, en base a los modelos climáticos comunes para el modelo GEV-L en RCP 8.5.

Anexo nº 8

Descripción de las capas en formato ASCII obtenidas como resultado del estudio

Este Anexo nº 8 incluye la descripción de las capas proporcionadas como resultado del estudio. Como se ha indicado en la memoria del trabajo, se recomienda utilizar para su aplicación práctica las tasas de cambio medias significativas obtenidas mediante el modelo SQRT-R, ya que, como se expone en dicha memoria, el modelo GEV-L no permite una correcta identificación de los cambios en cuantil debidos al cambio climático, especialmente aquellos correspondientes a los mayores periodos de retorno:

- (i) Capas de tasas de cambio en cuantil medias, asociadas a los percentiles 10 y 90, así como medias significativas para la precipitación diaria máxima anual en formato ASCII (con ficheros asociados .prj y .xml). Estas capas se proporcionan, en base a los modelos climáticos comunes, para el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ en la Península y Baleares, así como para el modelo GEV-L para $\alpha = 0.10$ y 0.33 en toda la zona de estudio. El primer nivel de significancia indica con rigor si los cambios son estadísticamente significativos, siendo 0.10 un nivel de significancia utilizado habitualmente en la aplicación práctica de los test estadísticos. La estimación de resultados adicionales para $\alpha = 0.33$ tiene como objeto relacionar los resultados de este estudio con los obtenidos para la revisión de la EPRI, debido a que dicho valor fue el nivel de significancia utilizado en MITECO (2018) con objeto de identificar aquellas celdas con un mayor impacto del cambio climático, ya que la aplicación del test con carácter estrictamente estadístico (para $\alpha = 0.10$), no permite la caracterización espacial de los cambios debido a la gran incertidumbre asociada a la estimación de cuantiles para altos periodos de retorno mediante el ajuste de la distribución GEV de manera local.

Las capas están disponibles para las combinaciones escenario – periodo de impacto: “RCP 4.5: 2011-2040”, “RCP 4.5: 2041-2070”, “RCP 4.5: 2071-2100”, “RCP 8.5: 2011-2040”, “RCP 8.5: 2041-2070” y “RCP 8.5: 2071-2100”, para cada uno de los tres periodos de retorno: $T = 10, 100$ y 500 años. El tamaño de celda es de 0.125° (“GCS_WGS_1984”).

1) Estructura de carpetas:

- **Modelo estadístico: “GEV_L”** (ajuste local de la distribución GEV) o **“SQRT_R”** (ajuste regional de la distribución SQRT-ET_{max}):
 - **meanrelc**: tasas de cambio en cuantil medias para el modelo SQRT-R (18 ficheros ASCII) o para el modelo GEV-L (18 ficheros ASCII).
 - **meanrelc_sig0.10_M4500**: tasas de cambio en cuantil medias significativas para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R (18 ficheros ASCII) o para el modelo GEV-L (18 ficheros ASCII).
 - **meanrelc_sig0.33_M4500**: tasas de cambio en cuantil medias significativas para $\alpha = 0.33$ para el modelo GEV-L (18 ficheros ASCII).
 - **percentil_10_relc**: tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 10 para el modelo SQRT-R (18 ficheros ASCII) o para el modelo GEV-L (18 ficheros ASCII).



- **percentil_90_relc:** tasas de cambio en cuantil asociadas al percentil 90 para para el modelo (18 ficheros ASCII) o para el modelo (18 ficheros ASCII).

2) *Nomenclatura de ficheros ASCII:*

- Modelo estadístico: “gl” (GEV-L) o “sr” (SQRT-R).
- Escenario: “45” (RCP 4.5) o “85” (RCP 8.5).
- Periodo de impacto: “2020” (2011-2040), “2050” (2041-2070) o “2080” (2071-2100).
- Periodo de retorno: “10”, “100” o “500” años.
- Tipo de fichero: “a ... i” (tasas de cambio medias, asociadas al percentil 10 o 90), “a ...” (tasas de cambio medias significativas).
- Ejemplos de nomenclatura de ficheros ASCII:
 - **meanrelc:**
 - e.g., “agl45202010i”: tasas de cambio medias para el modelo GEV-L en el escenario RCP 4.5 y periodo de impacto 2011-2040 para $T = 10$ años en toda la zona de estudio.
 - e.g., “asr852080500i”: tasas de cambio medias para el modelo SQRT-R en el escenario RCP 8.5 y periodo de impacto 2071-2100 para $T = 500$ años en la Península y Baleares.
 - **meanrelc_sig0.10_M4500:**
 - e.g., “agl45202010”: tasas de cambio medias significativas para $\alpha = 0.10$ para el modelo GEV-L en el escenario RCP 4.5 y periodo de impacto 2011-2040 para $T = 10$ años en toda la zona de estudio.
 - e.g., “asr852080500”: tasas de cambio medias significativas para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R en el escenario RCP 8.5 y periodo de impacto 2071-2100 para $T = 500$ años en la Península y Baleares.
 - **meanrelc_sig0.33_M4500:**
 - e.g., “agl45202010”: tasas de cambio medias significativas para $\alpha = 0.33$ para el modelo GEV-L en el escenario RCP 4.5 y periodo de impacto 2011-2040 para $T = 10$ años en toda la zona de estudio.
 - **percentil_10_relc:**

- e.g., “agl45202010i”: tasas de cambio asociadas al percentil 10 para el modelo GEV-L en el escenario RCP 4.5 y periodo de impacto 2011-2040 para $T = 10$ años en toda la zona de estudio.
 - e.g., “asr852080500i”: tasas de cambio asociadas al percentil 10 para el modelo SQRT-R en el escenario RCP 8.5 y periodo de impacto 2071-2100 para $T = 500$ años en la Península y Baleares.
 - **percentil_90_relc:**
 - e.g., “agl45202010i”: tasas de cambio asociadas al percentil 90 para el modelo GEV-L en el escenario RCP 4.5 y periodo de impacto 2011-2040 para $T = 10$ años en toda la zona de estudio.
 - e.g., “asr852080500i”: tasas de cambio asociadas al percentil 90 para el modelo SQRT-R en el escenario RCP 8.5 y periodo de impacto 2071-2100 para $T = 500$ años en la Península y Baleares.
- (ii) Capas de tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en formato ASCII (con ficheros asociados .prj y .xml). Estas capas están asociadas con el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$ y se proporcionan para la Península en relación al periodo de impacto 2041-2070 para cada uno de los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5) y cada uno de los tres periodos de retorno ($T = 10, 100$ y 500 años). El tamaño de celda es de 0.5 km (“ETRS_1989_UTM_Zone_30N”).

1) *Estructura de carpetas:* “**Capas_PreAcu**” (6 ficheros ASCII).

2) *Nomenclatura:*

- Tipo de fichero: “adpa...pc...f” (tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada).
- Periodo de retorno: “10”, “100” o “500” años.
- Escenario: “45” (RCP 4.5) o “85” (RCP 8.5).
- Nomenclatura de ficheros ASCII: “adpa10pc45f”, “adpa100pc45f”, “adpa500pc45f”, “adpa10pc85f”, “adpa100pc85f” y “adpa500pc85f”.
- Ejemplo de nomenclatura de fichero ASCII:
 - e.g., “adpa500pc85f”: tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada para $\alpha = 0.10$ para el modelo SQRT-R en el escenario RCP 8.5 y periodo de impacto 2041-2070 para $T = 500$ años en la Península.



CEDEX

Anexo nº 9

**Descripción de los tramos fluviales con cambios en cuantil
de precipitación diaria máxima anual acumulada en la
Península por demarcación hidrográfica**



Este **Anexo nº 9** incluye la descripción de los tramos fluviales con cambios en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada para cada demarcación hidrográfica situada en la Península, incluyendo mapas detallados con los valores de las tasas de cambio en cada una de las demarcaciones (**Figuras A9.1 a A9.90**). La información está asociada con el modelo SQRT-R para $\alpha = 0.10$, y se proporciona para el periodo de impacto 2041-2070, para cada uno de los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5) y cada uno de los tres periodos de retorno ($T = 10, 100$ y 500 años).

Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada en el escenario RCP 4.5 para el periodo de retorno de 10 años (**Figura A9.1**) se sitúan sobre todo en la red hidrográfica principal de la demarcación, con valores por debajo del 10%. Se ven afectados el río Miño (excepto cabecera) y sus afluentes Anllo, Ladra, Avia, Arnoya y los tramos finales del Narla, Ferreira y Neira. También el Sil (excepto cabecera) y los tramos finales de sus afluentes el Cua, el Boeza y el Cabe, así como el Limia excepto cabecera y su afluente el Laguna de Antela. Algunos pequeños afluentes del Miño y el Cabe alcanzarían valores del orden del 10-15%, mientras que en el río Pequeño, afluente de cabecera del Miño, y en el río Puga, los cambios son del orden del 15-20%.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (**Figura A9.2**) los cambios inferiores al 10% se amplían a casi toda la red principal, extendiéndose a las cabeceras de las corrientes ya afectadas por los cambios en el periodo de retorno de 10 años, así como al río Bibey y sus afluentes y al río Tea. Aparecen numerosos afluentes del Miño y el Cabe con tasas de cambio entre el 10 y 20%, mientras que hay dos pequeñas corrientes que vierten al Miño aguas abajo de la confluencia con el río Puga con cambios del orden del 20-25%.

Para el periodo de retorno de 500 años (**Figura A9.3**) los resultados son muy similares a los de 100 años, con la diferencia de que se detectan cambios en un mayor número de corrientes de escasa entidad, principalmente pequeños afluentes del Miño, que llegan a registrar cambios del 20-25%, así como el incremento de la tasa de cambio en algunos afluentes secundarios del orden del 5%.

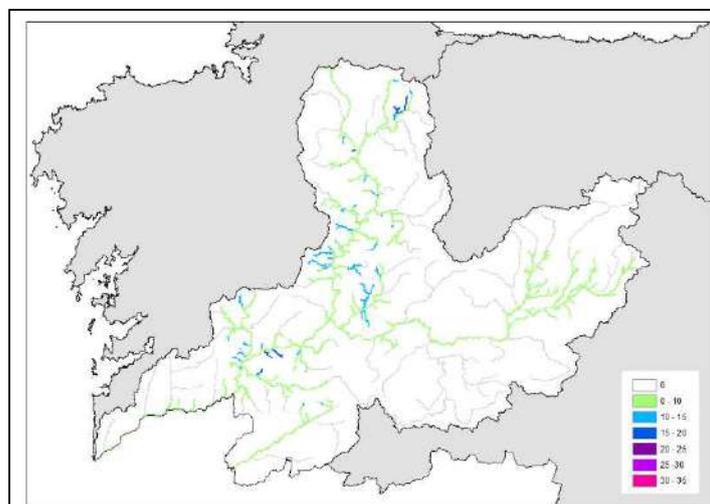


Figura A9.1. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Miño-Sil para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

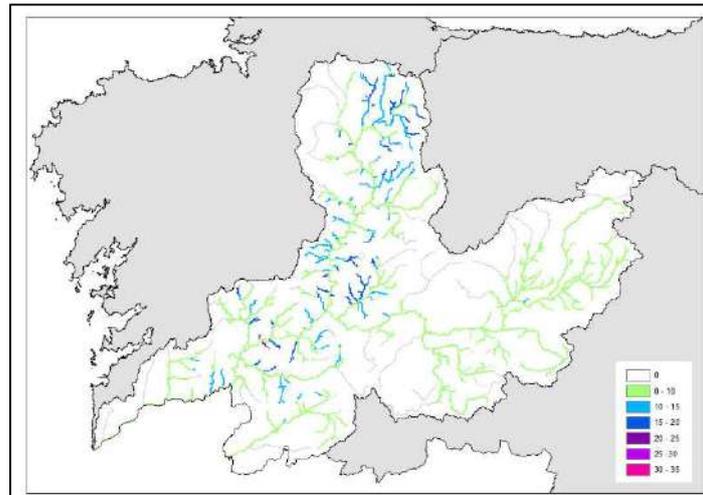


Figura A9.2. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Miño-Sil para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

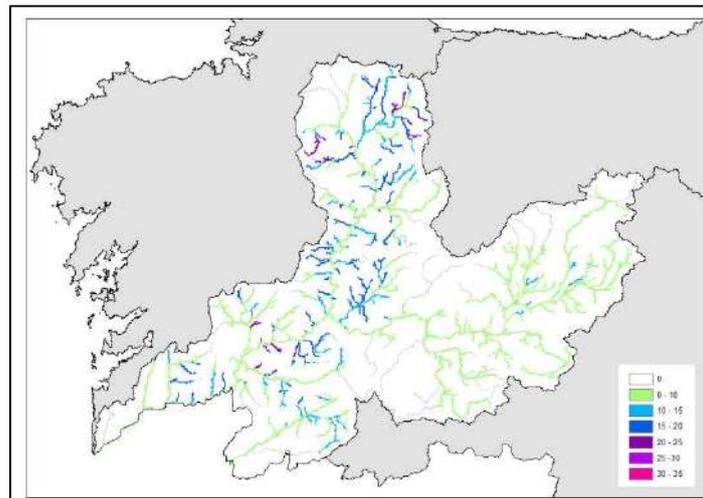


Figura A9.3. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Miño-Sil para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario RCP 8.5 (Figuras A9.4, A9.5 y A9.6), se observa una distribución de los cambios muy similar a la del escenario RCP 4.5, con incrementos de las tasas de cambio en algunas corrientes, si bien en este escenario no llegan a registrarse cambios superiores al 20% en ningún periodo de retorno. En el periodo de retorno de 10 años los cambios son muy similares a los del escenario RCP 4.5, con la red principal afectada en una extensión similar con porcentajes por debajo del 10%. La principal diferencia se produce en determinados afluentes y en la cabecera del Miño que registran cambios más elevados, en torno al 10-15%. En el periodo de retorno de 100 años el Miño aumenta el porcentaje de cambio al orden del 10-15% desde cabecera hasta la confluencia con el Sil, destacando también el río Narla que alcanza valores en torno al 10-15%. La situación se mantiene muy similar para el periodo de retorno de 500 años, con una ligera mayor extensión de los cambios, así como incrementos del porcentaje de cambio en pequeños corrientes de cabecera o afluentes hasta el 15-20%.

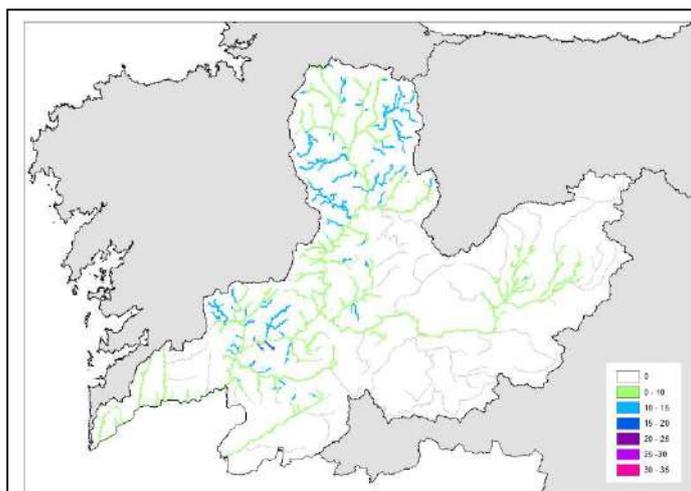


Figura A9.4. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Miño-Sil para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

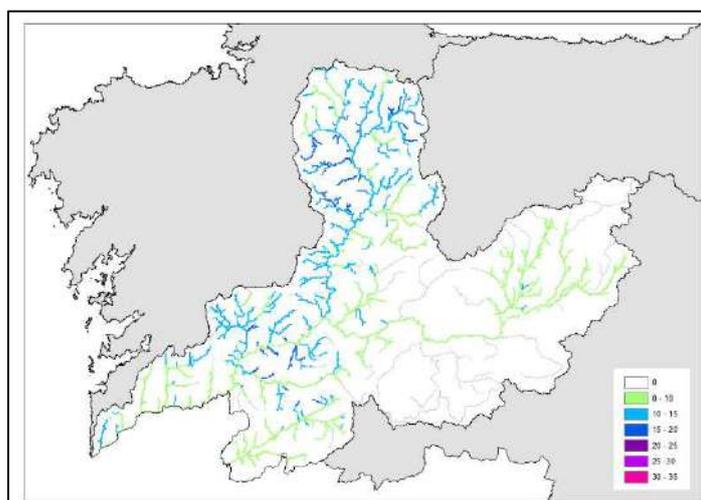


Figura A9.5. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Miño-Sil para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.

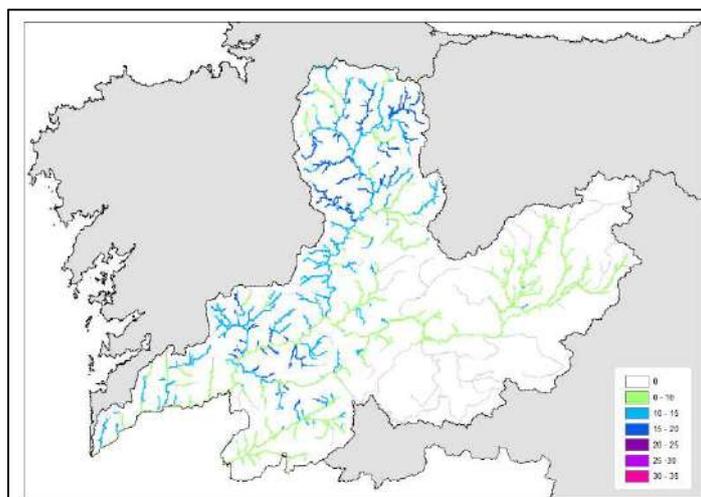


Figura A9.6. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Miño-Sil para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica de Galicia Costa

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada en el escenario RCP 4.5 y para el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.7) son en la mayoría de los casos inferiores al 10%, con algunos afluentes y corrientes menores con porcentajes de cambio entre el 10% y el 15%. Los ríos afectados en el centro y sur de la demarcación son el Tambre (excepto cabecera) y algunos de sus afluentes de la margen derecha en su tramo alto, el Ulla y gran parte de sus afluentes, el Umia y el Lézrez, así como el tramo final del Xallas. En el norte de la demarcación se ven afectados el Mendo y sus afluentes, el Mero y el Mandeo (desde su confluencia con el Mendo), así como los ríos Eume, Sor, Landro, Ouro y Masma, con algunos de sus afluentes, así como algunas corrientes menores que vierten directamente a la costa luguesa.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.8) los cambios alcanzan una extensión similar a la del periodo de retorno de 10 años, con algunos ríos en los que aumenta la longitud afectada, como el Xallas, y otros en los que se reduce, como el Tambre en su tramo alto. Los porcentajes de cambio se incrementan en algunas corrientes, con valores del 10-15% en la cabecera del Ulla y el Arnego en casi toda su extensión, así como en el río Asneiro, el Ouro y la cabecera del Lézrez, y del 15-20% en el tramo alto del Mero y en el río Mendo, entre otros.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.9) los resultados son muy similares a los de 100 años, aumentando ligeramente los cambios respecto a este periodo de retorno en algunas corrientes hasta valores del orden del 20-25%, entre los que destacan los tramos altos de los ríos Mero, Mandeo y Mendo, así como la cabecera de algunos afluentes del Tambre.

