

# EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS EN RÉGIMEN NATURAL

## *MEMORIA*

Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al  
CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y  
las masas de agua

**Desarrollo de los trabajos:** *Centro de Estudios y Experimentación de  
Obras Públicas (CEDEX)*

**Dirección:** *Dirección General del Agua (DGA)*

**Supervisión:** *Oficina Española de Cambio Climático  
(OECC)*



# ÍNDICE TEMÁTICO

<b>ÍNDICE TEMÁTICO</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 MARCO DE REFERENCIA Y NORMATIVA EN ESPAÑA</b> .....	<b>3</b>
<b>3 BASES TÉCNICAS</b> .....	<b>9</b>
3.1 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	9
3.1.1 Modelos climáticos y técnicas de proyección regional.....	9
3.1.2 Escenarios de emisiones.....	12
3.1.3 Proyecciones climáticas consideradas en este trabajo.....	14
3.2 ESTIMACIONES EN ESPAÑA DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CICLO HIDROLÓGICO.....	18
3.3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO.....	24
3.3.1 Recursos hídricos.....	24
3.3.2 Fenómenos extremos.....	31
3.3.3 Test de contraste de hipótesis.....	31
<b>4 CONTRASTE Y ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS</b> .....	<b>37</b>
4.1 CONTRASTE ENTRE PROYECCIONES Y DATOS OBSERVADOS DURANTE EL PERIODO 1961-1990.....	37
4.1.1 Precipitación.....	37
4.1.2 Temperatura.....	46
4.1.3 Precipitación máxima diaria.....	50
4.2 ANÁLISIS DE TENDENCIA DE LAS PROYECCIONES EN EL SIGLO XXI.....	61
4.2.1 Precipitación.....	62
4.2.2 Temperatura.....	75
4.2.3 Precipitaciones máximas.....	78
<b>5 FASE ATMOSFÉRICA</b> .....	<b>108</b>
5.1 PRECIPITACIÓN.....	109
5.1.1 Interpolación de precipitación.....	109
5.1.2 Resultados.....	112
5.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	121
5.2.1 Interpolación de temperaturas.....	121
5.2.2 Aplicación del método de Hargreaves al cálculo de la ETP y correcciones.....	130
<b>6 EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS E IMPACTOS</b> .....	<b>139</b>
6.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL.....	139
6.2 HUMEDAD EN EL SUELO.....	148
6.3 NIEVE.....	156
6.4 RECARGA Y VOLUMEN SUBTERRÁNEO.....	164
6.5 ESCORRENTÍA.....	174
6.5.1 Resultados globales en España.....	174
6.5.2 Variabilidad espacial.....	176
6.5.3 Estacionalidad.....	189
6.5.4 Agregación por DD.HH.....	191
6.5.5 Validación del método directo frente a la transformación delta.....	200

<b>7</b>	<b>ANÁLISIS DE EVENTOS EXTREMOS.....</b>	<b>205</b>
7.1	ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS .....	205
7.1.1	<i>Metodología y objetivos.....</i>	<i>205</i>
7.1.2	<i>Leyes de frecuencia regional .....</i>	<i>206</i>
7.1.3	<i>Mapas de precipitaciones máximas .....</i>	<i>211</i>
7.1.4	<i>Resultados finales.....</i>	<i>216</i>
7.2	SEQUIAS .....	217
7.2.1	<i>Planteamiento metodológico .....</i>	<i>217</i>
7.2.2	<i>Resultados finales.....</i>	<i>218</i>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>227</b>
8.1	CONTRASTE DE DATOS .....	227
8.2	RECURSOS HÍDRICOS.....	228
8.3	EVENTOS EXTREMOS .....	230
8.4	RESULTADOS POR DD.HH. ....	231
<b>9</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>247</b>
<b>10</b>	<b>EQUIPO DE TRABAJO.....</b>	<b>249</b>
<b>11</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>250</b>
<b>12</b>	<b>ABREVIACIONES .....</b>	<b>257</b>
<b>13</b>	<b>SÍMBOLOS.....</b>	<b>259</b>
<b>14</b>	<b>GLOSARIO DE TÉRMINOS .....</b>	<b>261</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. INCREMENTO DE TEMPERATURA MEDIA GLOBAL EN LOS S. XX Y XXI (IPCC, 2007) .....	3
FIGURA 2. EMISIONES ANUALES TOTALES DE CO <sub>2</sub> (NAKICENOVIC ET AL, 2000) .....	13
FIGURA 3. EMISIÓN MUNDIAL DE GEI EN AUSENCIA DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS ADICIONALES (IPCC, 2007) ...	13
FIGURA 4. ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON PROYECCIONES DE PRE Y TEMPERATURA. FIC Y SDSM....	16
FIGURA 5. CARACTERÍSTICAS DE LAS SERIES CLIMÁTICAS ESTUDIADAS.....	17
FIGURA 6. SERIE DE PMX EN ESTACIÓN 04043 Y CGCM2-FIC-A2 .....	17
FIGURA 7. ÁMBITO GEOGRÁFICO DE LAS PROYECCIONES PRUDENCE EN ESPAÑA .....	18
FIGURA 8. Δ ESC ANUAL (%) PARA 2030. MAPAS LBAE ESCENARIOS 1 (IZDA) Y 2 (DCHA).....	19
FIGURA 9. Δ ESC ANUAL (%) PARA 2030. ESCENARIOS (MIMAM, 2000A Y B) .....	20
FIGURA 10. LOCALIZACIÓN DE LAS 19 CUENCAS ESTUDIADAS (FERNÁNDEZ CARRASCO, 2002).....	20
FIGURA 11. ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA .....	25
FIGURA 12. MAPA CORRECTOR HARGREAVES-PENMAN MONTEITH. OCTUBRE A SEPTIEMBRE .....	27
FIGURA 13. COEFICIENTE DE CULTIVO EN ESPAÑA.....	27
FIGURA 14. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL MÓDULO DE EVALUACIÓN DE RR.HH. EN SIMPA.....	29
FIGURA 15. PARÁMETROS DEL MODELO DE EVALUACIÓN DE RR.HH. Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	30
FIGURA 16. RESULTADOS DE PRE, ETP, ETR, REC Y ESC EN SIMPA.....	30
FIGURA 17. ESTADÍSTICAS PRE ANUAL EN ESPAÑA EN 622 ESTACIONES METEOROLÓGICAS .....	38
FIGURA 18. DIAGRAMA QQ DE PRE (MM) OBSERVADA Y PROYECTADA PARA LOS SRES A2.....	39
FIGURA 19. EMR ANUAL (%) ENTRE PROYECCIONES Y DATOS OBSERVADOS. PERIODO 1961-1990 .....	40
FIGURA 20. TEST F-SNEDECOR: P-VALOR ENTRE PROYECCIONES Y OBSERVADOS. PERIODO 1961-1990 ....	41
FIGURA 21. CICLO ESTACIONAL PRE. PERIODO 1961-1990. ESPAÑA.....	43
FIGURA 22. CICLO ESTACIONAL PRE. PERIODO 1961-1990. CUENCAS DEL DUERO Y SEGURA .....	44
FIGURA 23. DISPERSIÓN DATOS TRIMESTRALES DE PRE (MM) OBSERVADOS Y PROYECTADOS .....	46
FIGURA 24. TEM ANUAL EN ESPAÑA EN 218 ESTACIONES METEOROLÓGICAS .....	47
FIGURA 25. TENDENCIA SIGNIFICATIVA EN SELECCIÓN DE SERIES TEM. PERIODO 1961-1990 .....	48
FIGURA 26. CICLO ESTACIONAL TEM (°C) EN MEDIA (IZDA) Y DESVIACIÓN TÍPICA (DCHA). 1961-1990 .....	49
FIGURA 27. SERIES DE TEM ANUAL. Δ TEM ANUAL (°C/10 AÑOS) POR PROYECCIÓN. ESCENARIO A2.....	49
FIGURA 28. SERIES DE TEM ANUAL. Δ TEM ANUAL (°C/10 AÑOS) POR PROYECCIÓN. ESCENARIO B2.....	50
FIGURA 29. DISPERSIONES DE MEDIAS, DESVIACIONES TÍPICAS Y COEFICIENTES DE ASIMETRÍAS DE SERIES OBSERVADAS Y REGIONALIZADAS PARA EL CONJUNTO DE INFORMACIÓN DISPONIBLE EN ESPAÑA.....	51
FIGURA 30. REGIONES METEOROLÓGICAS (ARDILES Y FERRER, 1994).....	51
FIGURA 31. DISPERSIONES DE MEDIAS, DESVIACIONES TÍPICAS Y COEFICIENTES DE ASIMETRÍA DE SERIES OBSERVADAS Y PROYECTADAS EN LAS REGIONES NOROCCIDENTAL ATLÁNTICA (0101), LEVANTE (0801), CENTRO (0303) Y SUROESTE (0603).....	53
FIGURA 32 DIAGRAMAS QQ DE PMX OBSERVADAS Y EN PROYECCIONES DURANTE 1961-1990 .....	55