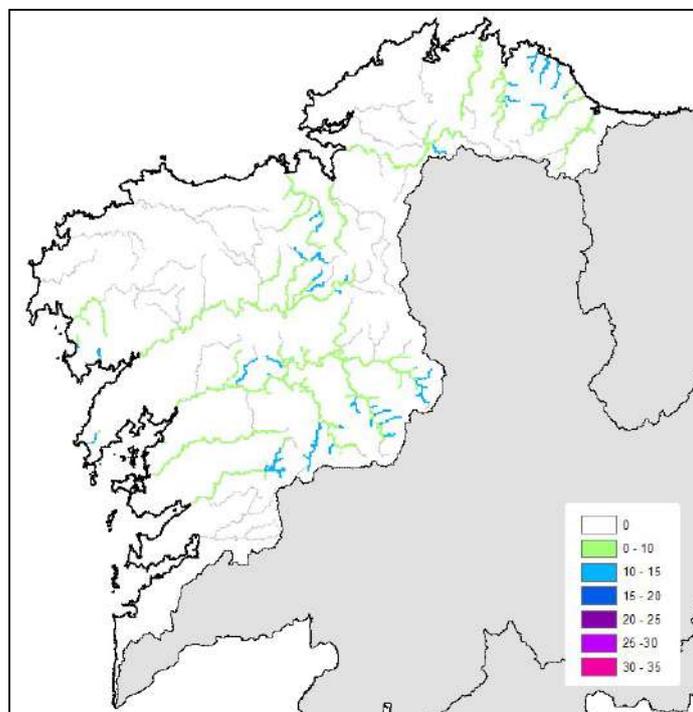


Figura A9.7. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Galicia Costa para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

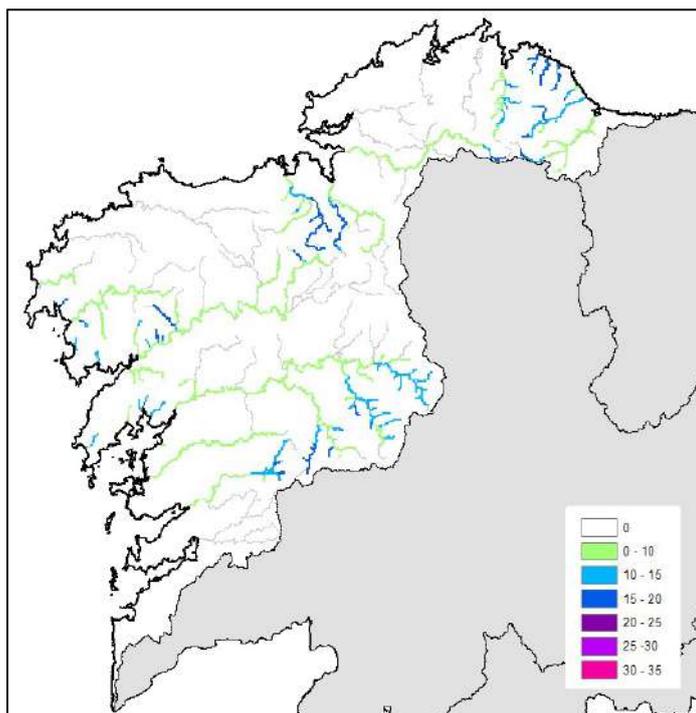


Figura A9.8. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Galicia Costa para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

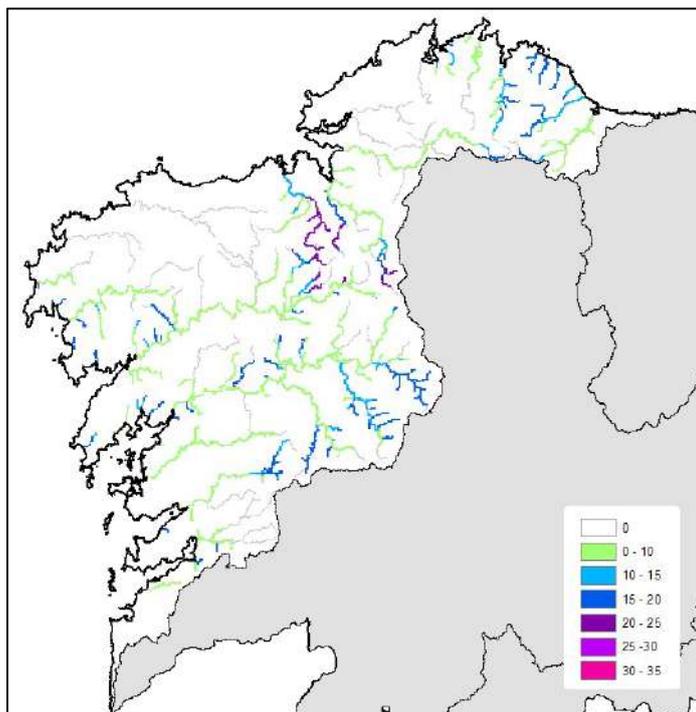


Figura A9.9. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Galicia Costa para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.10, A9.11 y A9.12), se observa para el periodo de retorno de 10 años un aumento de la extensión de los cambios respecto al escenario RCP 4.5, afectando a prácticamente toda la red hídrica de la demarcación, así como un aumento de los porcentajes de cambio, con una

mayor extensión de los valores de entre el 10% y el 15%, afectando principalmente al Ulla en gran parte de su extensión y algunos de sus afluentes, al Lérez, al Tambre en su tramo alto, al Mero, Mandeo y Mendo en gran parte de su extensión, al O Castro, al río Grande de Xubia, al río das Forcadas y al río Mera. Para el periodo de retorno de 100 años la extensión de los cambios del orden del 10-15% aumenta, afectando a casi toda la red hídrica, llegando en algunas corrientes al rango del 15-20% (tramo alto del Tambre y algunos afluentes del Ulla). Para el periodo de retorno de 500 años la situación es muy similar, observándose incrementos en los porcentajes de cambio en algunas corrientes hasta alcanzar también valores en el rango del 15-20% (tramo alto de los ríos Lérez, Mero, Mendo y Mandeo).

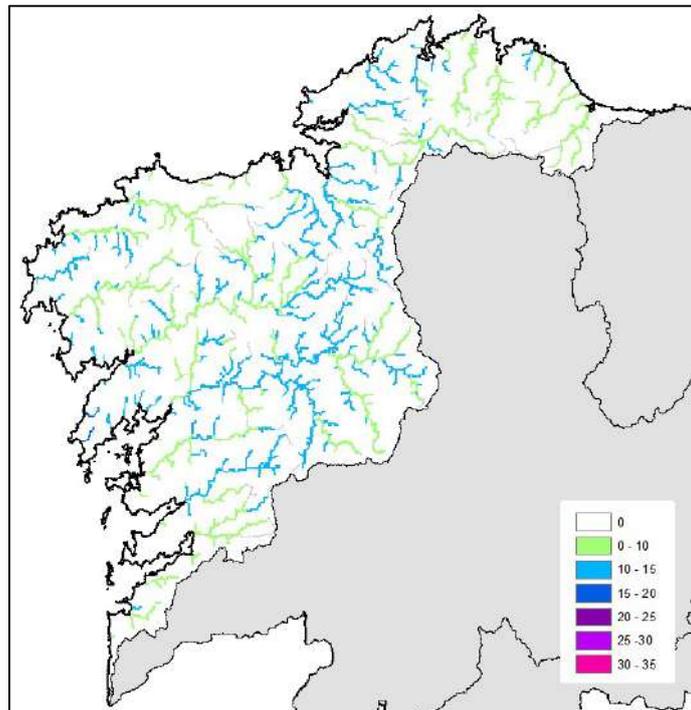


Figura A9.10. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Galicia Costa para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

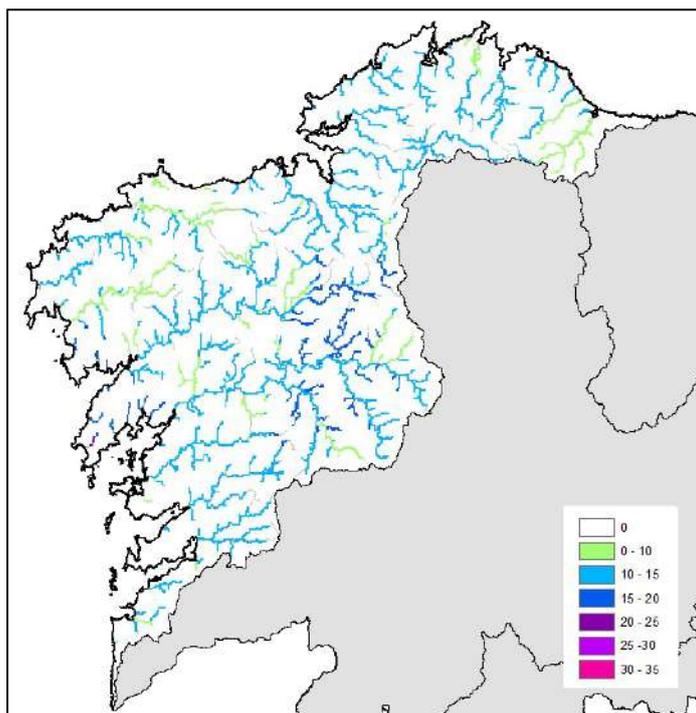


Figura A9.11. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Galicia Costa para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.

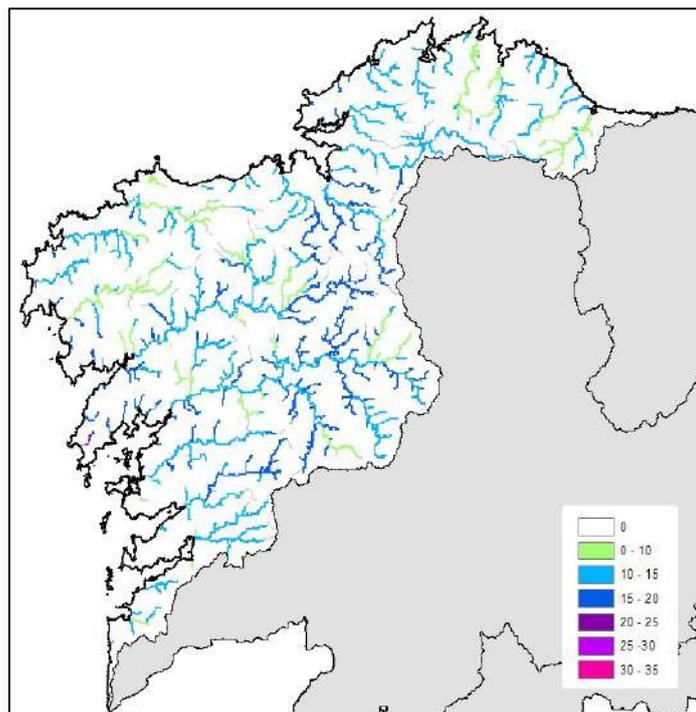


Figura A9.12. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Galicia Costa para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.13) son muy escasos y de magnitud muy reducida, por debajo del 10% en general. Las corrientes afectadas son el eje principal del río Caudal y del Nalón a partir de su confluencia con éste, el Sella en toda su extensión y los tramos finales del Eo y del Porcia, en los que se aprecian pequeños tramos con cambios del orden del 10-15%, al oeste de la demarcación.

En el periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.14) se mantienen los cambios en las corrientes mencionadas, ampliándose a toda la extensión del Eo, así como al río Ser y al Navia desde su confluencia con éste, y al río Coto y al Narcea a partir de su confluencia con éste. También se verían afectadas las corrientes que llegan al estuario de Avilés. Los cambios son en su mayoría inferiores al 10%, salvo pequeños tramos de cabecera o pequeños afluentes que presentan cambios del orden del 10-15%.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.15) los resultados son muy similares a los de 100 años, ampliándose a todas las corrientes en la cuenca alta del Navia, así como a los afluentes del Narcea en cabecera, el río Nora y su afluente el Noreña, y el río Dobra. La mayoría de cambios se mantienen por debajo del 10%, excepto los afluentes de la margen izquierda del Narcea (Arganza, Coto y Muniellos) y algunos pequeños afluentes del Navia, que alcanzan valores de hasta un 15-20%.

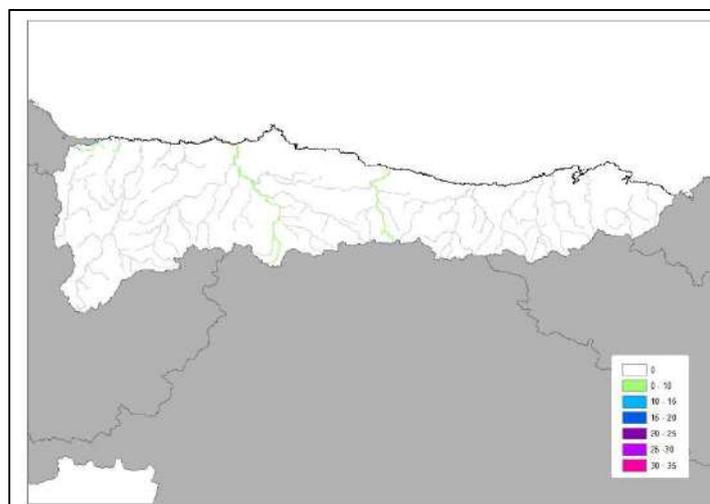


Figura A9.13. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Occidental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

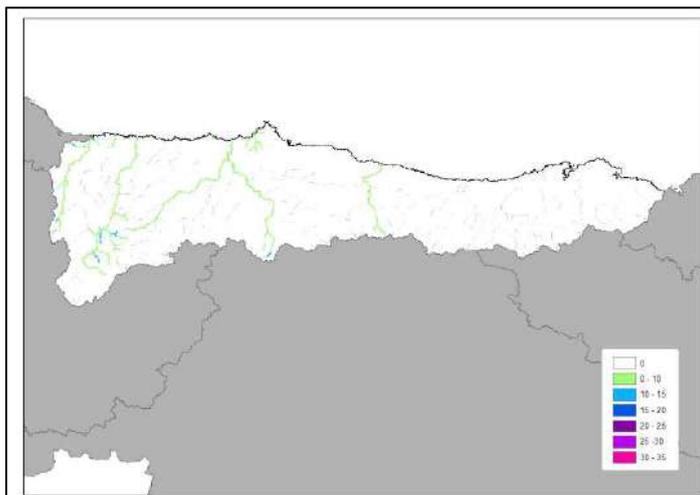


Figura A9.14. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Occidental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

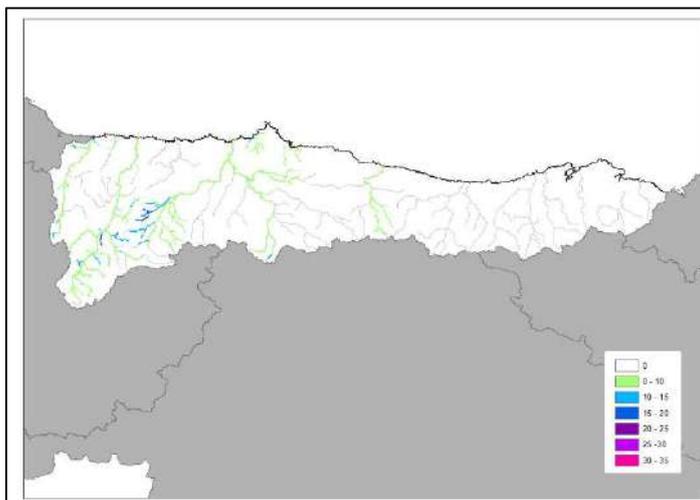


Figura A9.15. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Occidental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario RCP 8.5 (Figuras A9.16, A9.17 y A9.18), en el periodo de retorno de 10 años se observa un aumento del número de corrientes afectadas respecto al escenario RCP 4.5. Estas están concentradas principalmente en la mitad occidental de la demarcación: el río Eo y sus afluentes, el río Navia (excepto cabecera) y gran parte de sus afluentes, el río Coto y el Narcea desde se confluencia con éste, el río Esva en casi toda su extensión y el tramo final del río Negro. También se verían afectadas en el extremo oriental de la demarcación los ríos Agüera, Mioño y Sámano. Al igual que ocurría en el escenario RCP 8.5, la mayoría de los cambios serían inferiores al 10 %, excepto en algunos pequeños afluentes o tramos de cabecera. En el periodo de retorno de 100 años la situación es muy similar, extendiéndose los cambios a algunos afluentes de las corrientes ya mencionadas, algunos con cambios del orden del 10-15%. También aparecen cambios, inferiores al 10%, en el río Caudal y el Nalón a partir de su confluencia con éste, en las corrientes de la cuenca baja del Deva y el Nansa, en los ríos Saja y Besaya, y en el Asón. En el periodo de retorno de 500 años la situación es igualmente muy similar, extendiéndose los cambios a algunos afluentes de los río principales

mencionados y aumentando el porcentaje de cambio en algunos casos hasta el 15-20%, siempre en corrientes menores.

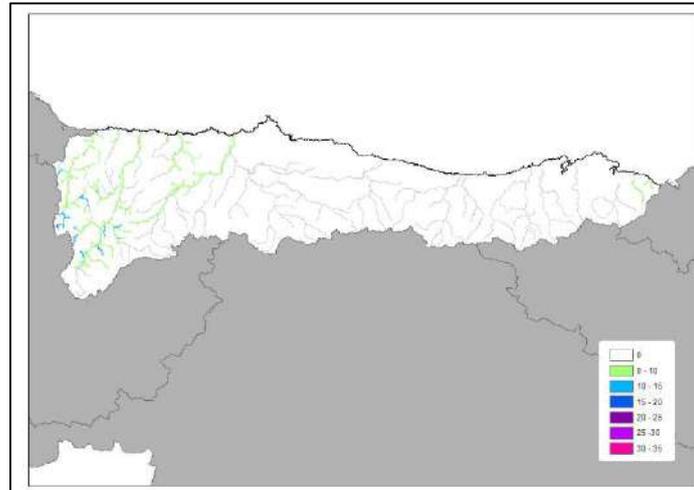


Figura A9.16. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Occidental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

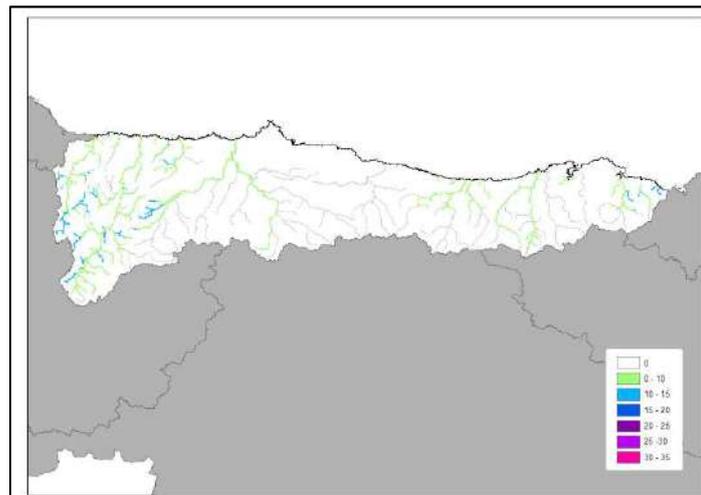


Figura A9.17. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Occidental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

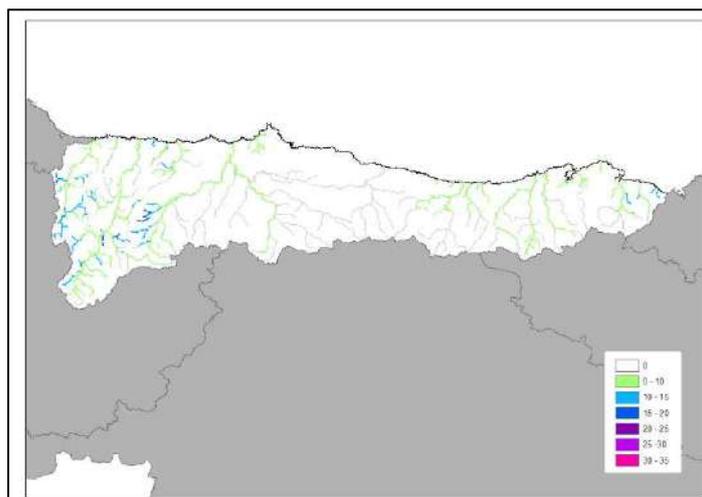


Figura A9.18. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Occidental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.19) son muy escasos y de una magnitud muy reducida. Aparecen cambios inferiores al 10% en el tramo del Bidasoa aguas abajo de la confluencia con el Latsa, y en los cursos fluviales de las cuencas de los ríos Nive y Nivelles. El resto de la red fluvial de la demarcación no presenta cambios.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.20) los cambios, también inferiores al 10%, se extienden a la cabecera del Bidasoa.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.21) los resultados son prácticamente idénticos a los obtenidos para 100 años, aumentando ligeramente los porcentajes de cambio respecto a ese periodo de retorno.

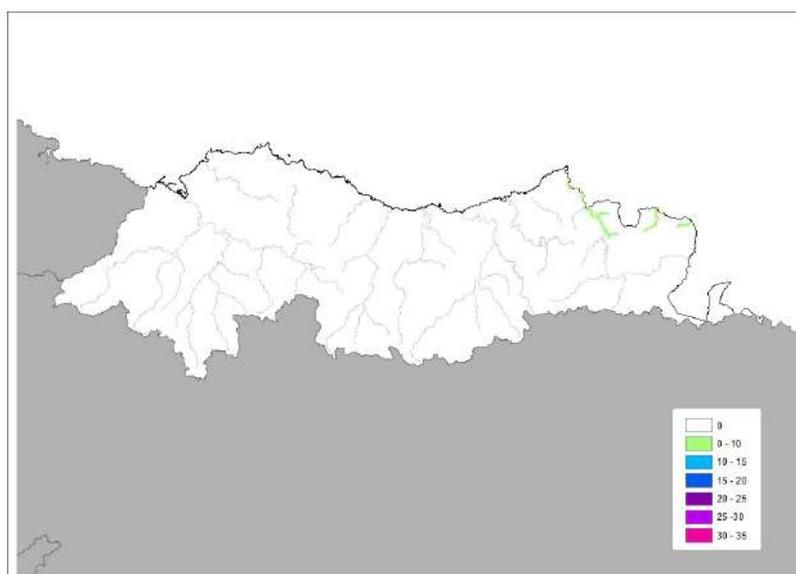


Figura A9.19. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Oriental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

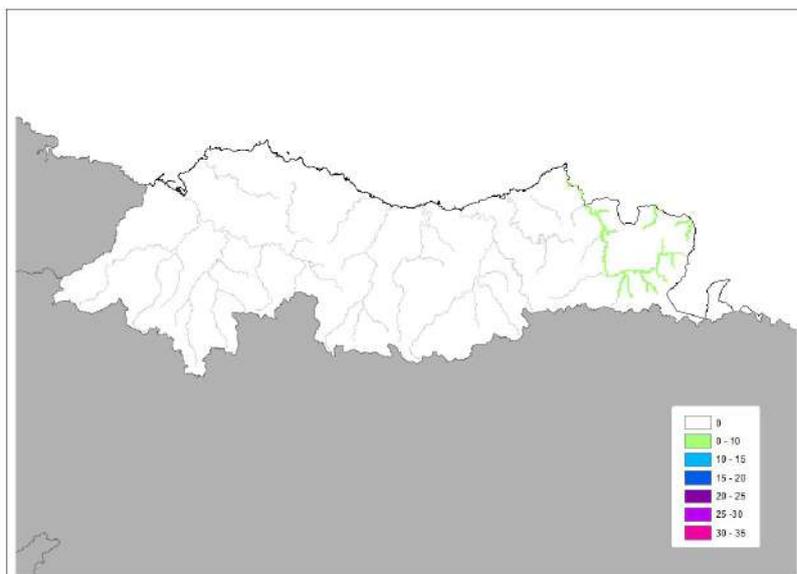


Figura A9.20. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Oriental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

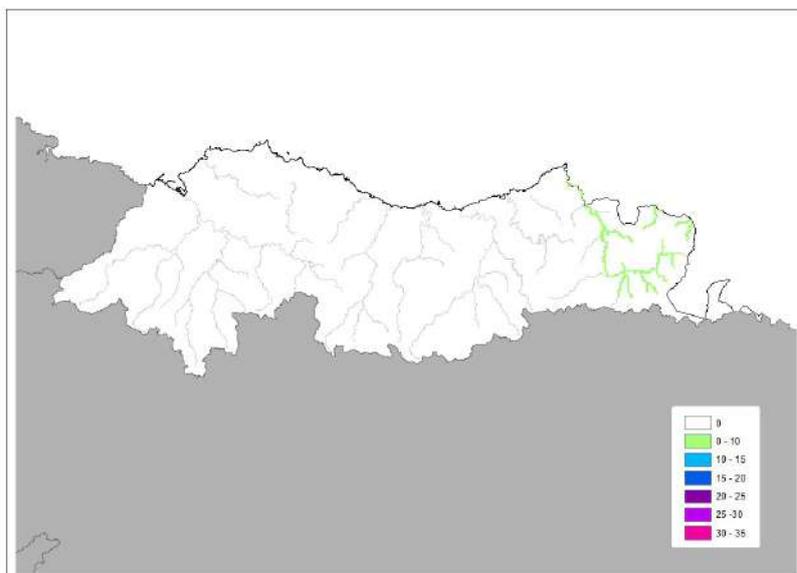


Figura A9.21. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Oriental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.22, A9.23 y A9.24), se observa que los cambios afectan a un número mucho mayor de ríos respecto a lo que ocurría para el escenario RCP 4.5. En concreto, para el periodo de retorno de 10 años, aparecen cambios en el eje del Bidasoa hasta su cabecera, en los tramos bajos de los ríos Oyarzun, Urumea, Oria aguas abajo de la confluencia con el Arratxe, Urola, Deva, Artibay, Oca, Butrón, y Nervión aguas abajo de la confluencia con el San Martín, así como en los cursos fluviales de las cuencas de los ríos Nive y Nivelles, entre otros, sin superar en ningún caso el 10%. A medida que aumenta el periodo de retorno los cambios, aunque esencialmente se localizan en los mismos tramos que para el periodo de retorno de 10 años (destaca la cabecera del Bidasoa que no se ve afectada para el periodo de retorno de 100 años), ven

ligeramente incrementado su valor, alcanzando para 500 años porcentajes que superan el 10% en algunas zonas.

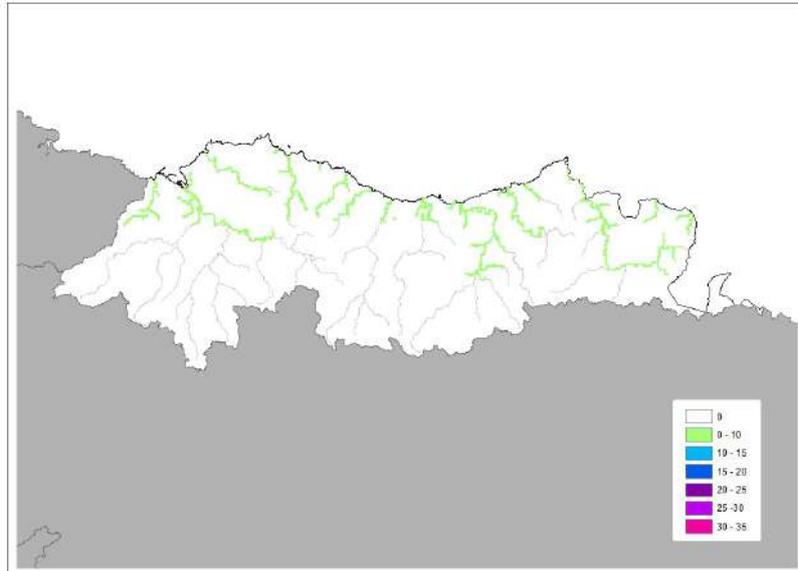


Figura A9.22. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Oriental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

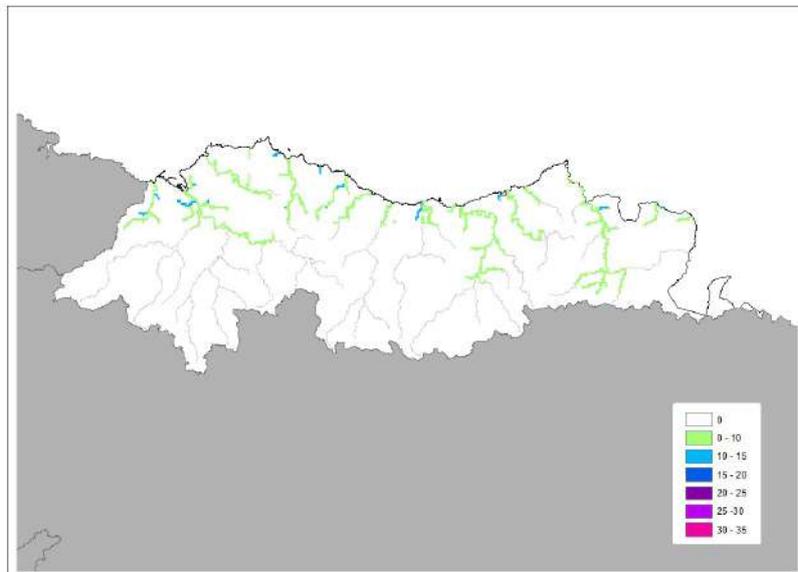


Figura A9.23. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Oriental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

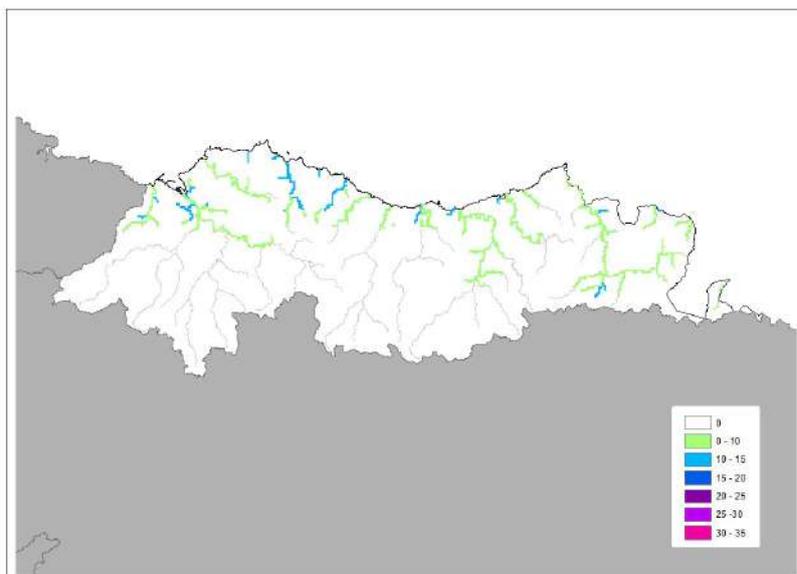


Figura A9.24. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Cantábrico Oriental para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Duero

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.25) se extienden a prácticamente la totalidad de la cuenca con valores reducidos, inferiores al 10 o 15%, con excepciones en la cabecera y algunas corrientes de la margen derecha como el Tera y el Salado, donde no hay cambio. Aparecen cambios mayores en pequeños afluentes de la cuenca del Pisuerga en la margen derecha de la cuenca y en el Tormes, Zapardiel y Cega en la margen izquierda, con valores superiores al 15%, y sobrepasando el 20% en escasos tramos de cabecera de los ríos Guareña, Trabancos, Adaja, y Duratón.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.26) los cambios, se amplían a prácticamente toda la red fluvial aunque en su mayoría sigue tratándose de tasas inferiores al 15%. Las zonas con mayores porcentajes de cambio se localizan en los mismos cursos fluviales descritos en el párrafo anterior, que incrementan sus valores del orden de un 5%, llegando en este periodo de retorno a superar el 25%.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.27) los resultados son muy similares a los de 100 años, aumentando ligeramente los porcentajes de cambio respecto a este periodo de retorno. Los porcentajes mayores, que sólo en algunos tramos sobrepasan el 30%, se concentran en los mismos ríos indicados anteriormente para los periodos de retorno de 10 y 100 años.

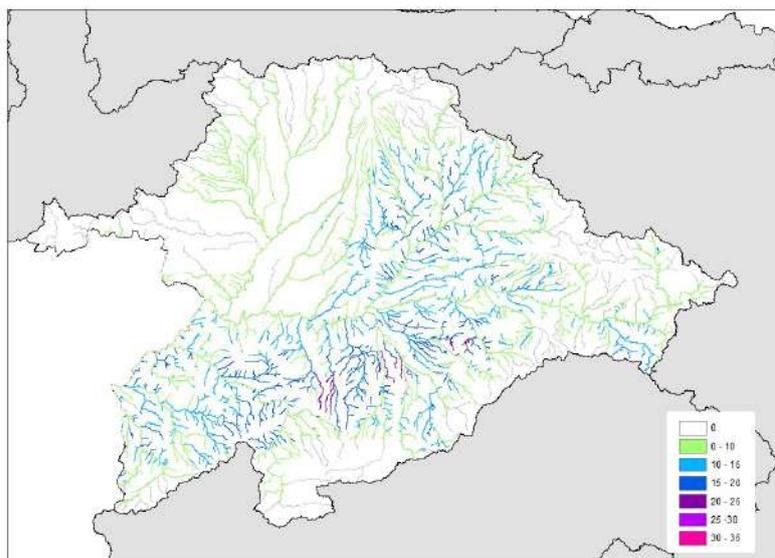


Figura A9.25. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Duero para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

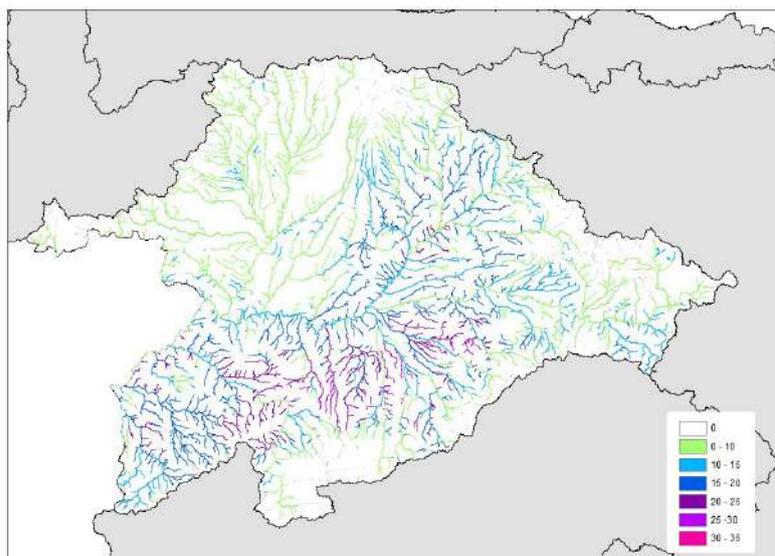


Figura A9.26. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Duero para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

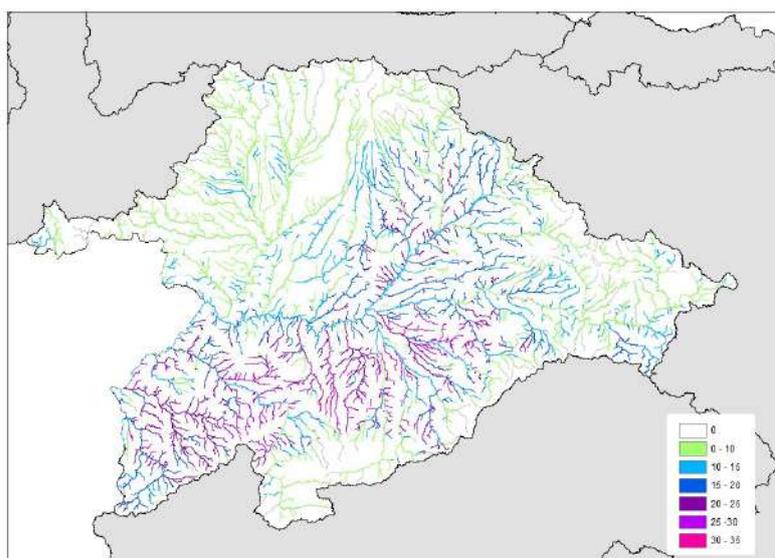


Figura A9.27. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Duero para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.28, A9.29 y A9.30), tal como se comentó en el apartado 4, se observa una disminución general de los porcentajes de cambio respecto al escenario RCP 4.5. En concreto, en este escenario, para el periodo de retorno de 10 años los cambios son muy escasos y en su mayor parte menores del 10%, no superándose en ningún caso el 20%. Coinciden, sin embargo, en general, las zonas con mayores tasas con las correspondientes al RCP 4.5, es decir, cuencas de la margen izquierda desde el Tormes al Duratón. A medida que aumenta el periodo de retorno los cambios porcentuales se ven incrementados llegando para 500 años a porcentajes que en algunos tramos superan el 30%, presentando una distribución espacial muy similar a la ya

comentada, aunque con porcentajes menores que los correspondientes al mismo periodo de retorno en el escenario RCP 4.5.

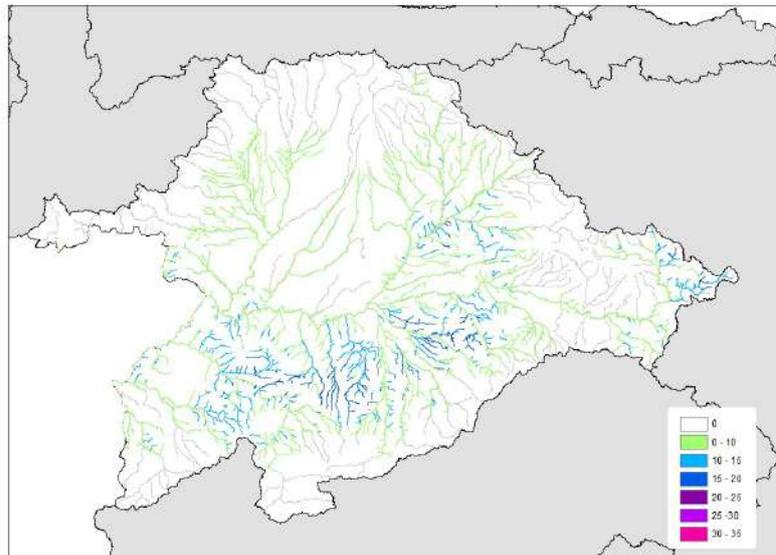


Figura A9.28. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Duero para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

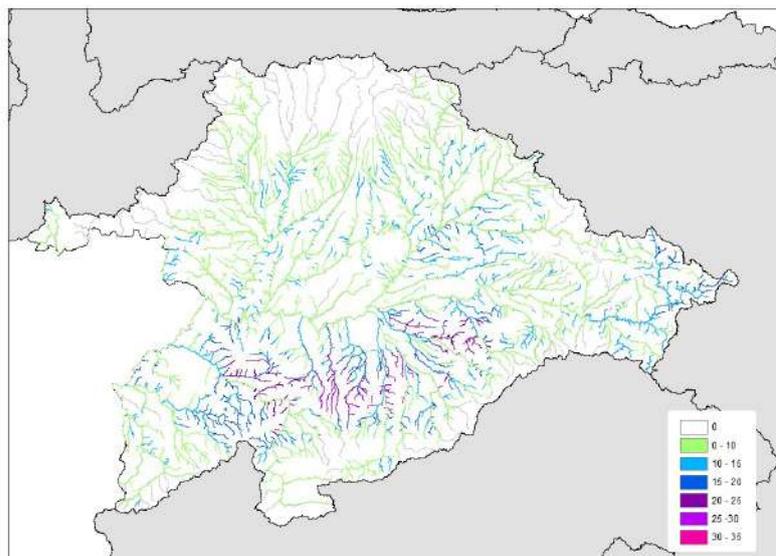


Figura A9.29. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Duero para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