FIGURA 33. CICLOS ESTACIONALES DE PMX OBSERVADOS Y PROYECTADOS. PERIODO 1961-1990 .....	58
FIGURA 34. CICLOS ESTACIONALES DE PMX OBSERVADOS Y PROYECTADOS. PERIODO 1961-1990 .....	61
FIGURA 35. SERIES DE PRE ANUAL (MM) EN ESPAÑA. PERIODO DE CONTROL (VERDE). ESCENARIO DE EMISIONES A2 (ROJO) Y B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES .....	62
FIGURA 36. SERIES DE TEM ANUAL (°C) EN ESPAÑA. PERIODO DE CONTROL (VERDE). ESCENARIO DE EMISIONES A2 (ROJO) Y B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES .....	62
FIGURA 37. SERIES DE PRE ANUAL (MM) EN ESPAÑA PROMEDIADA CON DATOS EN ESTACIONES.....	63
FIGURA 38. TENDENCIAS (MM/AÑO) DE LAS SERIES PRE EN ESPAÑA.....	64
FIGURA 39. TEST DE MANN KENDALL: P-VALOR DE LAS SERIES PRE EN ESPAÑA .....	65
FIGURA 40. MEDIAS MÓVILES DE PRE (MM) EN ESPAÑA PROMEDIADA CON DATOS EN ESTACIONES.....	66
FIGURA 41. TEST WILCOXON: P-VALOR DE PRE EN ESPAÑA EN ESTACIONES 2011-2040.....	67
FIGURA 42. TEST WILCOXON: P-VALOR DE PRE EN ESPAÑA EN ESTACIONES 2041-2070.....	68
FIGURA 43. TEST WILCOXON: P-VALOR DE PRE EN ESPAÑA EN ESTACIONES 2071-2100.....	70
FIGURA 44. TEST F-SNEDECOR: P-VALOR DE PRE EN ESPAÑA EN ESTACIONES 2011-2040.....	71
FIGURA 45. TEST F-SNEDECOR: P-VALOR DE PRE EN ESPAÑA EN ESTACIONES 2041-2070.....	72
FIGURA 46. TEST F-SNEDECOR: P-VALOR DE PRE EN ESPAÑA EN ESTACIONES 2071-2100.....	73
FIGURA 47. CICLO ESTACIONAL DE PRE HASTA FINALES S. XXI. SERIES PROMEDIADAS CON DATOS EN ESTACIONES.....	74
FIGURA 48. SERIES DE TEM ANUAL EN ESPAÑA PROMEDIADA CON DATOS EN ESTACIONES.....	75
FIGURA 49. GRADIENTE (°C/AÑO) DE TEM EN ESPAÑA EN ESTACIONES.....	76
FIGURA 50. SERIES DE TEM ANUAL (°C) EN ESPAÑA PROMEDIADAS CON DATOS EN ESTACIONES.....	77
FIGURA 51. CICLO ESTACIONAL DE TEM (°C) HASTA FINALES S. XXI. SERIES PROMEDIADAS CON DATOS EN ESTACIONES.....	78
FIGURA 52. SERIES DE PMX ABSOLUTA EN ESPAÑA. PERIODO DE CONTROL (VERDE); ESCENARIO A2 (ROJO); ESCENARIO B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES.....	80
FIGURA 53. SERIES DE PMX (MM) EN EL NOROESTE, SURESTE Y LEVANTE, CENTRO Y SUROESTE. PERIODO DE CONTROL (VERDE), ESCENARIO A2 (ROJO); ESCENARIO B2 (AZUL).....	80
FIGURA 54. DIAGRAMAS QQ ENTRE ESCENARIOS A2 Y B2 DE LA PMX ABSOLUTA (MM).....	82
FIGURA 55. TEST DE MANN KENDALL EN SERIES PMX DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS (ECHAM4-FIC-A2) .....	83
FIGURA 56. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE MANN KENDALL EN SERIES PMX DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	84
FIGURA 57. TEST DE MANN KENDALL EN SERIES R95T DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS (ECHAM4-FIC-A2).....	85
FIGURA 58. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE MANN KENDALL EN SERIES R95T DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	86
FIGURA 59. DIAGRAMA QQ (MM) EN REGIONES CANTÁBRICA, LEVANTE Y NORORIENTAL DE LA PENÍNSULA ...	87
FIGURA 60. MAPA DE MEDIAS DE PMX PROMEDIADAS DEL CONJUNTO DE PROYECCIONES (MM) .....	89
FIGURA 61. MAPA DE DESVIACIÓN TÍPICA DE PMX PROMEDIADA DE PROYECCIONES (MM).....	90
FIGURA 62. TEST WILCOXON: P-VALOR EN CGCM2-FIC Y PERIODOS DE ESTUDIO .....	91
FIGURA 63. TEST WILCOXON: P-VALOR EN ECHAM4-FIC Y PERIODOS DE ESTUDIO .....	92
FIGURA 64. TEST WILCOXON: P-VALOR EN HADCM3-SDSM Y PERIODOS DE ESTUDIO .....	93

FIGURA 65. TEST WILCOXON: P-VALOR EN HADAM3-FIC Y PERIODO 2071-2100.....	94
FIGURA 66. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE WILCOXON EN SERIES PMX DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS. 2011-40 vs. 1961-90.....	95
FIGURA 67. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE WILCOXON DE SERIES PMX EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS. 2041-70 vs. 1961-90.....	96
FIGURA 68. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE WILCOXON DE SERIES PMX EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS. 2071-2100 vs. 1961-90.....	98
FIGURA 69. TEST FLIGNER KILLEEN: P-VALOR EN CGCM2-FIC Y PERIODOS DE ESTUDIO.....	99
FIGURA 70. TEST FLIGNER KILLEEN: P-VALOR EN ECHAM4-FIC Y PERIODOS DE ESTUDIO.....	100
FIGURA 71. TEST FLIGNER KILLEEN: P-VALOR EN HADCM3-SDSM Y PERIODOS DE ESTUDIO.....	101
FIGURA 72. TEST FLIGNER KILLEEN: P-VALOR EN HADAM3-FIC Y PERIODO 2071-2100.....	101
FIGURA 73. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE FLIGNER KILLEEN DE SERIES PMX EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS. 2011-40 vs. 1961-90.....	102
FIGURA 74. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE FLIGNER KILLEEN APLICADO A LAS SERIES PMX EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS, 2041-70 vs. 1961-90.....	103
FIGURA 75. REGIONALIZACIÓN DEL TEST DE FLIGNER KILLEEN DE SERIES PMX EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS. 2071-2100 vs. 1961-90.....	105
FIGURA 76. CICLOS ESTACIONALES DE PMX EN PROYECCIONES A LO LARGO DEL S. XXI (MM).....	107
FIGURA 77. SELECCIÓN DE ESTACIONES PARA EL CÁLCULO DE PATRONES DE PRE MENSUAL.....	109
FIGURA 78. PATRONES DE PRE (MM) 1961-1990 PARA CGCM2-FIC.....	110
FIGURA 79. PATRONES DE PRE (MM) OCTUBRE PARA CGCM2-FIC-A2.....	110
FIGURA 80. ADAPTACIÓN PATRÓN DE PRE (MM) EN REJILLA PRUDENCE (CENTRO) Y SUAVIZADO (DCHA).....	111
FIGURA 81. PRE PROYECTADA DESDE CELDAS PRUDENCE A LA ESCALA EQUIVALENTE A CELDAS DE 1 KM <sup>2</sup> . ENERO 2080, HADCM3-PROMES-A2.....	111
FIGURA 82. SERIES DE PRE ANUAL EN ESPAÑA. ESCENARIOS A2 (ROJO) Y B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES.....	112
FIGURA 83. Δ PRE ANUAL (%) EN ESPAÑA.....	112
FIGURA 84. Δ PRE ANUAL (%) EN ESPAÑA EN PERIODOS S. XXI.....	113
FIGURA 85. PRE ANUAL (MM) PARA EL PERIODO DE CONTROL Y PERIODOS DEL S. XXI.....	114
FIGURA 86. Δ PRE ANUAL (%) POR PERIODO DEL S. XXI RESPECTO AL PERIODO DE CONTROL.....	115
FIGURA 87. CICLOS ESTACIONALES DE PRE ESTANDARIZADA POR PERIODO Y ESCENARIO.....	118
FIGURA 88. CICLOS ESTACIONALES DE PRE ESTANDARIZADA POR PROYECCIÓN.....	120
FIGURA 89. SELECCIÓN DE ESTACIONES PARA EL CÁLCULO DE PATRONES DE TEMPERATURA MENSUAL.....	122
FIGURA 90. PATRONES DE TMX Y TMN EN 1961-1990 PARA CGCM2-FIC.....	122
FIGURA 91. PATRONES DE TMN Y TMX DE OCTUBRE PARA CGCM2-FIC-A2.....	123
FIGURA 92. PATRONES DE TMN EN JUNIO EN CELDAS DE 1 KM <sup>2</sup> (IZDA) Y VALORES MEDIOS EN CELDAS PRUDENCE (CENTRO) Y SU SUAVIZADO (DCHA).....	124
FIGURA 93. MAPA SUAVIZADO DE MEDIAS DE TMN (°C) AGRUPADAS EN CELDAS PRUDENCE (IZDA) Y MAPA FINAL DE TEM (DCHA). SIMULACIÓN PARA JUNIO 2080 POR HADCM3-PROMES-A2.....	124
FIGURA 94. SERIES DE TEM ANUAL EN ESPAÑA. A2 (ROJO); B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES.....	125
FIGURA 95. Δ TEM ANUAL (°C) EN ESPAÑA.....	125