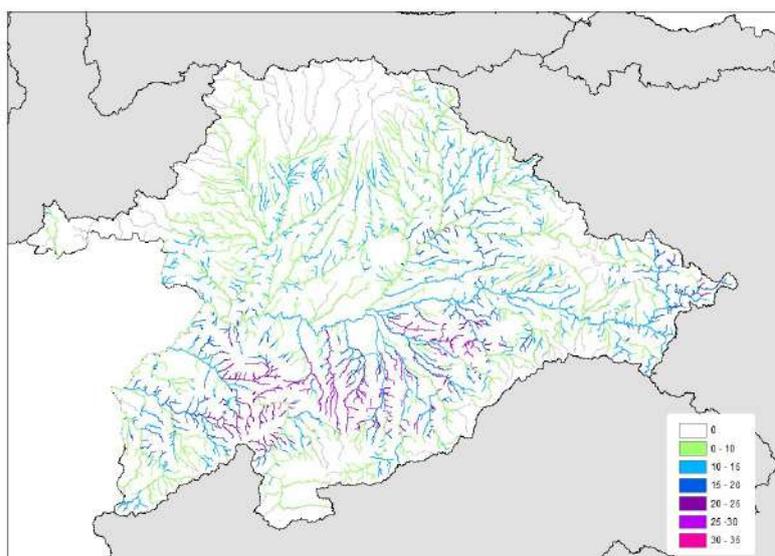


Figura A9.30. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Duero para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Tajo

Comenzando la descripción de los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada por el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.31), se observa que las corrientes principales (Tajo, Guadiela, Tajuña, Henares, Jarama, Guadarrama, Alberche, Tiétar) presentan cambios ligeros, inferiores al 10%, en casi toda su extensión menos en las cabeceras, que en general no presentan cambios excepto en el caso del Henares y el Alagón que presentan cambios inferiores al 10% en el Henares y en torno al 10-20% en el Alagón en sus respectivas cabeceras. Los cambios en torno al 10-20% aparecen mayoritariamente en corrientes pequeñas, afluentes de las principales. Destacarían los afluentes del Tajuña, especialmente en la margen izquierda del tramo medio, y los del Guadarrama, destacando el Aulencia y el Vallehermoso. También los afluentes del Alberche, Cofio, Perales y Yuntas, así como los del Tiétar, destacando el Santamaría y el Calzones. También aparecen estos cambios en corrientes de mayor entidad, como el río Mayor y el Guadamejud, que confluyen antes de unirse al Guadiela, el Aguilucha, Pedroso y Gualija, afluentes del Tajo por su margen izquierda en el tramo medio, el Tamuja y Tozo, afluentes del Almonte y los ríos Salor y Erjas en casi toda su extensión.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.32) aumenta el número de corrientes con cambios, así como la magnitud de los mismos. Con cambios entre un 10 y 15% destaca el tramo del Tajo previo a su confluencia con el Jarama, así como el tramo final del Tajuña y el Alagón y el Erjas en toda su extensión. El río Almonte y sus afluentes presentarían cambios en torno al 10-20% en casi toda su extensión, llegando en algunos ríos de cabecera al 20-25%. El río Salor también presentaría cambios del 20-25% en su tramo inicial, pasando a registrar cambios del 15-20% en el tramo final. También se registran cambios del orden del 20-25% en algunas corrientes pequeñas, destacando el río Aulencia, el Yuntas y el Arlas.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.33) los resultados se acentúan respecto a los de 100 años, aumentando el número de corrientes con cambios del 20-25% y apareciendo algunas con cambios en torno al 25-30%, especialmente en el tramo bajo de la cuenca, destacando los ríos Salor y Almonte y sus afluentes, así como pequeños afluentes del Alagón y del Tajo en este tramo. También se registran aumentos importantes de los porcentajes de cambio en pequeños afluentes del Tajo en su tramo alto, así como en los del Tajuña y en los ríos Mayor y Guadamejud. Por último, destacan el tramo medio de la cuenca del río Cofio y sus afluentes y el río Aulencia presentando cambios en torno al 25-30%.

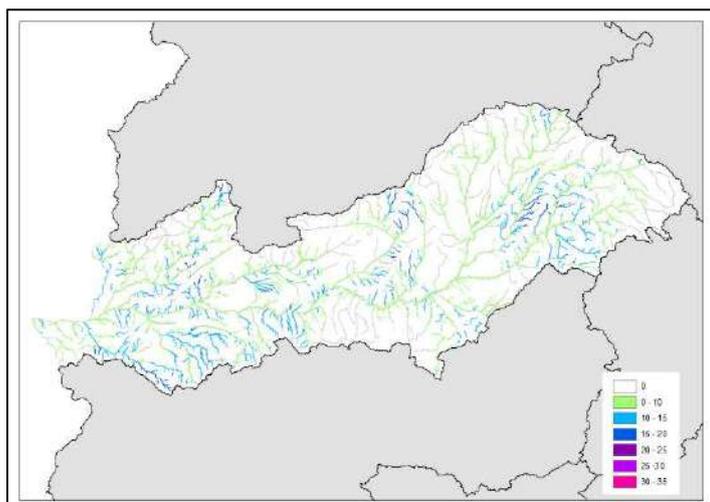


Figura A9.31. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tajo para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

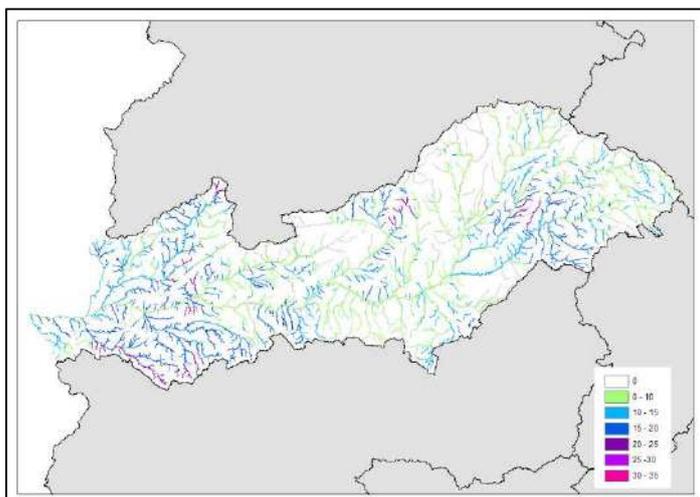


Figura A9.32. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tajo para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

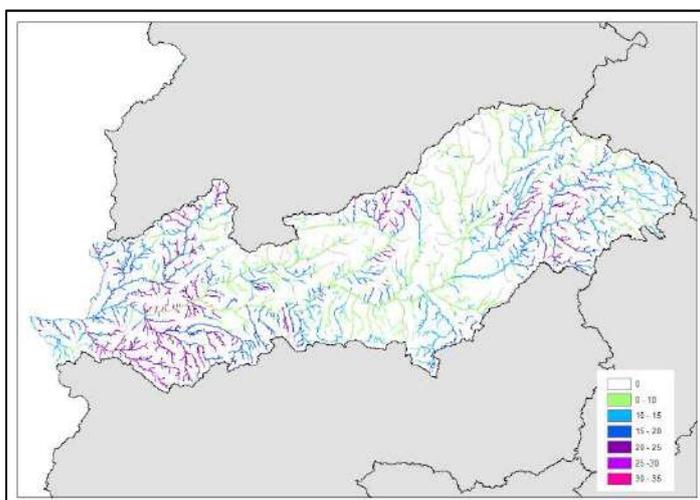


Figura A9.33. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tajo para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario RCP 8.5 (Figuras A9.34, A9.35 y A9.36), se observa menos corrientes afectadas y porcentajes en general menores respecto al escenario RCP 4.5. En el periodo de retorno de 10 años, solo aparecen las corrientes principales afectadas por cambios de magnitud inferiores al 10%, como ya ocurría en el escenario RCP 4.5, aunque en este caso el Tiétar no registraría cambios, así como pequeñas corrientes con cambios del orden del 10-15%. A medida que aumenta el periodo de retorno aumenta el número de corrientes afectadas, así como el porcentaje de cambio en algunas de ellas. Para el periodo de retorno de 100 años aparecen muchas más corrientes de escasa entidad con cambios inferiores al 10%. También presenta cambios inferiores al 10% el tramo bajo del Tiétar. Es en la parte alta de la cuenca del Tajo donde se producen los mayores incrementos en los cuantiles, con cambios en torno al 10-15% en el Alto Tajo, así como en los ríos Mayor y Guadamejud. En el periodo de retorno de 500 años aumentan las corrientes con una tasa de cambio del 10-15%, destacando todo el tramo alto del Tajo antes de su confluencia con el Jarama, llegando a alcanzarse en algunos puntos porcentajes por encima del 20%.

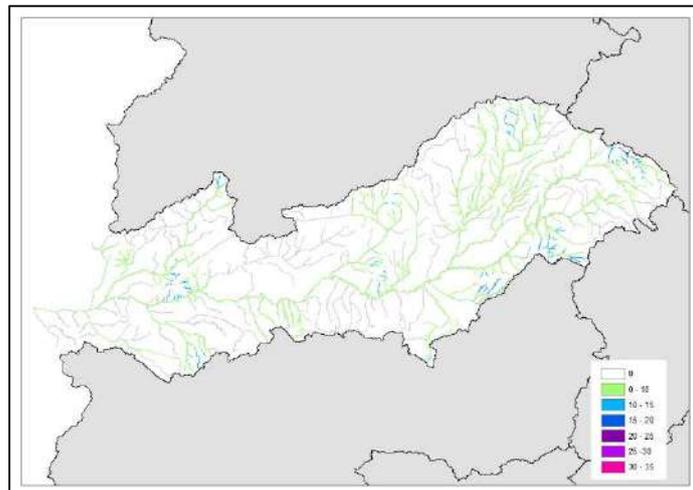


Figura A9.34. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tajo para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

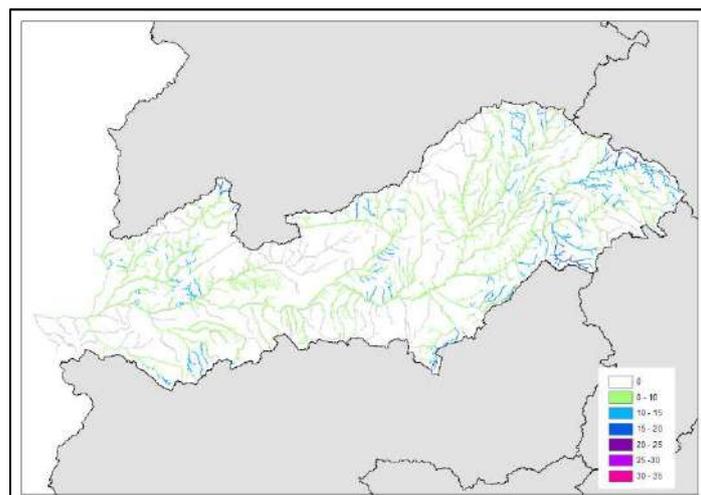


Figura A9.35. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tajo para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

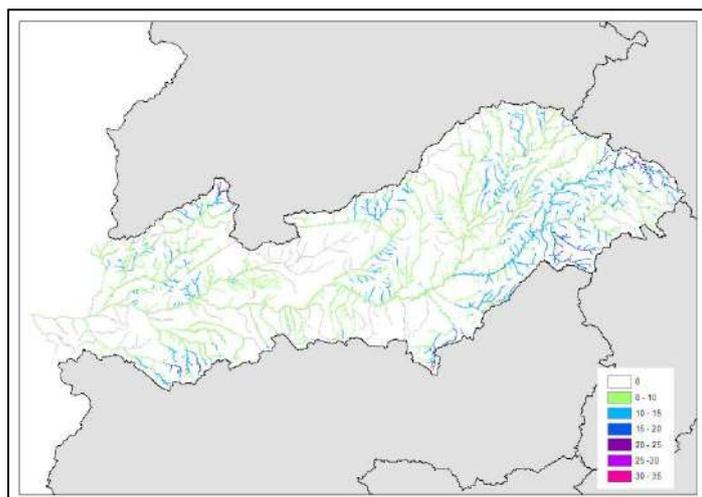


Figura A9.36. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tajo para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Guadiana

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.37) son en la mayor parte de la Demarcación de una magnitud muy reducida, no superando en la mayor parte de los tramos el 10%. Los mayores porcentajes se sitúan entre el 15% y el 20% en algunos tramos localizados, afectando en mayor medida a pequeños afluentes del Guadiana en su margen derecha desde la desembocadura del río Ruecas al Olivenza.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.38), los cambios, que se ven incrementados respecto al periodo de retorno anterior en torno a un 5%, se extienden a casi toda la red fluvial exceptuando algunos tramos de la cabecera del Azuer y el Jabalón, que no presentan cambios. Las zonas con mayores porcentajes de cambio, que en este caso pueden alcanzar en tramos puntuales valores próximos al 30%, se localizan en los pequeños afluentes del Guadiana por su margen derecha mencionados anteriormente, a los que ahora se añaden algunos tramos de afluentes del Guadiana por la margen izquierda, entre los ríos Zújar y Frega Muñoz.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.39) los resultados son muy similares a los de 100 años, aumentando ligeramente los valores de cambio respecto a este periodo de retorno. Los tramos con porcentajes mayores, que pueden superar de forma puntual el 30%, se concentran, al igual que antes, en los afluentes del Guadiana por ambas márgenes entre el Zújar y el Ardila en la margen izquierda y el Ruecas y el Gévora en la derecha.

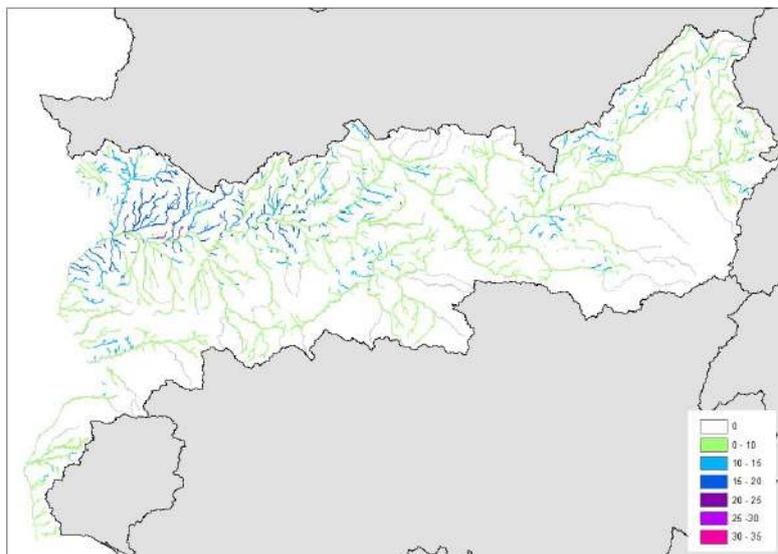


Figura A9.37. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadiana para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

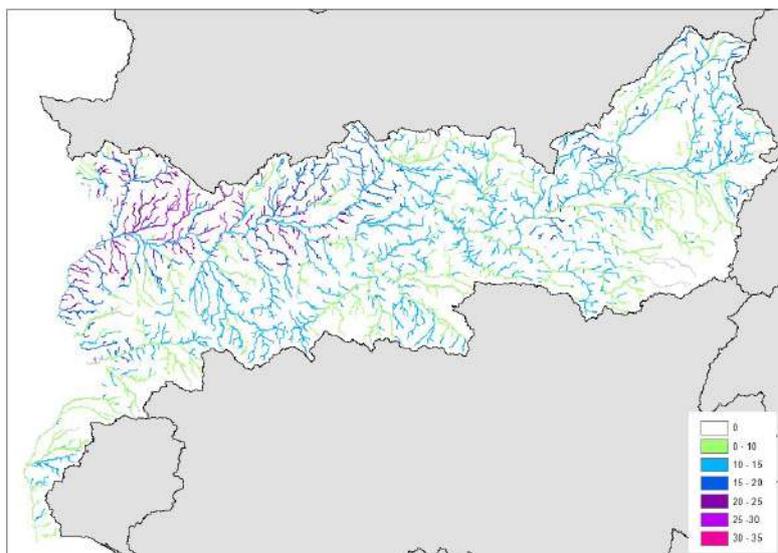


Figura A9.38. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadiana para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

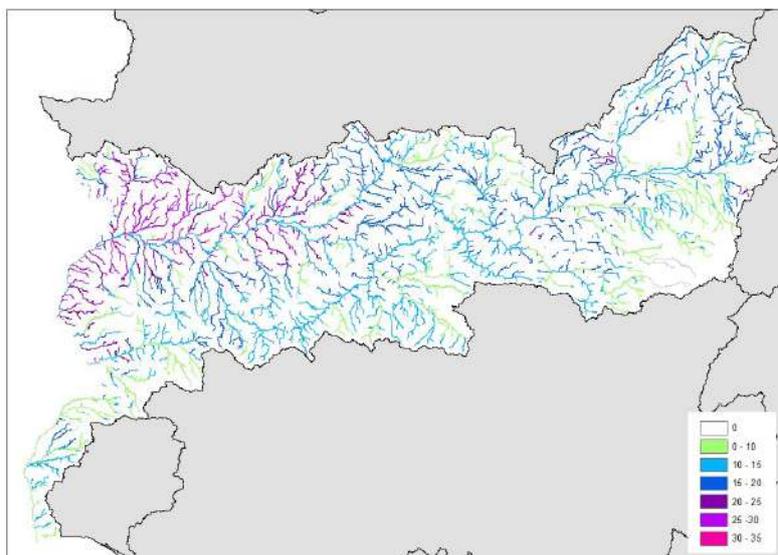


Figura A9.39. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadiana para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.40, A9.41 y A9.42), se observa cómo, en general, la magnitud de los mayores porcentajes de cambio alcanzados en cada periodo de retorno son parecidos a los del escenario RCP 4.5, aunque localizados en zonas geográficas diferentes. Para 10 años de periodo de retorno los cambios se concentran prácticamente sólo en la cabecera. A medida que aumenta el periodo de retorno los cambios porcentuales se ven incrementados llegando para 500 años a porcentajes que en algunos tramos de las cuencas de la cabecera, sobre todo en la del Cigüela, superan el 30%, manteniéndose el resto de los ríos de la demarcación fuera del ámbito geográfico de la cabecera en porcentajes de cambio que en la mayoría de los casos no superan el 15%.