FIGURA 96. $\Delta$ TEM ANUAL ( $^{\circ}$ C) POR PERIODO EN ESPAÑA.....	126
FIGURA 97. CICLO ESTACIONAL DE TEMPERATURA ( $^{\circ}$ C) POR PROYECCIÓN.....	129
FIGURA 98. $\Delta$ TEM ( $^{\circ}$ C) ESTACIONAL EN ESPAÑA .....	130
FIGURA 99. SERIES DE ETP ANUAL EN ESPAÑA. PERIODO DE CONTROL (VERDE); A2 (ROJO); B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES .....	131
FIGURA 100. $\Delta$ ETP (%) ANUAL EN ESPAÑA .....	131
FIGURA 101. $\Delta$ ETP (%) ANUAL POR PERIODO EN ESPAÑA.....	132
FIGURA 102. ETP ANUAL PROMEDIO DE LAS PROYECCIONES. PERIODO DE CONTROL Y S. XXI .....	133
FIGURA 103. $\Delta$ ETP (%) EN CADA PERIODO DEL S. XXI RESPECTO AL PERIODO DE CONTROL.....	134
FIGURA 104. CICLO ESTACIONAL DE ETP (MM) POR PROYECCIÓN .....	137
FIGURA 105. SERIES DE ETR (MM) ANUAL EN ESPAÑA. PERIODO DE CONTROL (VERDE); A2 (ROJO); B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES.....	140
FIGURA 106. $\Delta$ ETR (%) EN ESPAÑA EN PERIODOS S. XXI .....	140
FIGURA 107. ETR (MM) MEDIA ANUAL EN EL PERIODO DE CONTROL Y POR PERIODO DEL SIGLO XXI .....	142
FIGURA 108. $\Delta$ ETR (%) POR PERIODO DEL SIGLO XXI RESPECTO AL PERIODO DE CONTROL .....	143
FIGURA 109. CICLO MEDIO DE ETR ESTANDARIZADA DURANTE 1961-1990 .....	145
FIGURA 110. CICLO ESTACIONAL DE ETR (MM) POR PROYECCIÓN .....	147
FIGURA 111. VARIACIÓN $H_{MS}/H_{MÁX}$ (%) DEL PERIODO 2011-2040 RESPECTO AL 1961-1990. SRES A2... 149	
FIGURA 112. VARIACIÓN $H_{MS}/H_{MÁX}$ (%) DEL PERIODO 2071-2100 RESPECTO AL 1961-1990. SRES A2... 150	
FIGURA 113. VARIACIÓN $H_{MS}/H_{MÁX}$ (%) DEL PERIODO 2071-2100 RESPECTO AL 1961-1990. SRES B2... 150	
FIGURA 114. CICLO ESTACIONAL DE HMS (MM) POR PROYECCIÓN .....	153
FIGURA 115. ÁREAS DEL TERRITORIO ESPAÑOL CON MÁS DE 1.500 METROS DE ALTITUD .....	156
FIGURA 116. Nº DE DÍAS DE HELADA EN SELECCIÓN DE ESTACIONES.....	158
FIGURA 117. ESTACIONALIDAD DEL Nº DE DÍAS DE HELADA EN LAS PROYECCIONES.....	159
FIGURA 118. AGUA ( $HM^3$ ) ACUMULADA EN NIEVE EN EL PIRINEO (A PARTIR DE COBOS ET AL, 2006).....	160
FIGURA 119. $\Delta$ PRE MENSUAL (%) Y $\Delta$ TEM MENSUAL ( $^{\circ}$ C) EN EL CANTÁBRICO, PARA CADA PROYECCIÓN (LÍNEAS FINAS) Y LA MEDIA DE PROYECCIONES (LÍNEA GRUESA).....	160
FIGURA 120. $\Delta$ PRE MENSUAL (%) Y $\Delta$ TEM MENSUAL ( $^{\circ}$ C) EN EL PIRINEO, PARA CADA PROYECCIÓN (LÍNEAS FINAS) Y LA MEDIA DE PROYECCIONES (LÍNEA GRUESA).....	161
FIGURA 121. $\Delta$ PRE MENSUAL (%) Y $\Delta$ TEM MENSUAL ( $^{\circ}$ C) EN CORDILLERA IBÉRICA NORTE, PARA CADA PROYECCIÓN (LÍNEAS FINAS) Y LA MEDIA DE PROYECCIONES (LÍNEA GRUESA) .....	161
FIGURA 122. $\Delta$ PRE MENSUAL (%) Y $\Delta$ TEM MENSUAL ( $^{\circ}$ C) EN CORDILLERA IBÉRICA SUR, PARA CADA PROYECCIÓN (LÍNEAS FINAS) Y LA MEDIA DE PROYECCIONES (LÍNEA GRUESA) .....	162
FIGURA 123. $\Delta$ PRE MENSUAL (%) Y $\Delta$ TEM MENSUAL ( $^{\circ}$ C) EN SISTEMA CENTRAL, PARA CADA PROYECCIÓN (LÍNEAS FINAS) Y LA MEDIA DE PROYECCIONES (LÍNEA GRUESA).....	162
FIGURA 124. $\Delta$ PRE MENSUAL (%) Y $\Delta$ TEM MENSUAL ( $^{\circ}$ C) EN CORDILLERA BÉTICA, PARA CADA PROYECCIÓN Y LA MEDIA DE PROYECCIONES (TRAZO GRUESO).....	163
FIGURA 125. SERIES DE REC ANUAL EN ESPAÑA. PERIODO CONTROL (VERDE); A2 (ROJO); B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES .....	164
FIGURA 126. $\Delta$ REC ANUAL (%) EN ESPAÑA EN PERIODOS S. XXI .....	165
FIGURA 127. REC ANUAL SIMULADA PARA EL PERIODO DE CONTROL Y POR PERIODO DEL S. XXI .....	166

FIGURA 128. $\Delta$ REC ANUAL (%) POR PERIODO DEL S. XXI RESPECTO AL PERIODO DE CONTROL.....	167
FIGURA 129. $\Delta$ REC ANUAL (%) POR D.H., PROYECCIÓN Y PERIODO.....	168
FIGURA 130. CICLO ESTACIONAL DE LA REC POR PROYECCIÓN .....	171
FIGURA 131. CICLO ESTACIONAL DE LA REC (MM) SUBTERRÁNEA EN EL JÚCAR POR PROYECCIÓN .....	173
FIGURA 132 SERIES ESC ANUAL EN ESPAÑA. PERIODO CONTROL (VERDE); A2 (ROJO); B2 (AZUL). TRAZO GRUESO: MEDIA DE LAS PROYECCIONES .....	174
FIGURA 133. DIAGRAMAS DE CAJAS DE LAS PROYECCIONES EN ESC ANUAL EN ESPAÑA .....	175
FIGURA 134. $\Delta$ ESC ANUAL (%) EN ESPAÑA EN PERIODOS S. XXI .....	176
FIGURA 135. ESC (MM) ANUAL DEL CONJUNTO DE PROYECCIONES PARA PERIODO DE CONTROL Y S. XXI... ..	178
FIGURA 136. $\Delta$ ESC ANUAL (%) PARA 2011-2040 (A2 Y B2).....	178
FIGURA 137. $\Delta$ ESC ANUAL (%) MEDIA, MÁXIMA Y MÍNIMA PARA 2011-2040 .....	180
FIGURA 138. $\Delta$ ESC ANUAL (%) PARA 2041-2070 (A2 Y B2).....	181
FIGURA 139. $\Delta$ ESC ANUAL (%) MEDIA, MÁXIMA Y MÍNIMA PARA 2041-2070 .....	182
FIGURA 140. $\Delta$ ESC ANUAL (%) PARA 2071-2100 (A2).....	183
FIGURA 141. $\Delta$ ESC ANUAL (%) PARA 2071-2100 (B2).....	183
FIGURA 142. $\Delta$ ESC ANUAL (%) MEDIA, MÁXIMA Y MÍNIMA PARA 2071-2100 .....	185
FIGURA 143. $\Delta$ APN (%) EN LA RED HIDROGRÁFICA. 2011-2040, A2 .....	186
FIGURA 144. $\Delta$ APN (%) EN LA RED HIDROGRÁFICA. 2011-2040, B2 .....	186
FIGURA 145. $\Delta$ APN (%) EN LA RED HIDROGRÁFICA. 2041-2070, A2 .....	187
FIGURA 146. $\Delta$ APN (%) EN LA RED HIDROGRÁFICA. 2041-2070, B2 .....	187
FIGURA 147. $\Delta$ APN (%) EN LA RED HIDROGRÁFICA. 2071-2100, A2 .....	188
FIGURA 148. $\Delta$ APN (%) EN LA RED HIDROGRÁFICA. 2071-2100, B2 .....	188
FIGURA 149. CICLO ESTACIONAL ESC (MM) POR PROYECCIÓN Y PERIODO .....	191
FIGURA 150. SERIES DE PRE ANUAL (AZUL) Y ESC ANUAL (VERDE) EN ESPAÑA OBTENIDAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO SIMPA08. MEDIAS POR PERIODO SUPERPUESTAS .....	193
FIGURA 151. SERIES MEDIAS MENSUALES EN LA D.H. DEL EBRO (MM). ESCENARIO A2 .....	196
FIGURA 152. DESCENSO DE ESC (MM) EN ESPAÑA SEGÚN SIMPA Y SCHREIBER-BUDYKO.....	201
FIGURA 153. MÉTODO DIRECTO Y TRANSFORMACIÓN DELTA. $\Delta$ ESC ANUAL (%) POR SCHREIBER-BUDYKO. PERIODOS 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100 .....	204
FIGURA 154. DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA DE PMX REGIONAL. ESCENARIOS A2 (LÍNEA CONTINUA); B2 (LÍNEA DISCONTINUA) .....	211
FIGURA 155. MAPAS PROMEDIO DEL CONJUNTO DE PROYECCIONES DE PMX PARA UN T DE 100 AÑOS (MM) .....	212
FIGURA 156. MAPAS DE $\Delta$ (%) DE LOS CUANTILES DE PMX RESPECTO AL 1961-1990 PARA UN T 100 AÑOS. CGCM2-FIC .....	214
FIGURA 157. MAPAS DE $\Delta$ (%) DE LOS CUANTILES DE PMX RESPECTO AL 1961-1990 PARA UN T 100 AÑOS. ECHAM4-FIC .....	215
FIGURA 158. MAPAS DE $\Delta$ (%) DE LOS CUANTILES DE PMX RESPECTO AL 1961-1990 PARA UN T 100 AÑOS. HADCM3-SDSM .....	216
FIGURA 159. MAPAS DE $\Delta$ (%) DE LOS CUANTILES DE PMX RESPECTO AL 1961-1990 PARA UN T 100 AÑOS. HADAM3-FIC .....	216