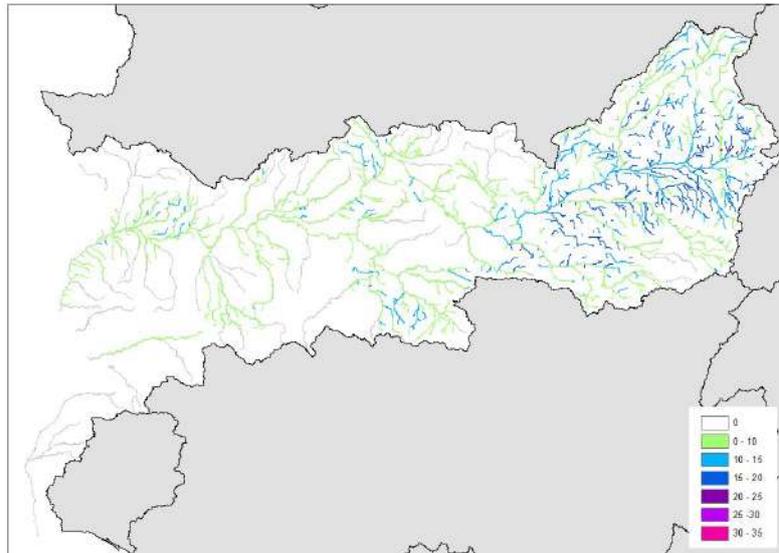


Figura A9.40. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadiana para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

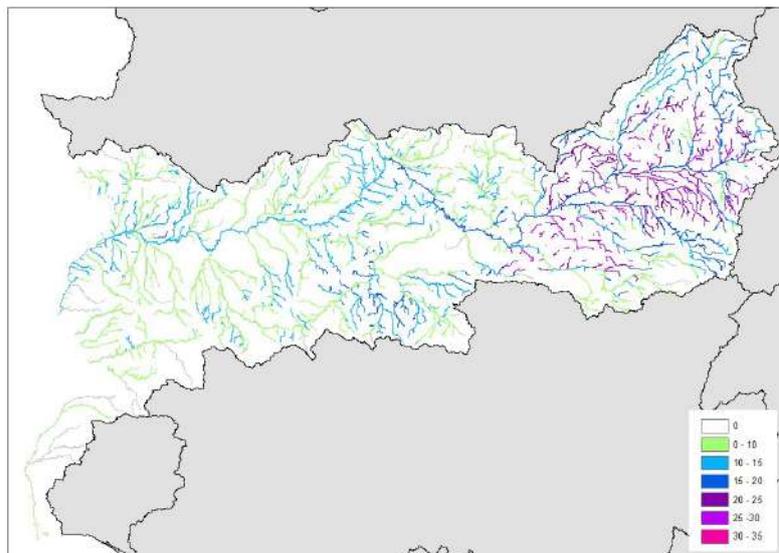


Figura A9.41. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadiana para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

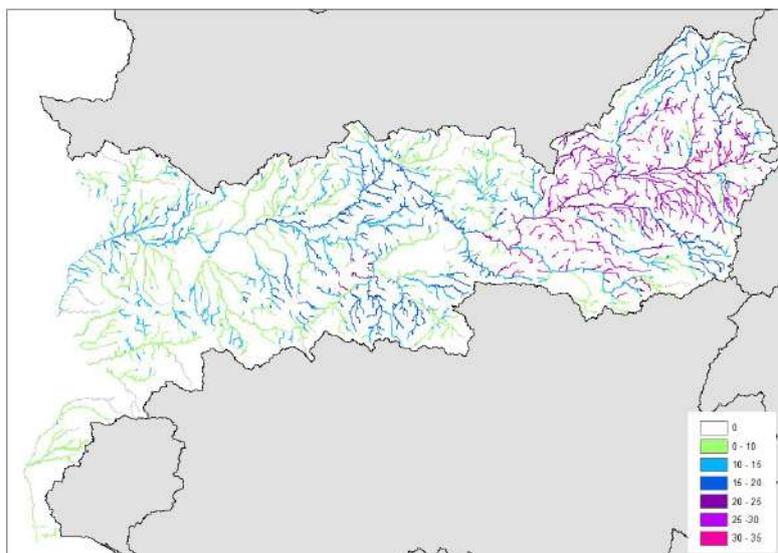


Figura A9.42. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadiana para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.43) son muy escasos y de una magnitud muy reducida. Aparecen cambios inferiores al 10% en los principales ejes de la cuenca, excluyendo la zona de cabecera, entre los que destacan el eje del Genil y del Guadalquivir. Los cambios de mayor magnitud toman valores de entre el 10% y el 15% y afectan a unos pocos tramos concentrados entre el río Galapagares y Madre de Fuentes.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.44) los cambios, en su mayoría inferiores al 10%, se amplían a casi toda la red fluvial, incluyendo todos los afluentes hasta desembocadura desde el Guadalimar por la margen derecha y desde el Genil por la izquierda. Las zonas con mayores porcentajes de cambio no superan el 15 % tampoco para este periodo de retorno, localizándose en los mismos tramos descritos anteriormente para el periodo de retorno de 10 años a los que se unen algunos más en las cabeceras de los ríos Jándula, Guadalmeñato, Bembézar y Viar, entre otros.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.45) los resultados son muy similares a los de 100 años, manteniéndose los cambios por debajo del 15%. Las zonas con mayores porcentajes de cambio coinciden con las expuestas anteriormente para el periodo de retorno de 100 años, extendiéndose a un mayor número de tramos.

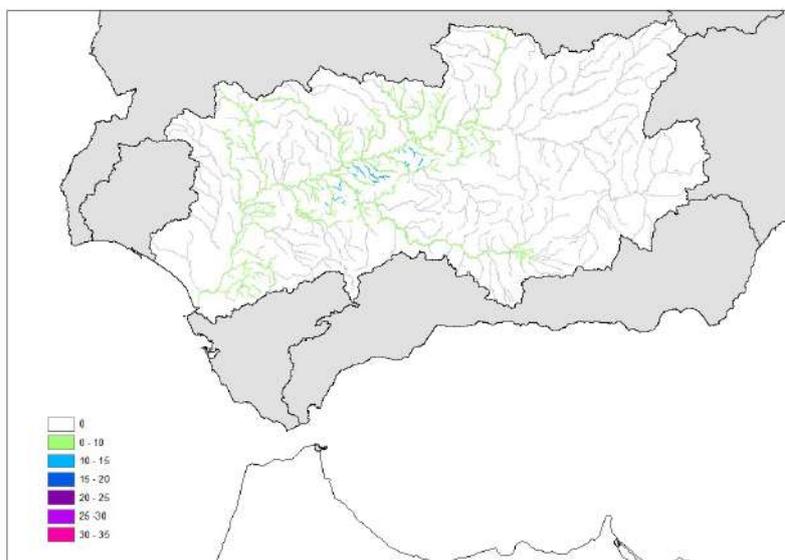


Figura A9.43. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadalquivir para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

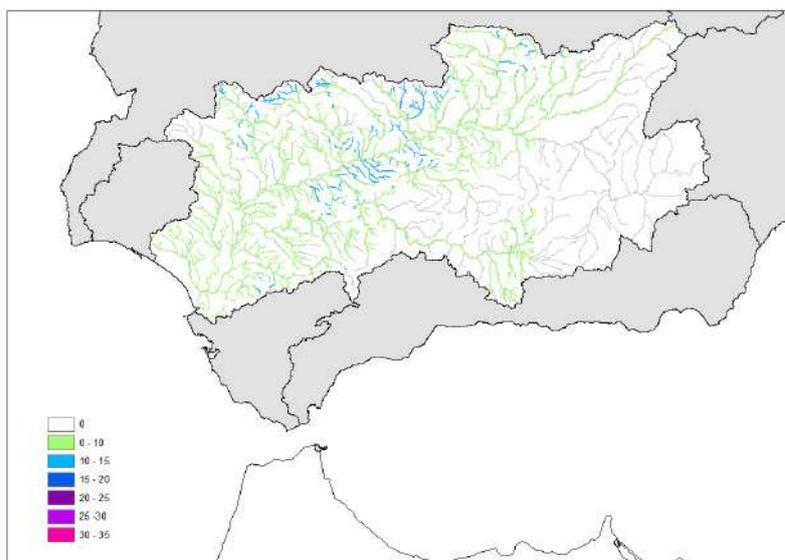


Figura A9.44. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadalquivir para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

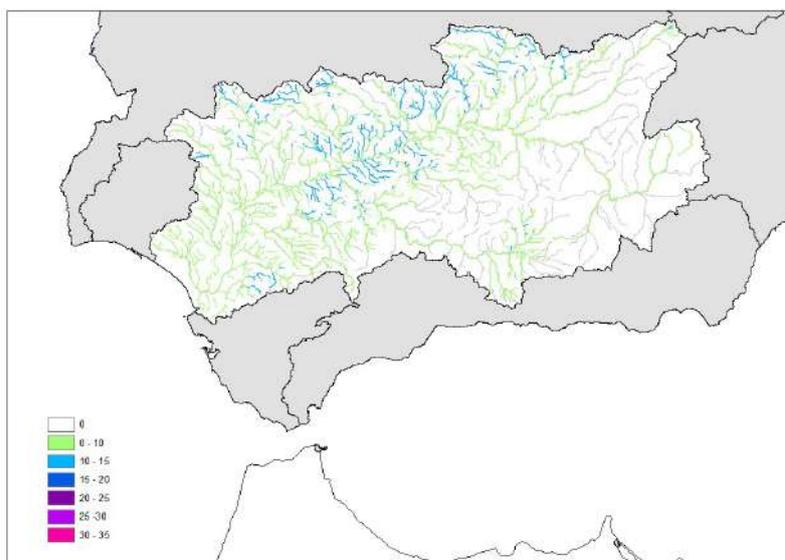


Figura A9.45. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadalquivir para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.46, A9.47 y A9.48), se observa una disminución general de los tramos afectados y, en general, de la magnitud de los porcentajes respecto al escenario RCP 4.5 que, en concreto, para el periodo de retorno de 10 años, son prácticamente inexistentes en toda la red fluvial, exceptuando cambios menores del 10% en algunos afluentes en la margen derecha, como el Guadalimar, Jándula y Guadalmeñato (se alcanzan valores superiores al 10% en pequeños cauces de la cabecera de los dos primeros ríos), y el eje del Guadalquivir aguas abajo de la confluencia con el primero de estos afluentes. El mapa de cambios en la precipitación acumulada para 100 años de periodo de retorno es similar al descrito para 10 años, extendiéndose a la margen izquierda los tramos con cambios, también menores del 10 %, entre los que destaca el

eje del Genil, el Corbones y el Guadaira. Destacan algunos tramos con valores cercanos al 20% en la cabecera de los ríos Guadalimar y Jándula, que para 500 años alcanzan porcentajes próximos al 25%. Para este último periodo de retorno las zonas con cambios se extienden a algunos ejes fluviales de la margen izquierda, entre los que destaca el Guadiana Menor y el Guadajoz.

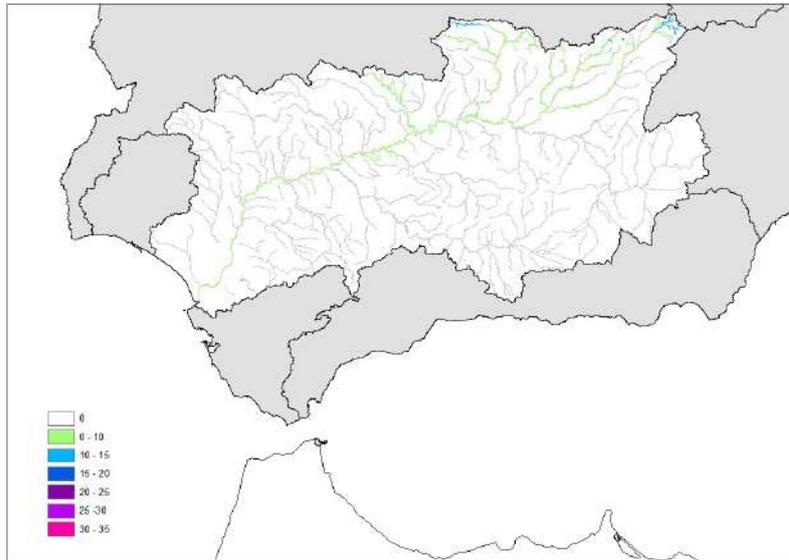


Figura A9.46. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadalquivir para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

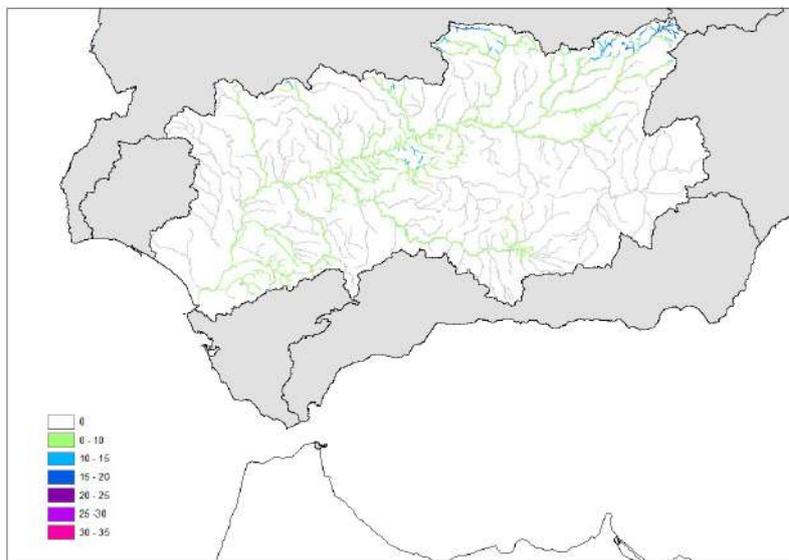


Figura A9.47. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadalquivir para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

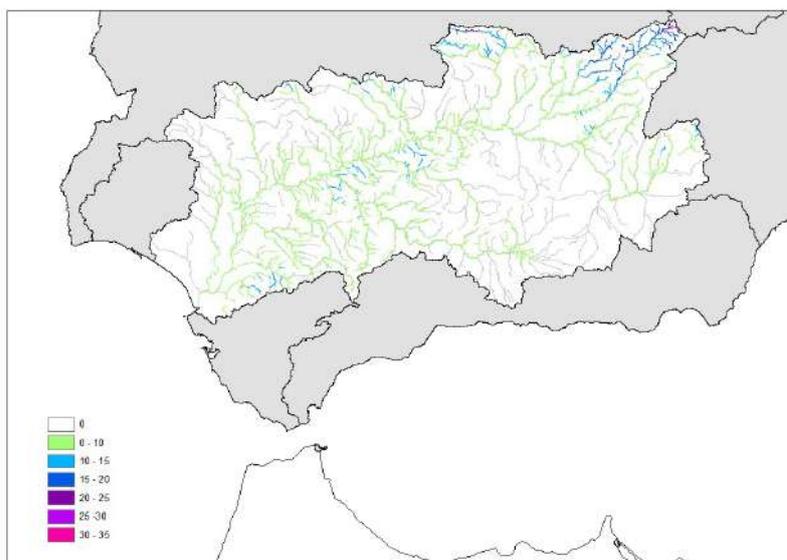


Figura A9.48. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Guadalquivir para el período de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.49) son muy escasos y de una magnitud muy reducida. Aparecen cambios inferiores al 10% en toda la red fluvial del río Piedras, en el eje del río Oraque, así como en algunos de sus afluentes, y en el eje principal del río Odiel aguas abajo de la confluencia con el anterior.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.50) los cambios, en su mayoría inferiores al 10%, se extienden a casi toda la red a excepción del río Valverde y gran parte del Candón, afluentes del Tinto por la margen derecha. Las zonas con mayores porcentajes de cambio, entre el 10% y el 15%, se encuentran localizadas principalmente en algunos afluentes de cabecera de los ríos Piedras, del río Meca y del río Oraque.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.51) los resultados son muy similares a los obtenidos para 100 años, apareciendo ahora también cambios en los ríos Valverde y Candón (salvo sus tramos de cabecera), y aumentando ligeramente los cambios respecto a este periodo de retorno. Los tramos con porcentajes mayores, que en ningún caso sobrepasan el 15%, se concentran, al igual que antes, en las cuencas de los ríos Piedras, Meca y Oraque, a los que se suman algunos afluentes de la cabecera del río Odiel y, puntualmente, del Tinto.

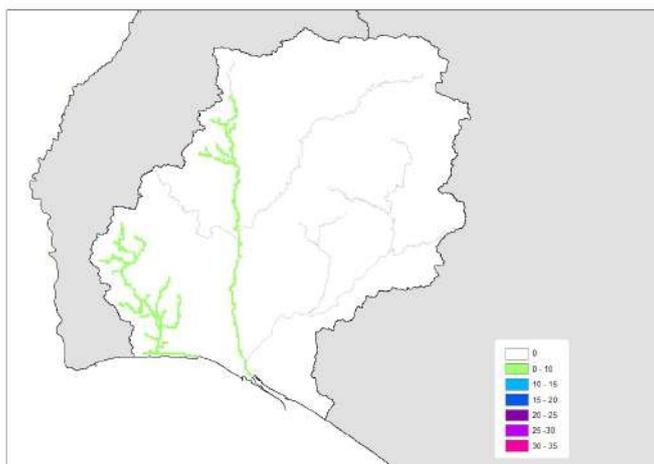


Figura A9.49. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tinto, Odiel y Piedras para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

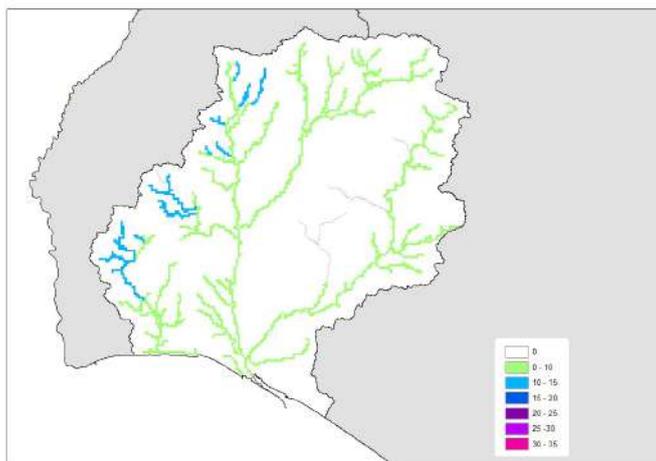


Figura A9.50. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tinto, Odiel y Piedras para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

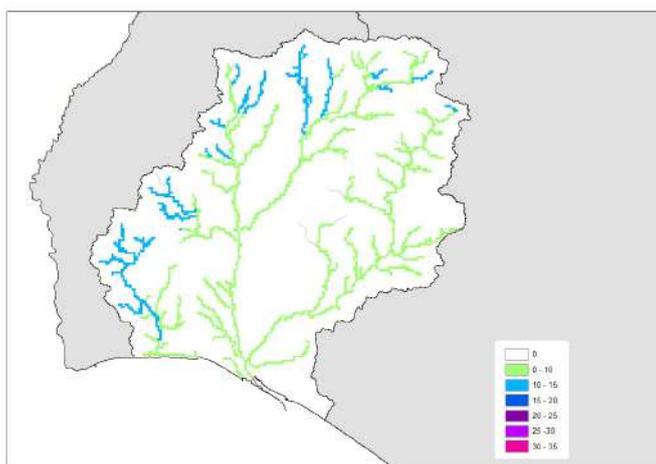


Figura A9.51. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tinto, Odiel y Piedras para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.52, A9.53 y A9.54), se observa una disminución general de los porcentajes de cambio y de la extensión de los tramos afectados respecto al escenario RCP 4.5. Destaca, en este sentido, el periodo de retorno de 10 años para el que no se producen cambios. Para el periodo de retorno de 100 años, los cambios, menores del 10 %, se localizan en el eje principal del río Odiel, salvo su tramo más alto, en algunos de sus afluentes de cabecera, y en el río Oraque, junto con sus afluentes. En cuanto al periodo de retorno de 500 años, se amplían los tramos afectados a algunos afluentes adicionales del Oraque y de la cabecera del Odiel, al eje del río Tinto (prácticamente hasta su cabecera), y a algunos afluentes de éste en cabecera, como el río Valverde, entre otros. Los porcentajes de cambio se mantienen por debajo del 10% prácticamente en todos los tramos, salvo en algunas pequeñas corrientes de la cabecera del Oraque y del Odiel, con valores de entre el 10% y el 15%.

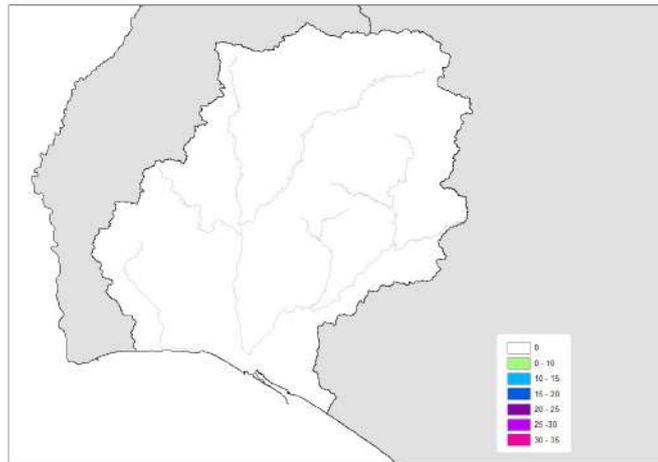


Figura A9.52. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tinto, Odiel y Piedras para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

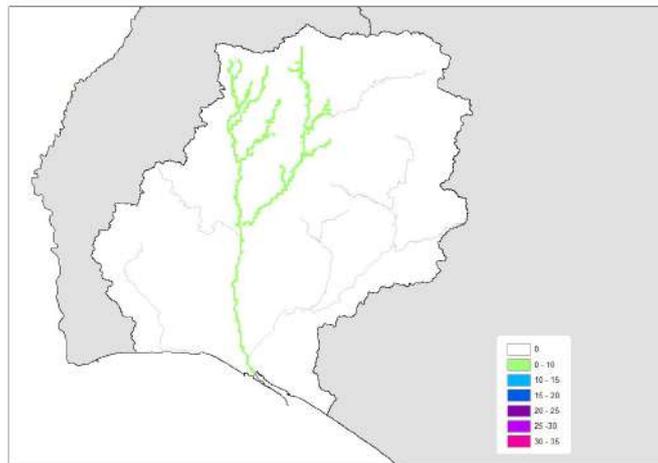


Figura A9.53. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tinto, Odiel y Piedras para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.