FIGURA 160. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN ESPAÑA. ....	219
FIGURA 161. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN D.H. CANTÁBRICO. ....	220
FIGURA 162. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN LA D.H. EBRO.....	221
FIGURA 163. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN C.I. DE CATALUÑA .....	222
FIGURA 164. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN D.H. JÚCAR.....	223
FIGURA 165. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN LA D.H. GUADIANA.....	224
FIGURA 166. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN LA D.H. SEGURA.....	225
FIGURA 167. FRECUENCIA DE SEQUÍA PARA DISTINTAS DURACIONES EN C.I. ANDALUCÍA .....	226
FIGURA 168. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN ESPAÑA.....	231
FIGURA 169. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL CANTÁBRICO... 232	
FIGURA 170. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LAS C.I. DE GALICIA-COSTA 233	
FIGURA 171. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL MIÑO-SIL..... 234	
FIGURA 172. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LAS C.I. DEL PAÍS VASCO ... 235	
FIGURA 173. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL DUERO .....	236
FIGURA 174. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL TAJO .....	237
FIGURA 175. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL GUADIANA .....	238
FIGURA 176. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL GUADALQUIVIR 239	
FIGURA 177. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LAS C.I. DE ANDALUCÍA .....	240
FIGURA 178. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL SEGURA .....	241
FIGURA 179. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL JÚCAR .....	242
FIGURA 180. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LA D.H. DEL EBRO .....	243
FIGURA 181. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LAS C.I. DE CATALUÑA .....	244
FIGURA 182. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LAS ISLAS BALEARES.....	245
FIGURA 183. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE VARIABLES HIDROLÓGICAS EN LAS ISLAS CANARIAS. ....	246

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MCG, TÉCNICAS DE REGIONALIZACIÓN Y PERIODOS OBJETO DEL PRESENTE INFORME CEDEX.....	2
TABLA 2. $\Delta$ APN (%), HORIZONTE 2027 (ARM/2656/2008) .....	6
TABLA 3. MCGAO UTILIZADOS EN EL PROCESO DE EVALUACIÓN EN EL TAR. EXTRAÍDO DEL IPCC (2001A).	11
TABLA 4. PROYECCIONES OBJETO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA .....	14
TABLA 5. $\Delta$ ESC ANUAL (%) PARA 2030. TABLA. ESCENARIOS LBAE (MIMAM, 2000A Y B).....	19
TABLA 6. RESULTADOS EN 19 PEQUEÑAS CUENCAS ESPAÑOLAS (FERNÁNDEZ CARRASCO, 2002) .....	21
TABLA 7. PRE (MM) Y EMR (%) ENTRE PROYECCIONES Y DATOS OBSERVADOS EN GRANDES CUENCAS.....	41
TABLA 8. COMPARATIVA DE DATOS DE PRE (MM) ESTACIONALES OBSERVADOS Y PROYECTADOS .....	45
TABLA 9. ESTADÍSTICOS DE LA SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS. ESCENARIOS A2 Y B2.....	46
TABLA 10. TENDENCIAS (MM/AÑO Y P-VALOR) DE LAS SERIES DE PRE EN ESPAÑA PROMEDIADA.....	63
TABLA 11. ESTADÍSTICOS DE PRE EN ESPAÑA CON DATOS EN ESTACIONES. ESCENARIOS A2 Y B2.....	66
TABLA 12. GRADIENTE ( $^{\circ}$ C/AÑO) DE TEM ANUAL EN ESPAÑA PROMEDIADA CON DATOS EN ESTACIONES .....	75
TABLA 13. ESTADÍSTICOS DE LAS SERIES DE TEM ANUAL EN ESPAÑA CON DATOS EN ESTACIONES .....	77
TABLA 14. NÚMERO DE PATRONES ESTIMADOS PARA INTERPOLACIÓN .....	108
TABLA 15. $\Delta$ PRE ANUAL (%) POR D.H., PROYECCIÓN Y PERIODO.....	116
TABLA 16. $\Delta$ PRE (%) ESTACIONAL EN ESPAÑA .....	121
TABLA 17. $\Delta$ TEM ANUAL ( $^{\circ}$ C) POR D.H., PROYECCIÓN Y PERIODO .....	127
TABLA 18. $\Delta$ ETP (%) MEDIA POR D.H., PROYECCIÓN Y PERIODO.....	135
TABLA 19. $\Delta$ ETP (%) ESTACIONAL EN ESPAÑA.....	138
TABLA 20. $\Delta$ ETR (%) POR D.H., PROYECCIÓN Y PERIODO .....	144
TABLA 21. $\Delta$ ETR (%) ESTACIONAL EN ESPAÑA.....	148
TABLA 22. VARIACIÓN HMS/H <sub>MÁX</sub> (%) ESTACIONAL EN ESPAÑA .....	151
TABLA 23. $\Delta$ HMS (%) MEDIA ESTACIONAL EN ESPAÑA.....	154
TABLA 24. $\Delta$ HMS (%) POR D.H., PROYECCIÓN Y PERIODO.....	155
TABLA 25. $\Delta$ REC (%) ESTACIONAL EN ESPAÑA .....	173
TABLA 26. $\Delta$ ESC (%) EN ESPAÑA.....	189
TABLA 27. $\Delta$ PRE ANUAL (%) (IZDA) Y $\Delta$ ESC ANUAL (%) (DCHA) POR D.H. PERIODO 2011-2040 RESPECTO AL 1961-1990 .....	193
TABLA 28. $\Delta$ PRE ANUAL (%) (IZDA) Y $\Delta$ ESC ANUAL (%) (DCHA) POR D.H. PERIODO 2011-2040 RESPECTO AL 1940-2005 (SUPERIOR) Y AL 1980-2005 (INFERIOR).....	194
TABLA 29. $\Delta$ PRE ANUAL (%) (IZDA) Y $\Delta$ ESC ANUAL (%) (DCHA) POR D.H. PERIODO 2041-2070 RESPECTO AL 1940-2005 (SUPERIOR) Y AL 1980-2005 (INFERIOR).....	195
TABLA 30. $\Delta$ PRE ANUAL (%) (IZDA) Y $\Delta$ ESC ANUAL (%) (DCHA) POR D.H. PERIODO 2011-2040 RESPECTO A 1961-1990 (SUPERIOR); 1940-2005 (MEDIA); 1980-2005 (INFERIOR). OTOÑO.....	197
TABLA 31. $\Delta$ PRE ANUAL (%) (IZDA) Y $\Delta$ ESC ANUAL (%) (DCHA) POR D.H. PERIODO 2011-2040 RESPECTO A 1961-1990 (SUPERIOR); 1940-2005 (MEDIA); 1980-2005 (INFERIOR). INVIERNO.....	198