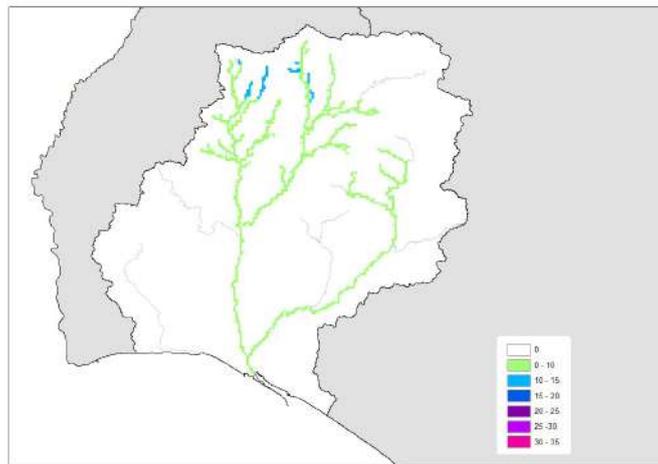


Figura A9.54. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Tinto, Odiel y Piedras para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica de Guadalete y Barbate

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada en el escenario RCP 4.5 para el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.55) son muy escasos, afectando tan solo al río Espera y al Guadalete desde su confluencia con éste, siendo los porcentajes de cambio inferiores al 10%. Para el periodo de retorno de 100 años (Figura A9.56) la extensión de los cambios aumenta considerablemente, afectando prácticamente a todas las corrientes de la cuenca del Guadalete, excepto algunos tramos de las cabeceras, al Salado de Chiclana, al Salado de Conil desde su tramo medio hasta su desembocadura, así como al río del Álamo y al río Barbate desde aproximadamente Alcalá de los Gazules hasta su desembocadura. La magnitud de los cambios se mantiene en todos los casos en valores inferiores al 10%. Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.57) los resultados son muy similares a los de 100 años, extendiéndose también los cambios a algunas cabeceras de los afluentes del Guadalete y a los afluentes del río Barbate en su cuenca alta (Montero, Alberite y Garganta del Gavilán). También en este caso los porcentajes se mantienen en valores inferiores al 10%.

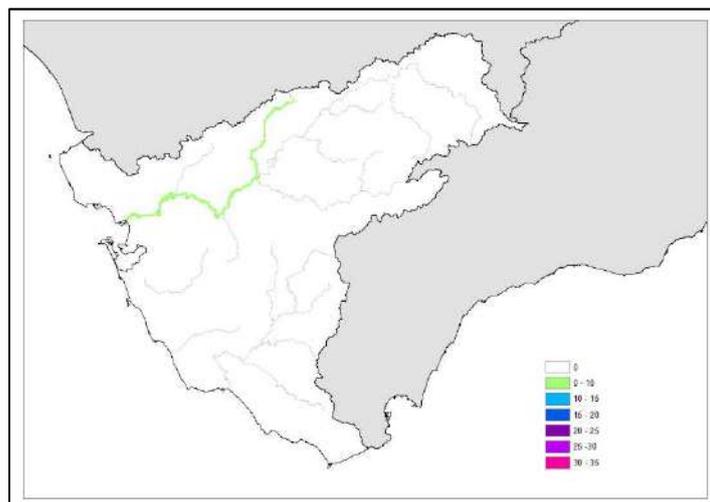


Figura A9.55. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Guadalete y Barbate para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

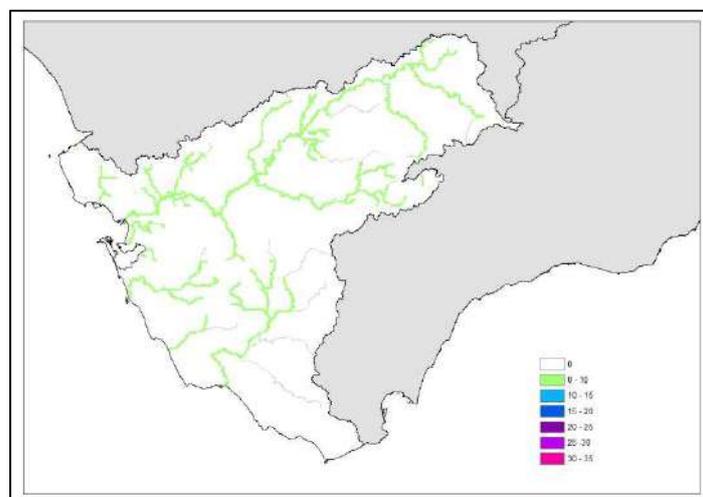


Figura A9.56. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Guadalete y Barbate para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

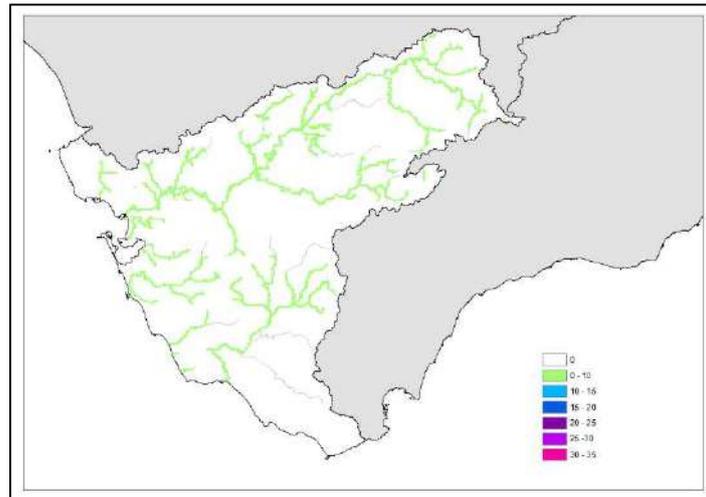


Figura A9.57. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Guadalete y Barbate para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario RCP 8.5 (Figuras A9.58, A9.59 y A9.60), no se observan cambios significativos en ningún río para el periodo de retorno de 10 años, mientras que para el periodo de retorno de 100 años la situación es muy similar a la observada para el mismo periodo en el escenario RCP 4.5, con cambios significativos inferiores al 10% en todas las corrientes de la cuenca del Guadalete (excepto el río Chivo, el Majaceite y la cabecera del Salado) y las del Barbate (excepto cabecera y los ríos Celemín y Almodóvar). En este escenario no aparecen cambios en los ríos Salado de Chiclana y Salado de Conil para este periodo de retorno. Para el periodo de retorno de 500 años la extensión de los cambios es muy similar a la de 100 años, extendiéndose a todas las corrientes de la cuenca del Guadalete, y aumentando el porcentaje de cambio a valores del rango del 10-15% en los tramos altos de los ríos Guadalporcún y Espera, y en el arroyo de Villalona y el arroyo Almarda.

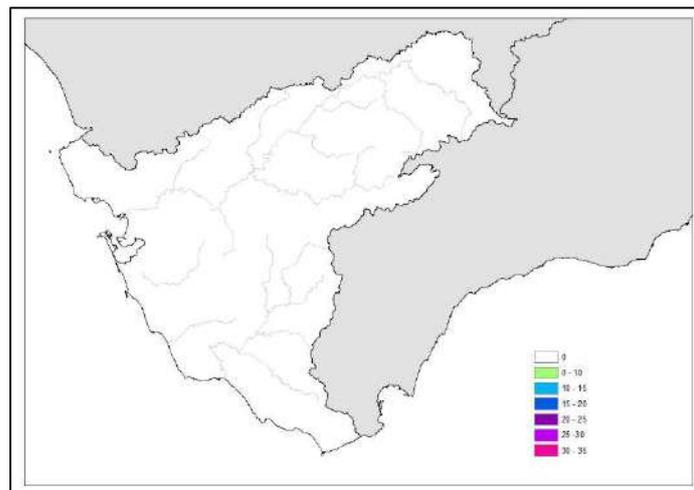


Figura A9.58. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Guadalete y Barbate para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

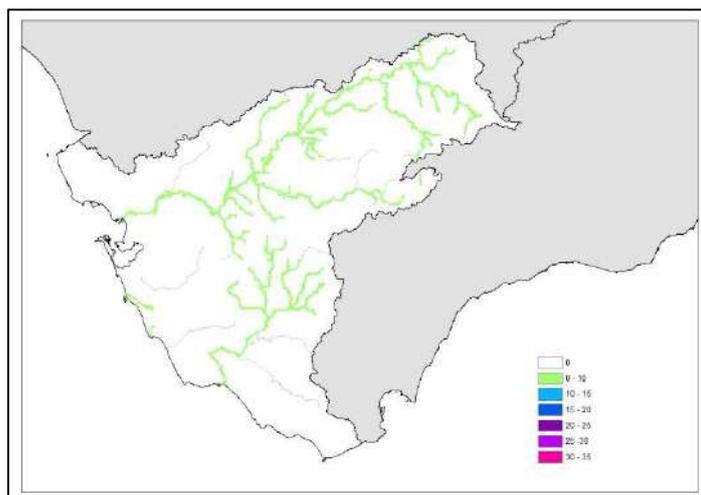


Figura A9.59. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Guadalete y Barbate para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.

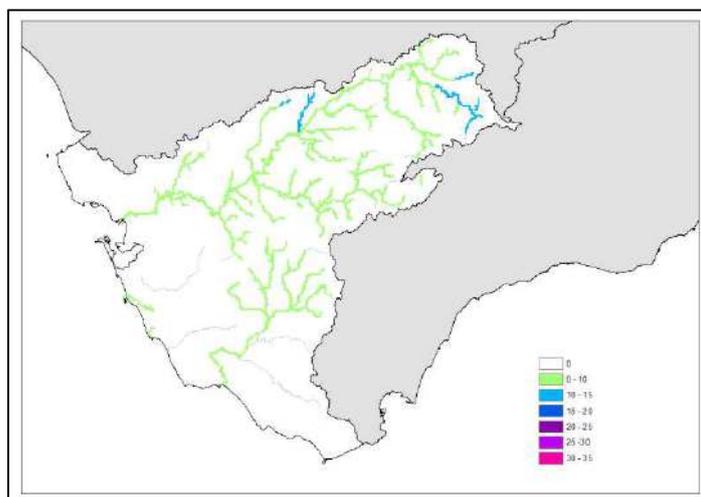


Figura A9.60. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de Guadalete y Barbate para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas

Los cambios porcentuales de precipitación diaria máxima anual acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.61) son muy escasos y de una magnitud inferior al 10%, afectando tan solo al eje principal de los ríos Guadiaro y Genal en casi toda su extensión, así como a algunas pequeñas corrientes en la costa almeriense. Para el periodo de retorno de 100 años y mismo escenario (Figura A9.62) los cambios se mantienen casi en su totalidad inferiores al 10%, ampliándose en la mitad occidental de la demarcación al río Hozgarganta, a las pequeñas corrientes costeras en la zona de Estepona, y a los ríos Aldabes y Guadalteba y al río Guadalhorce a partir de la confluencia con éstos, así como a la zona de Zafarraya y el río Algarrobo. En la parte oriental aparecen cambios en los ríos Nacimiento, Gergal y Tabernas y en el Andarax desde su confluencia con el río Nacimiento, así como en los ríos Morales, Aguas, Alías y Almanzora y gran parte de sus afluentes. Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.63) los cambios por un lado se extienden al río Guadalranque y las pequeñas corrientes de la costa occidental malagueña, mientras que por otro algunas corrientes que presentaban cambios en el periodo de retorno de 100 años no los presentan para el de 500, como ocurre con el tramo alto del Almanzora y los ríos Nacimiento y Gergal. En la costa oriental almeriense aparecen algunos tramos con porcentajes de cambio del orden del 10-20%, mientras que el resto se mantiene con valores inferiores al 10%.

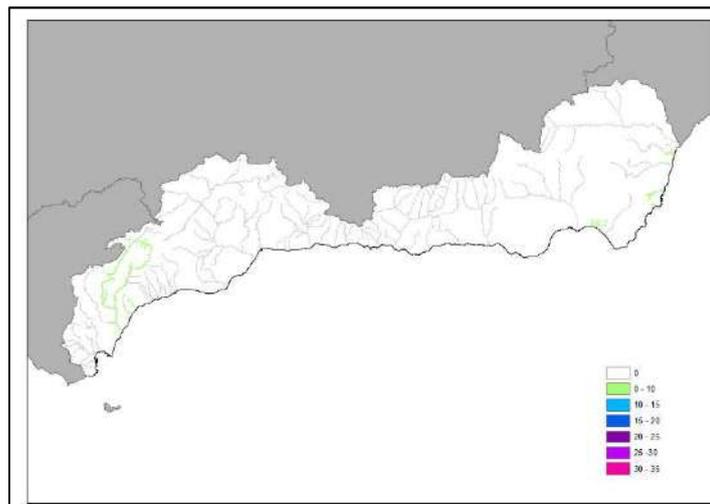


Figura A9.61. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

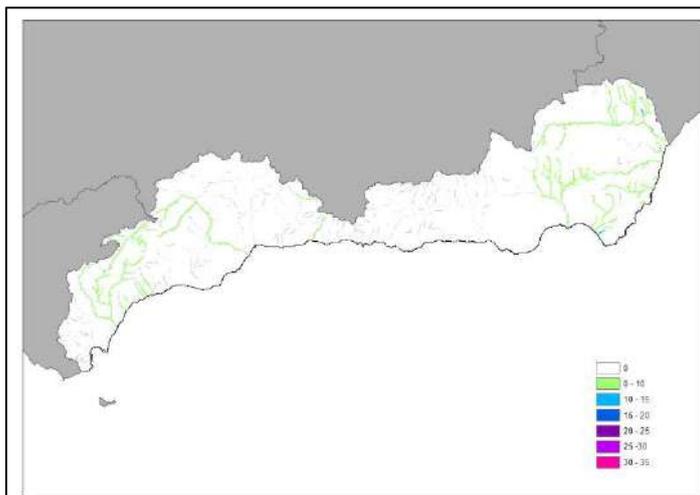


Figura A9.62. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de las Cuenkas Mediterráneas Andaluzas para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

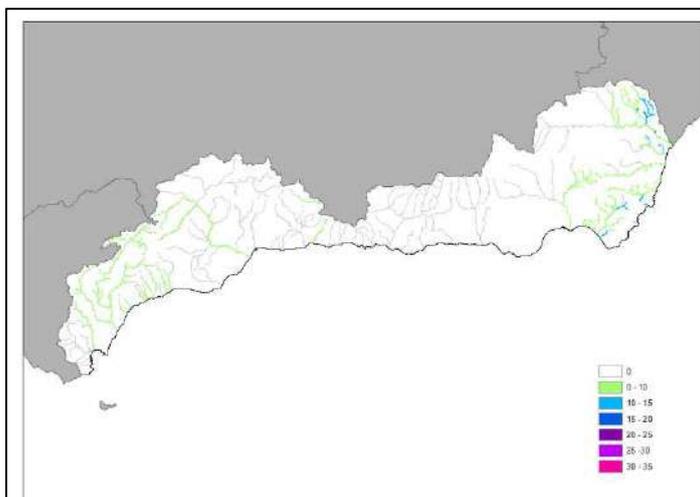


Figura A9.63. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de las Cuenkas Mediterráneas Andaluzas para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto al escenario RCP 8.5 (Figuras A9.64, A9.65 y A9.66), a pesar de ser un escenario más pesimista, los cambios detectados son más leves que en el escenario RCP 4.5. Para el periodo de retorno de 10 años no se observan cambios en ninguna corriente de la demarcación, mientras que para el de 100 años los cambios no son muy numerosos y no superan el 10% de magnitud. Las corrientes afectadas son los ríos Hozgarganta, Genal y Guadiaro, así como los ríos Ardales y Guadalteba y el río Guadalhorce desde su confluencia con éstos. En el periodo de retorno de 500 años los cambios se mantienen por debajo del 10% y siguen sin ser muy numerosos, si bien se amplían principalmente al río Guadalquivir, a los ríos Guadalfeo y Trévez, excepto sus cabeceras, al tramo final de la rambla Albuñol y a los ríos Yator, excepto cabecera, y Adra desde su confluencia con éste.

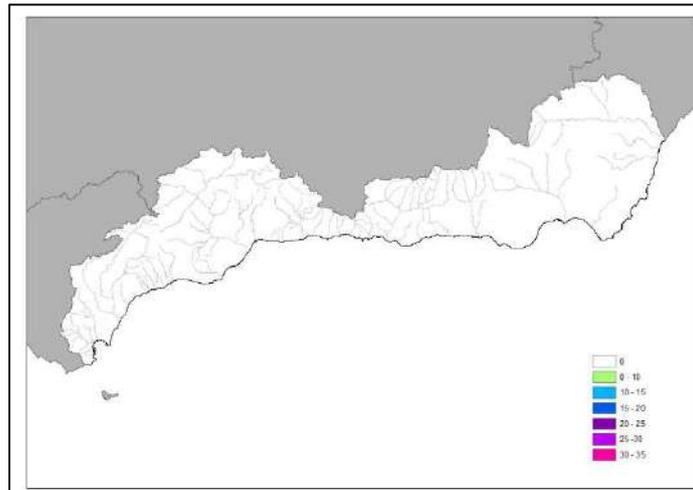


Figura A9.64. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de las Cuenas Mediterráneas Andaluzas para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

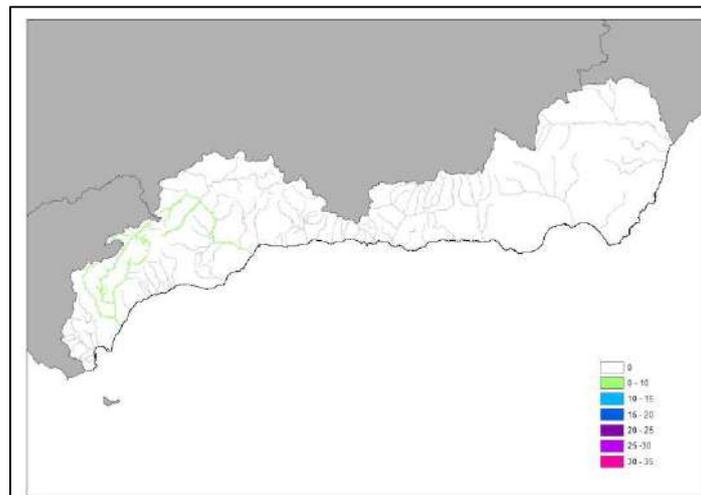


Figura A9.65. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de las Cuenas Mediterráneas Andaluzas para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

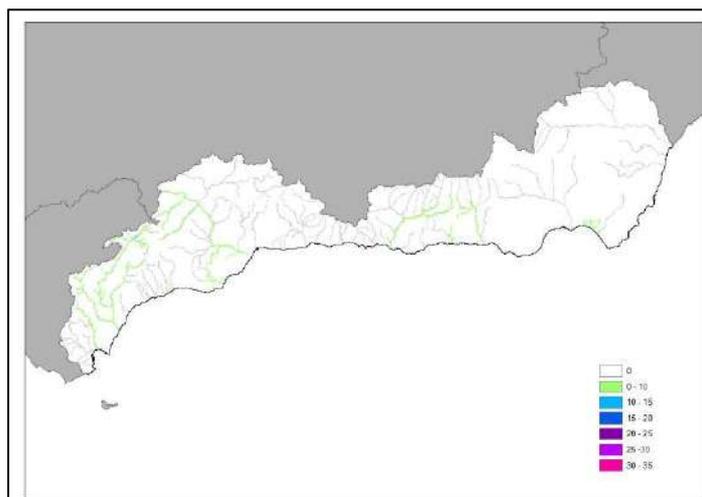


Figura A9.66. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Segura

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.67) son muy escasos y de una magnitud muy reducida. Aparecen cambios inferiores al 10% en el río Segura tras su confluencia con el río Mundo, así como en el tramo final del río Mundo y sus afluentes y el arroyo Tobarra.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.68), los cauces principales se ven afectados por cambios inferiores al 10%. Son el río Segura desde su confluencia con el Tus, el río Mundo, el arroyo Tobarra, las ramblas del Judío y la del Moro y los ríos Mula y Guadalentín. Aparecen corrientes con cambios entre el 10-15%, principalmente afluentes pequeños de las corrientes principales, destacando el arroyo Morote y la rambla de Ortigosa, que confluye con el arroyo Tobarra. En la zona de Yecla (parte nororiental de la demarcación) aparecen cauces con cambios en torno al 10-20%, correspondiendo a cuencas endorreicas, no conectadas con la red principal. También se verían afectadas pequeñas corrientes que desembocan directamente en la costa en la zona entre Águilas y Mazarrón.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.69) los resultados son muy similares a los de 100 años, aumentando algo la extensión de los cauces afectados por los cambios. La red principal se seguiría viendo afectada por cambios hasta un 10%, extendiéndose ahora hasta la cabecera del Segura y sus afluentes, así como al río Argos y la rambla del Albujón. En algunos afluentes de los ríos principales se registrarían cambios del orden del 10-15% y habría nuevos tramos con cambios en torno al 15-20%, destacando el tramo medio del Guadalentín y algunos cauces de cuencas endorreicas en las zonas de Corral Rubio (norte de la demarcación) y Yecla, aumentando el número de tramos respecto al periodo de retorno de 100 años.

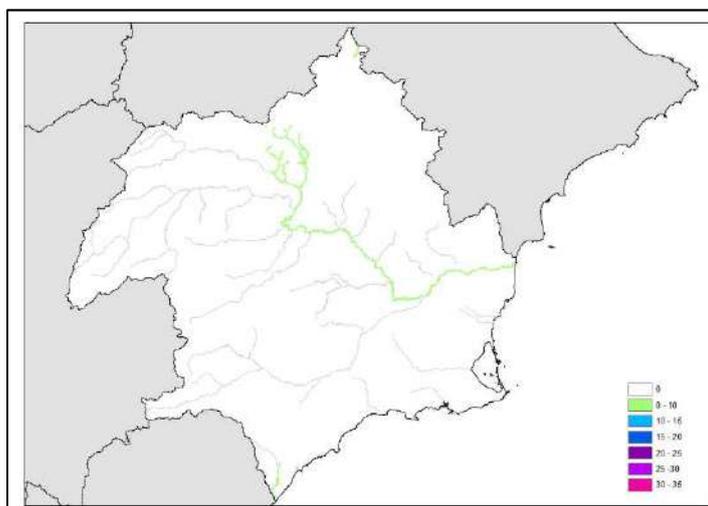


Figura A9.67. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Segura para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

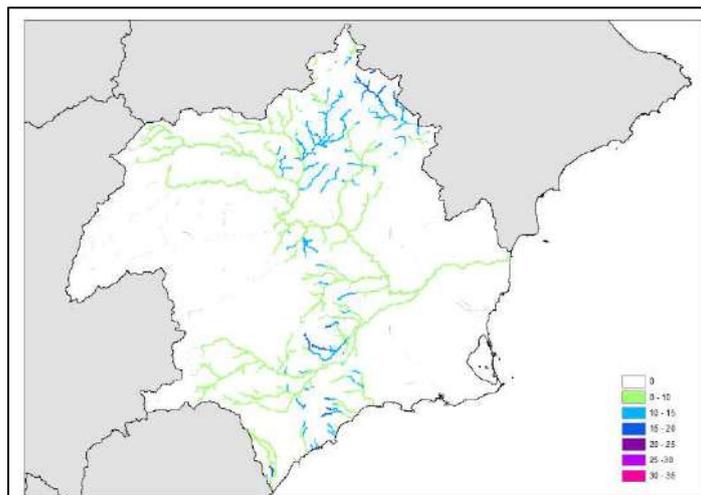


Figura A9.68. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Segura para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

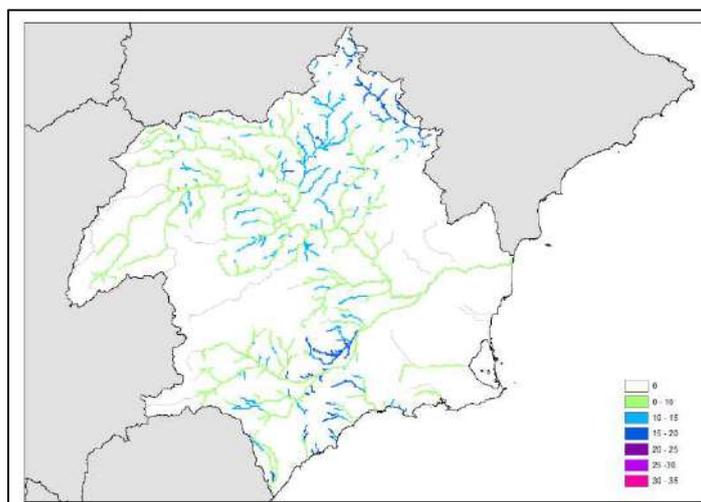


Figura A9.69. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Segura para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.70, A9.71 y A9.72), se observa un cambio en la magnitud de los mismos. Los cambios para el periodo de retorno de 10 años se concentrarían principalmente en algunos cauces de la red principal (Segura excepto cabecera, río Mundo, arroyo de Torraba y rambla de Ortigosa, tramo final de los ríos Argos, Quípar y Mula) con magnitudes inferiores al 10% excepto en el tramo medio del río Mundo y algunos de sus afluentes, con cambios del orden del 10-15%. En algunos afluentes de la cabecera del Segura se registrarían cambios ya del orden del 15-20%. La rambla del Albuñón también se vería afectada con cambios de hasta el 10%. En el periodo de retorno de 100 años los cambios inferiores al 10% se extienden a las cabeceras de los ríos Segura, Argos y Quípar, así como al Guadalentín y a la rambla del Judío. El río Mundo vería aumentado su porcentaje de cambio al 15-20% en prácticamente toda su extensión, así como buena parte del arroyo de Torraba, mientras que aparecen pequeños afluentes del Mundo y del Segura con cambios del 20-25%. En cuanto al periodo de retorno de 500 años se observa un incremento de los porcentajes de cambio en algunas corrientes, como sería en los tramos

altos de los ríos Segura, Argos y Quípar, que pasarían a porcentajes de 10-15%, y el tramo medio y sus afluentes del río Mundo, que pasarían a porcentajes de alrededor del 20-25%.

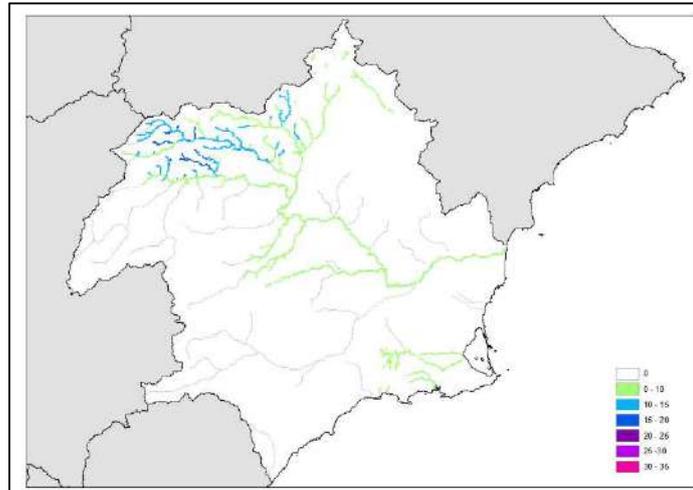


Figura A9.70. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Segura para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

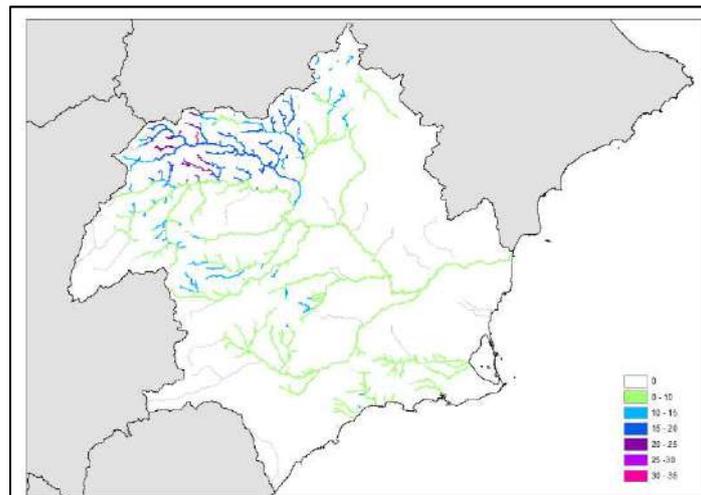


Figura A9.71. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Segura para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

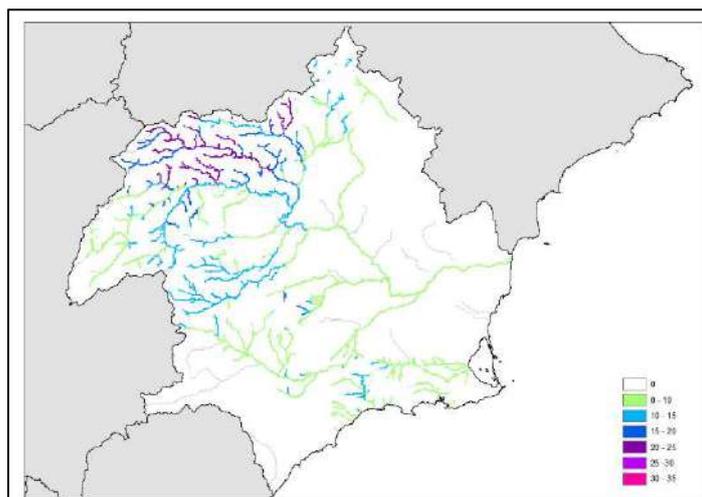


Figura A9.72. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Segura para el período de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Júcar

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.73) son muy escasos y de una magnitud muy reducida. Aparecen cambios inferiores al 10% en el eje del río Júcar y de sus afluentes Cabriel, Ledaña y Valdemembra por la margen izquierda, y Arquillo y Reconque por la margen derecha; además de en el eje del río Túrria y de las corrientes entre el río Mijares y el Cenia. Asimismo, se alcanzan valores entre el 10% y el 15% principalmente en algunos pequeños cauces situados entre el río Júcar y el río Arquillo, así como en algunos pequeños afluentes del río Júcar y del río Valdemembra.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.74) los cambios, que en su mayoría siguen siendo inferiores al 10%, se amplían a casi toda la red exceptuando algunos afluentes de la margen izquierda del Cabriel y de los ríos Turia y Mijares, así como tramos en la cabecera del río Magro y el Barranco del Carraixet, entre otros, que no presentan cambios. Los mayores porcentajes de cambio, ahora entre el 15% y el 20%, se producen, en general, en los mismos tramos comentados para 10 años de periodo de retorno, a los que se añaden algunos tramos en cabecera del Júcar y en la Rambla de la Viuda y del Poyo, entre otros.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.75) los resultados son muy similares a los de 100 años, ampliándose a la práctica totalidad de la red de drenaje y aumentando ligeramente la magnitud de los cambios respecto a ese periodo de retorno (del orden de un 5%). Los porcentajes de cambio mayores llegan a sobrepasar el 20% en algunos pequeños cauces situados entre el río Júcar y el río Arquillo.

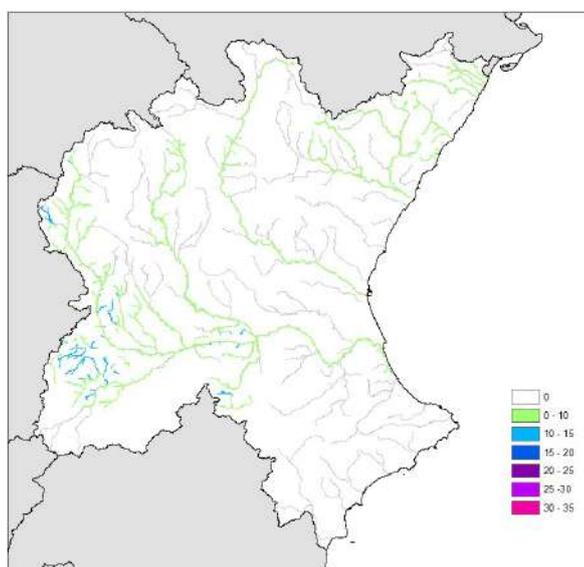


Figura A9.73. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Júcar para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

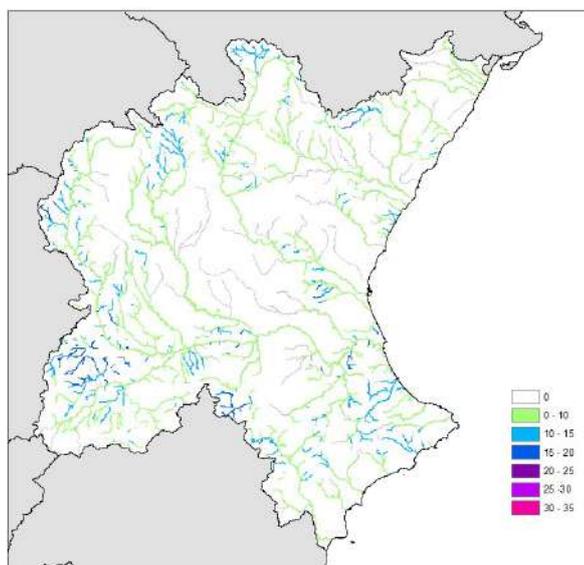


Figura A9.74. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Júcar para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

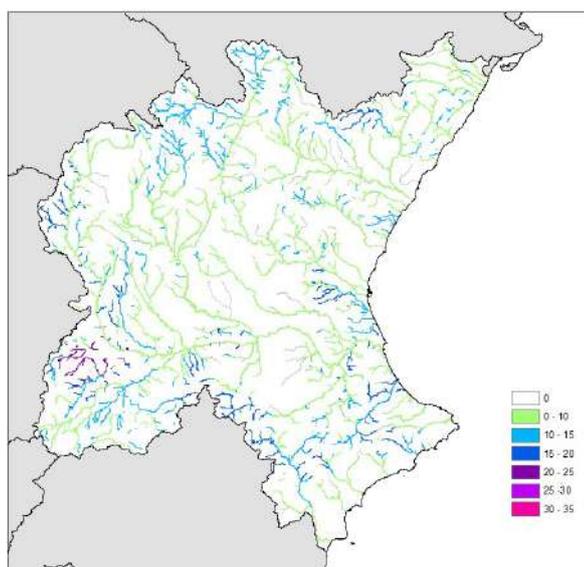


Figura A9.75. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Júcar para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.76, A9.77 y A9.78), se observa un aumento general de los porcentajes de cambio respecto al escenario RCP 4.5 en toda la demarcación excepto en la zona sureste de la misma, en la red de ríos litorales al sur del río Júcar, así como en algunos afluentes del Júcar por margen derecha en su tramo bajo, como el Albaida, donde no se identifican cambios. En concreto, para el periodo de retorno de 10 años ya se alcanzan porcentajes de cambio de entre un 20% y un 25% en algunos puntos. Las zonas más afectadas por los cambios coinciden, en general, con algunas de las identificadas en el RCP 4.5, como la cuenca del río Arquillo, los pequeños cauces ubicados entre éste río y el Júcar, donde se identifican incrementos por encima del 30% para 500 años de periodo de retorno, y los ríos Valdemembra y Ledaña.

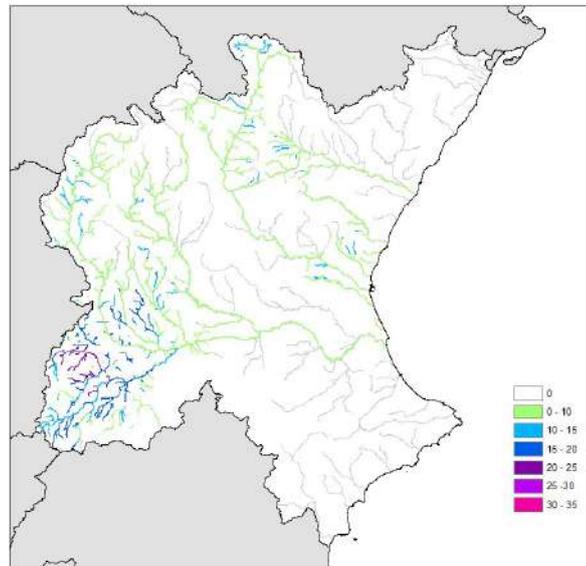


Figura A9.76. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Júcar para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

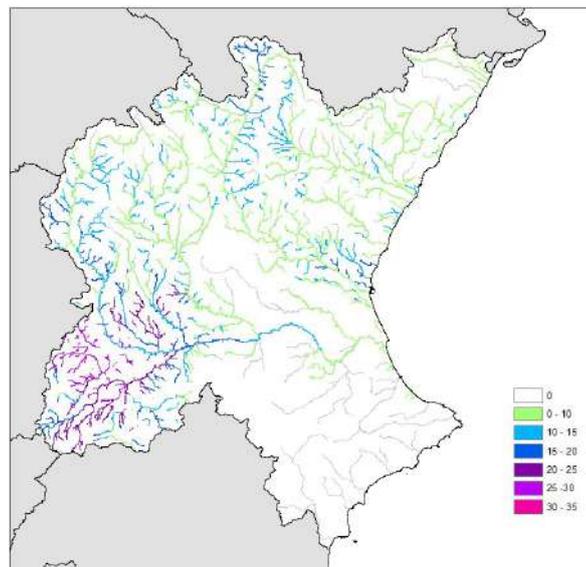


Figura A9.77. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Júcar para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

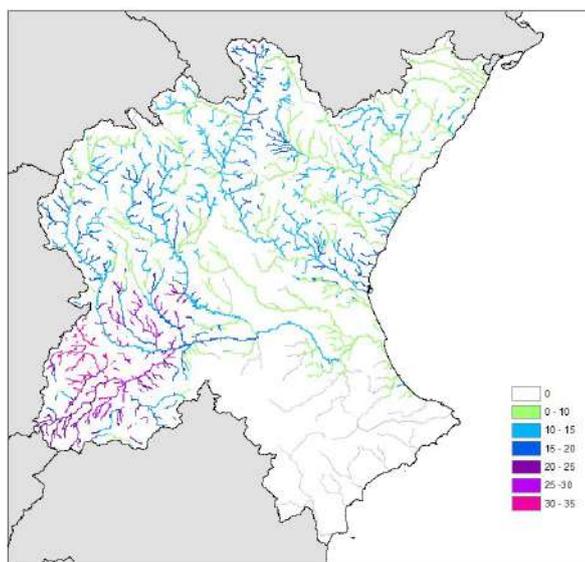


Figura A9.78. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Júcar para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica del Ebro

Los cambios porcentuales de precipitación diaria acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.79) son muy escasos y de una magnitud muy reducida. Aparecen cambios inferiores al 10% en la cabecera del Ebro, incluidos los ríos Rudron, Oca, Nela, Omecillo, Oroncillo, Inglares, Tirón, Iregua, Linares, Cidacos, Ega, Arba de Luesia, excepto sus cabeceras, y casi hasta sus cabeceras en los ríos Aragón, Alhama, Jalón, Gállego, Segre, Guadalope, y el propio eje del río Ebro. Los mayores cambios se sitúan entre el 10% y el 15%, en tramos muy localizados y dispersos, y afectando en mayor medida a pequeños afluentes de las cuencas de los ríos Gállego, Cinca, Segre y Alhama.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.80) los cambios, en su mayoría inferiores al 10%, se amplían a casi toda la red exceptuando algunos afluentes de cabecera como el Jerea, el Purón, el Bayas, el Zadorra y el Iregua, que no presentan cambios. Las zonas con mayores porcentajes de cambio, entre el 15% y el 20%, se encuentran localizadas principalmente en las cuencas de los afluentes de la margen izquierda (Gállego, Cinca, Segre, Noguera Pallaresa) y en la margen derecha en la cabecera del Alhama.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.81) los resultados son muy similares a los de 100 años, aumentando ligeramente los cambios respecto a este periodo de retorno (del orden del 5%). Los porcentajes mayores, que sólo en algunos tramos sobrepasan el 20%, se concentran, al igual que antes, en la cuenca del Gállego y Segre en la margen izquierda, y en la zona entre los ríos Alhama y Huecha, y en el río Bergantes, en la derecha.