TABLA 32. $\Delta$ PRE ANUAL (%) (IZDA) Y $\Delta$ ESC ANUAL (%) (DCHA) POR D.H. PERIODO 2011-2040 RESPECTO A 1961-1990 (SUPERIOR); 1940-2005 (MEDIA); 1980-2005 (INFERIOR).PRIMAVERA .....	199
TABLA 33. $\Delta$ PRE ANUAL (%) (IZDA) Y $\Delta$ ESC ANUAL (%) (DCHA) POR D.H. PERIODO 2011-2040 RESPECTO A 1961-1990 (SUPERIOR); 1940-2005 (MEDIA); 1980-2005 (INFERIOR). VERANO .....	200
TABLA 34. $\Delta$ (%) OBTENIDAS MEDIANTE SIMPA Y SCHREIBER-BUDYKO.....	201
TABLA 35. MÉTODO DIRECTO Y TRANSFORMACIÓN DELTA. $\Delta$ ESC ANUAL (%) POR SCHREIBER-BUDYKO. PERIODO 2011-2040 .....	202
TABLA 36. MÉTODO DIRECTO Y TRANSFORMACIÓN DELTA. $\Delta$ ESC ANUAL (%) POR SCHREIBER-BUDYKO. PERIODO 2041-2070 .....	202
TABLA 37. MÉTODO DIRECTO Y TRANSFORMACIÓN DELTA. $\Delta$ ESC ANUAL (%) POR SCHREIBER-BUDYKO. PERIODO 2071-2100. ESCENARIOS CLIMÁTICOS A2 .....	203
TABLA 38. MÉTODO DIRECTO Y TRANSFORMACIÓN DELTA. $\Delta$ ESC ANUAL (%) POR SCHREIBER-BUDYKO. PERIODO 2071-2100. ESCENARIOS CLIMÁTICOS B2 .....	203
TABLA 39. COMPARATIVA DE $\Delta$ APN (%) EN IPH-LBAE .....	230

## 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este informe es el análisis de los impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos en régimen natural en España. Se parte de los datos de precipitación y temperatura derivados de la selección de escenarios climáticos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2008). Han sido proporcionados por la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) y cubren los periodos cuatro temporales entre el s. XX, de 1961 a 1990, y otros tres en el s. XXI, comprendidos entre los años 2011 y 2040, 2041 y 2070 y 2071 y 2100. Los recursos hídricos en régimen natural se simulan utilizando un modelo hidrológico distribuido de paso mensual con resolución de 1 km<sup>2</sup> para toda España, Península e islas, tal como se ha realizado en el Libro Blanco del Agua en España, LBAE, (MIMAM, 2000a) y en las sucesivas fases del proceso de Planificación Hidrológica.

Estos trabajos están contemplados en la encomienda de gestión del 23 de abril de 2007, publicada en el BOE del 11 agosto de 2007 como Resolución de 3 de agosto de 2007 de la Subsecretaría de la Presidencia. Mediante esa encomienda, la Dirección General del Agua, del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, encargó al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento, el estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. La encomienda define cuatro actividades a realizar por el CEDEX, cada una de las cuales deberá ser objeto de un informe específico. La primera actividad es el objetivo de este informe y consiste en estudiar el efecto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural, así como un estudio del impacto en eventos extremos.

Dicho objetivo está enmarcado en una de las actividades indicadas en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC): la evaluación de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España en el siglo XXI mediante una modelización cuantitativa y cualitativa de los escenarios hidrológicos, identificando las áreas más críticas a los efectos del cambio climático.

Los datos de precipitación y temperatura utilizados en este informe proceden de los trabajos de regionalización en España (AEMET, 2008) de modelos de circulación global del 3<sup>er</sup> Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). En este informe se ha denominado proyección a cada hipótesis de clima futuro, determinada por la combinación de un escenario de emisiones, de un modelo climático de circulación global, MCG, y de una técnica de proyección regional. Del conjunto total disponible en España, AEMET seleccionó un subconjunto que, bajo la hipótesis de equiprobabilidad, representara la variabilidad del total de proyecciones. No obstante a la premisa fundamental de equiprobabilidad de cualquiera de las proyecciones de estudio, se ha manejado como índice de impacto en cada fase del ciclo hidrológico el promedio de resultados por escenario climático, A2 y B2. La siguiente tabla enumera la combinación de escenarios, modelos, procesos de regionalización y periodos objeto de este informe. Los acrónimos utilizados se pueden consultar en el capítulo de abreviaciones y corresponden a modelos y técnicas conocidas en el campo de la simulación del clima.

MCG	CGCM2	ECHAM4	HadAM3	HadCM3	PRUDENCE ECHAM4	PRUDENCE HadCM3
Regionalización Escenarios de emisiones A2 y B2	FIC	FIC	FIC	SDSM	RCM. RCOA- SMHI	RCM. PROMES
Periodos temporales	1961-1990 2011-2100	1961-1990 2011-2100	1961-1990 2071-2100	1961-1990 2011-2100	1961-1990 2071-2100	1961-1990 2071-2100

Tabla 1. MCG, técnicas de regionalización y periodos objeto del presente informe CEDEX

En consonancia con la Encomienda de Gestión, los objetivos concretos del trabajo, son los siguientes:

1. Comparativa de los resultados de las proyecciones climáticas con los datos observados de lluvia y temperatura durante el periodo 1961 y 1990.
2. Tratamiento de las proyecciones en fase atmosférica para la obtención de mapas en paso mensual a la escala de trabajo del modelo del modelo hidrológico.
3. Implementación del modelo de simulación hidrológica una vez estimadas las variables atmosféricas de entrada
4. Evaluación del impacto del cambio climático en el conjunto de variables tratadas: precipitación, ETP, escorrentía superficial, subterránea y total, humedad en el suelo y recarga a los acuíferos.
5. Análisis del impacto del cambio climático en términos de frecuencia, duración e intensidad de las sequías en las grandes cuencas de España.
6. Análisis de los impactos del cambio climático en lluvias extremas.
7. Elaboración de conclusiones.