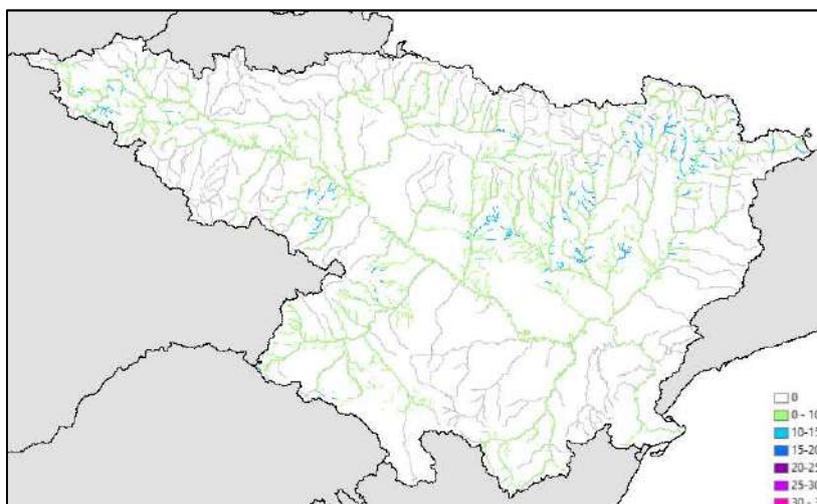


Figura A9.79. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Ebro para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

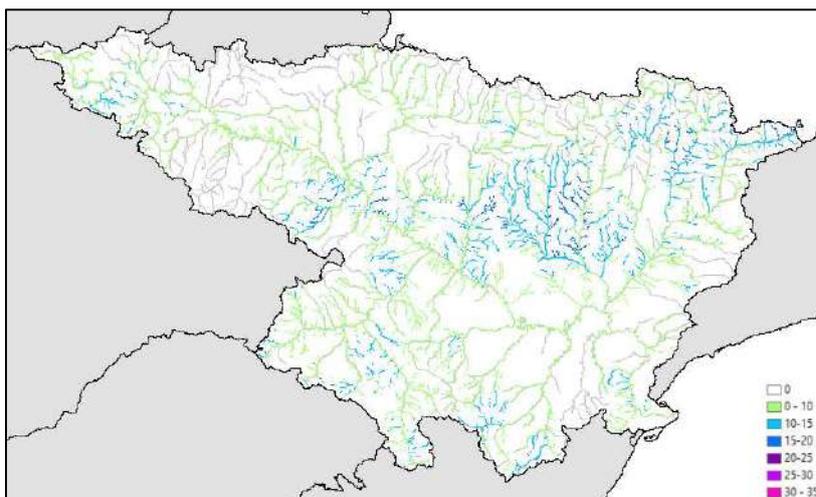


Figura A9.80. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Ebro para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

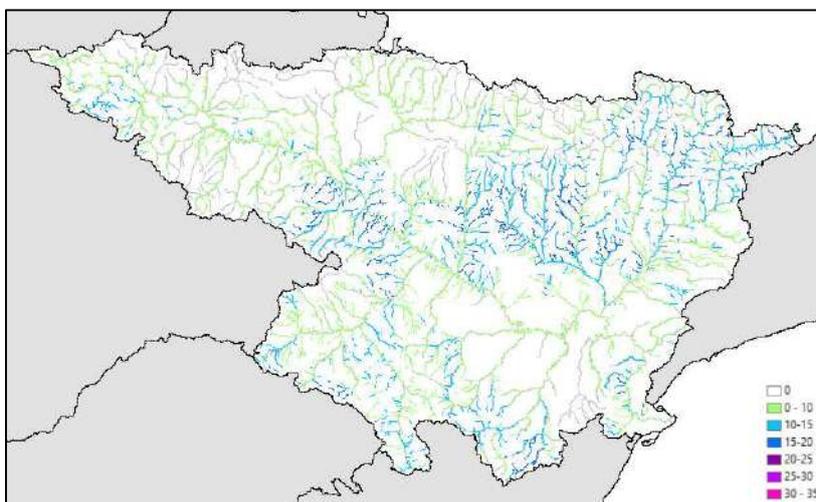


Figura A9.81. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Ebro para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.82, A9.83 y A9.84), se observa un aumento general de los porcentajes de cambio respecto al escenario RCP 4.5. En concreto, en este escenario, ya para el periodo de retorno de 10 años, se alcanzan porcentajes de cambio mayores que para el periodo de retorno de 500 años con RCP 4.5, coincidiendo, en general, las zonas más afectadas con las correspondientes al RCP 4.5, es decir, cuencas del Gállego y Segre en la margen izquierda, y del Alhama en la margen derecha. A medida que aumenta el periodo de retorno los cambios porcentuales se ven incrementados llegando para 500 años a porcentajes que superan el 30% en algunos tramos de las cuencas de cabecera del Noguera Pallaresa y el Segre. Los tramos más afectados se concentran en las mismas zonas comentadas hasta ahora: cuencas del Gállego y Segre en la margen izquierda; y zona entre los ríos Alhama y Huecha, cuenca del río Jalón, río Aguasvivas y parte del río Martín, en la derecha.

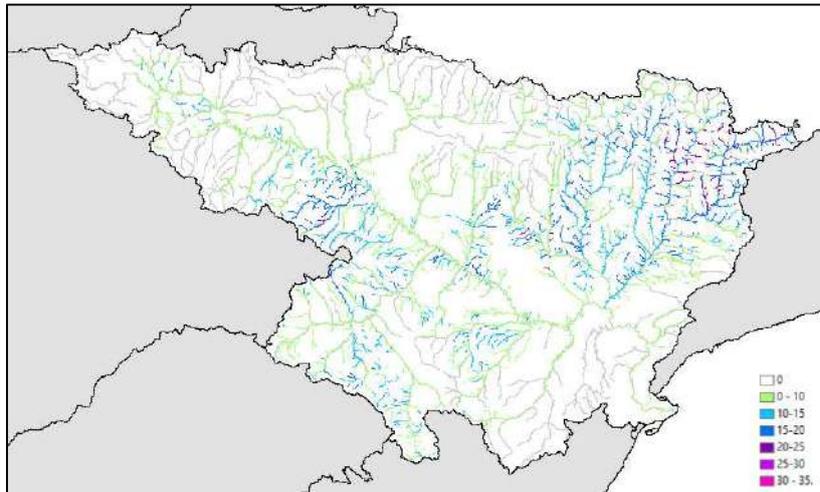


Figura A9.82. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Ebro para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 10 años.

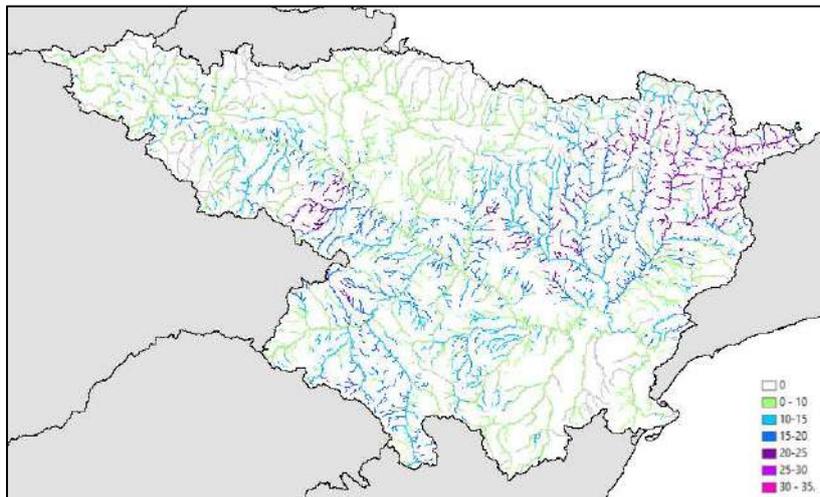


Figura A9.83. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Ebro para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 100 años.



CEDEX

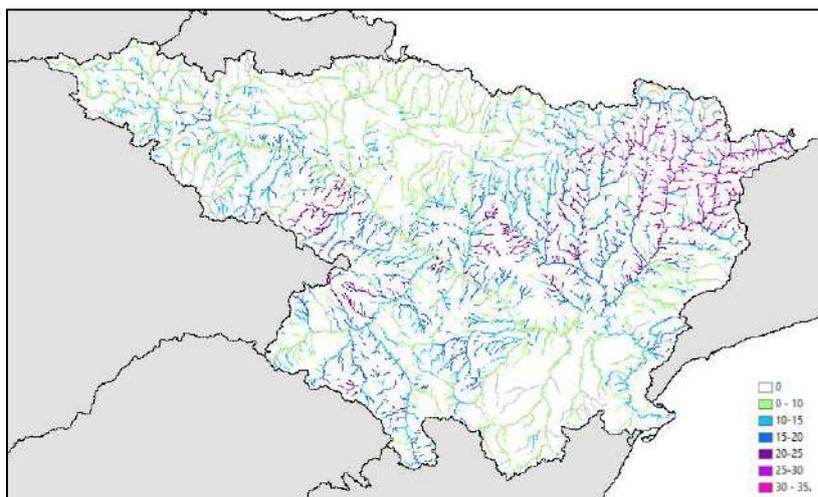


Figura A9.84. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH del Ebro para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.

Demarcación Hidrográfica Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña

Los cambios porcentuales de precipitación diaria máxima anual acumulada para el escenario RCP 4.5 y el periodo de retorno de 10 años (Figura A9.85) son muy escasos y de magnitud muy reducida. Aparecen cambios en el eje del río Llobregat y alguno de sus afluentes, como el Cardener, el eje principal y algunos de los afluentes del Ter, el río Besós y el Tordera, el tramo bajo del Fluviá y gran parte de la red fluvial del Muga, entre otros. En su mayor parte los porcentajes de cambio son inferiores al 10%, aunque se sitúan entre el 10% y el 15% en algunos pequeños tramos localizados principalmente en las cuencas de los ríos Muga y Ter.

En cuanto al periodo de retorno de 100 años para el mismo escenario (Figura A9.86) los cambios, en su mayoría inferiores al 10%, se amplían a gran parte de la red fluvial, exceptuando los ríos Gaiá y Foix, así como algunos pequeños ríos costeros y algunos afluentes de los ríos principales, que no presentan cambios. Las zonas con mayores porcentajes de cambio, entre el 15% y el 20%, se encuentran localizadas principalmente en la cuenca del Muga y en otros pequeños cauces del norte de la demarcación próximos a la costa.

Para el periodo de retorno de 500 años (Figura A9.87) los resultados son muy similares a los de 100 años, extendiéndose y aumentando ligeramente los valores de cambio respecto a ese periodo de retorno (del orden de un 5%), llegando a superarse en algunas corrientes, principalmente de la cuenca del Muga, el 20% de incremento. Asimismo, para este periodo de retorno aparecen cambios inferiores al 10% en los ríos Gaiá y Foix.



Figura A9.85. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 10 años.

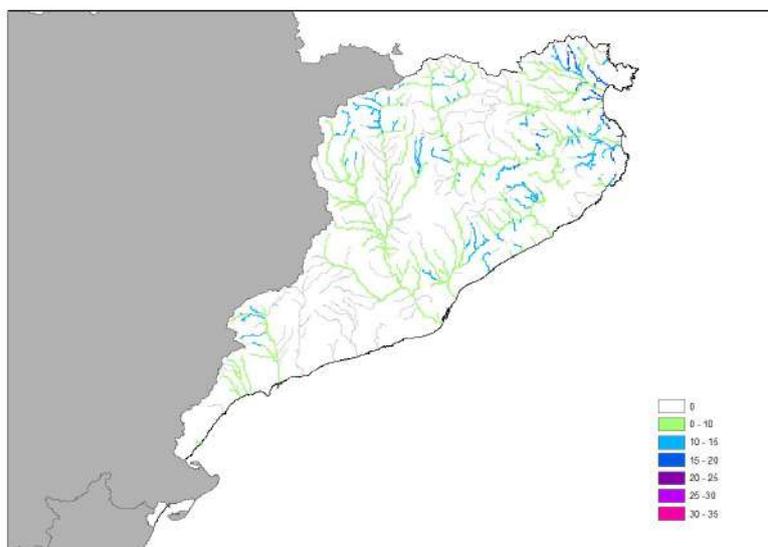


Figura A9.86. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 100 años.

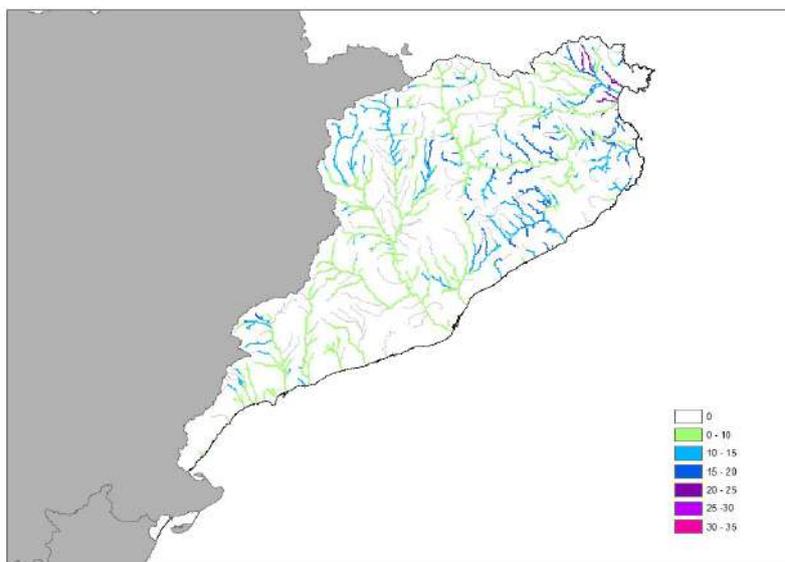


Figura A9.87. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 4.5 y T = 500 años.

En cuanto a los cambios correspondientes al escenario de emisiones más pesimista, RCP 8.5 (Figuras A9.88, A9.89 y A9.90), se observa un aumento general de los porcentajes de cambio respecto al escenario RCP 4.5. En concreto, en este escenario, ya para el periodo de retorno de 10 años, se alcanzan porcentajes de cambio próximos a los obtenidos para el periodo de retorno de 500 años con RCP 4.5. A medida que aumenta el periodo de retorno los cambios porcentuales se ven incrementados, llegando a verse afectada prácticamente la totalidad de la red fluvial para el periodo de retorno de 500 años. Los ríos con porcentajes de cambio más elevados se concentran en la mitad norte de la demarcación, en concreto, en la cuenca alta del Llobregat, y las cuencas de los ríos Ter y Tordera, con valores para el periodo de retorno de 500 años de un

20-25%, llegando a superar puntualmente el 30% en alguna pequeña corriente al norte de la demarcación.

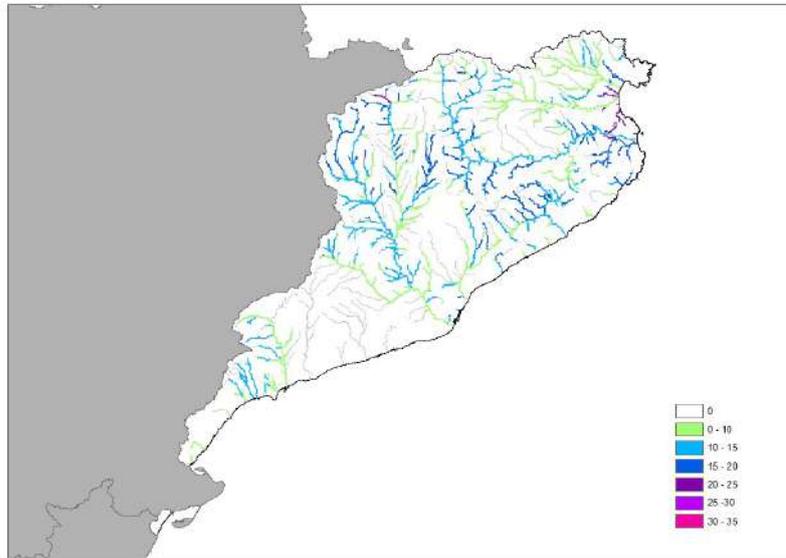


Figura A9.88. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y

T = 10 años.

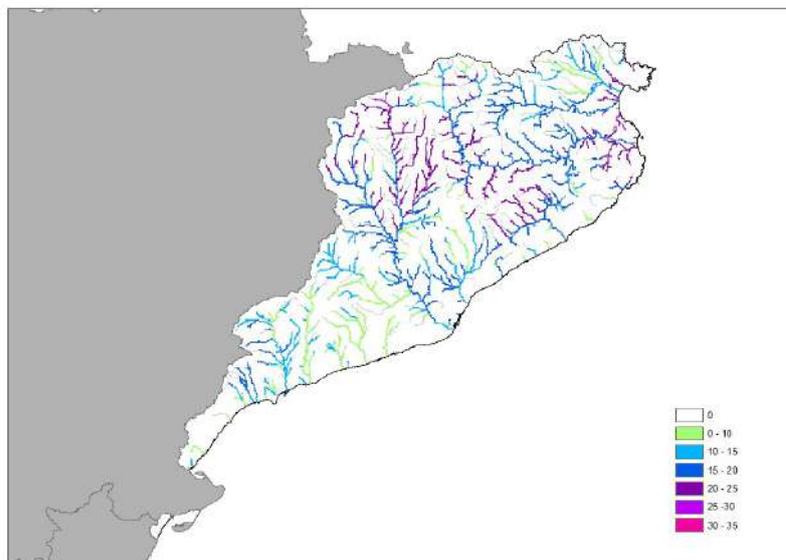


Figura A9.89. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y

T = 100 años.



CEDEX

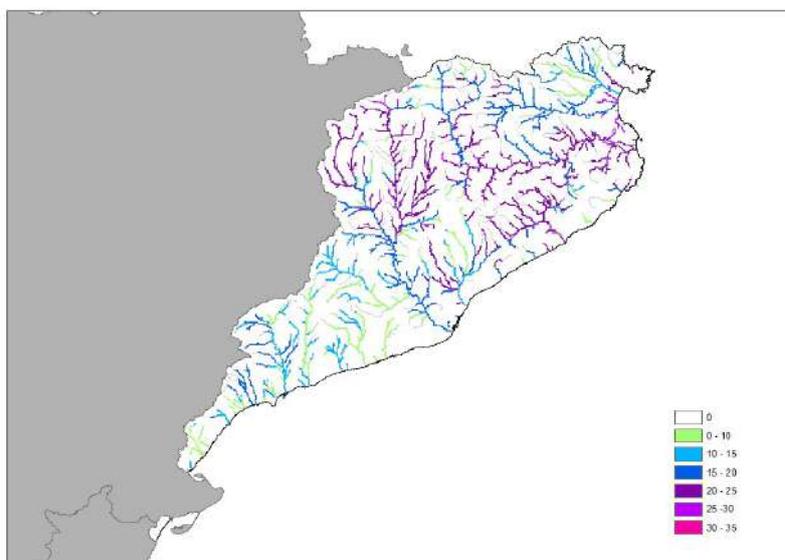


Figura A9.90. Tasas de cambio en cuantil de precipitación diaria máxima anual acumulada en la DH Distrito de Cuenca Fluvial de Cataluña para el periodo de impacto 2041-2070 en relación al modelo SQRT-R para RCP 8.5 y T = 500 años.