Los resultados anteriores se organizarán para su consulta y difusión en una base de datos geográfica.

## 2 MARCO DE REFERENCIA Y NORMATIVA EN ESPAÑA

En el año 1992 se adopta en Nueva York la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, la cual entra en vigor en 1994. La Convención establece un contexto para la lucha contra el cambio climático y reconoce que el sistema climático es un recurso compartido cuya estabilidad puede verse afectada por actividades industriales y de otro tipo que emiten dióxido de carbono y otros gases que retienen el calor. La Convención se ha venido desarrollando a través de la Conferencia de las Partes y de Protocolos de Actuación (Kyoto 1997). Las bases técnicas que soportan la Convención son establecidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

El IPCC fue establecido conjuntamente en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) con el mandato de analizar la información científica necesaria para abordar el problema del cambio climático y evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas y de formular estrategias de respuesta realistas.

Desde su establecimiento, el IPCC ha elaborado una serie de informes de evaluación, informes especiales, documentos técnicos, metodologías y otros productos que se han convertido en obras de referencia, ampliamente utilizadas por los responsables de políticas, científicos y otros expertos. Hasta la fecha actual hay 4 informes de evaluación. El primero de ellos se presentó en 1990, el segundo en 1995, el tercero en 2001 y el cuarto en 2007. En los informes de evaluación se resumen las conclusiones de los tres informes de los Grupos de trabajo (Base científica [1], Impactos, adaptación y vulnerabilidad [2] y Mitigación [3]) y se sintetizan aspectos de interés para los responsables de políticas en la esfera del cambio climático.

La figura siguiente está tomada del 4AR (IPCC, 2007) muestra la evolución de las temperaturas observadas durante el s. XX y de las pronosticadas para el s. XXI. En los 100 años comprendidos en el periodo 1906 a 2005 se ha registrado un incremento medio global de la temperatura media de 0,74 °C. Este hecho ha venido acompañado de una disminución de las extensiones de nieve y hielo, de una elevación del nivel del mar, de variaciones en la precipitación y de probables variaciones en eventos extremos (IPCC, 2007).

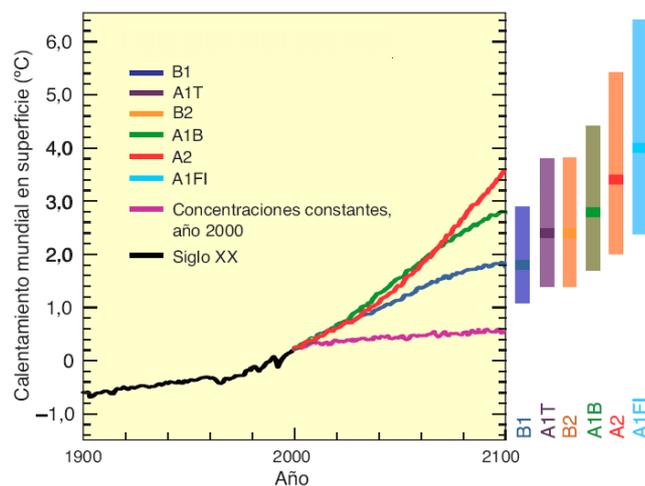


Figura 1. Incremento de temperatura media global en los s. XX y XXI (IPCC, 2007)

Las variaciones climáticas para el s. XXI están sujetas a incertidumbres, si bien se estima que habrá un calentamiento de 0,2 °C en cada uno de los dos primeros decenios y que la evolución posterior estará influenciada por los escenarios de emisión (B1, A1T, B2, A1B, A2, A1FI). Se pronostica que se acentuarán los cambios experimentados en el clima a lo largo del siglo anterior (IPCC, 2007). En términos del informe del IPCC, muy probablemente

aumentará la frecuencia de los valores extremos cálidos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas; muy probablemente aumentarán las precipitaciones en latitudes altas y, probablemente, disminuirán en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales. Con un grado de confianza alto las proyecciones indican que, hacia mediados del siglo XXI, los recursos y la disponibilidad de agua aumentarán en latitudes altas y en ciertas áreas lluviosas tropicales; y disminuirán en algunas regiones secas en latitudes medias y en los trópicos. Con un grado de confianza alto, numerosas áreas semiáridas, por ejemplo, la cuenca mediterránea, el oeste de los Estados Unidos, el sur de África y el nordeste de Brasil, experimentarán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático. En el área mediterránea los modelos climáticos proyectan una reducción de precipitación y un aumento de evaporación y transpiración de las plantas, efectos concurrentes en una disminución de escorrentías y en el empeoramiento de condiciones en una región de considerable variabilidad climática.

El último documento técnico del IPCC (Bates, 2008) trata de forma específica las cuestiones del agua. Entre la serie de conclusiones relativas a los recursos hídricos objeto de este trabajo, se destacarían:

1. El calentamiento observado durante varias décadas ha sido vinculado a cambios globales experimentados por el ciclo hidrológico. En particular, el aumento del contenido de vapor de agua en la atmósfera, la variación de las características de intensidad y magnitud de precipitaciones extremas, la disminución de la capa de nieve y la fusión generalizada del hielo y cambios en la humedad del suelo y en la escorrentía. Durante el siglo XX, la precipitación ha aumentado en mayor medida en extensiones terrestres y en latitudes septentrionales y ha disminuido entre los 10°S y los 30°N a partir de los años 70. En la mayoría de las áreas, la frecuencia de fenómenos de precipitación intensa o la proporción total de lluvia descargada por lluvias intensas ha aumentado (probable). La superficie mundial de tierra clasificada como muy seca se ha duplicado con creces desde los años 70 (probable). Ha habido disminuciones importantes de la cantidad de agua almacenada en los glaciares de montaña y en la cubierta de nieve del Hemisferio Norte. Se han observado variaciones en la amplitud y cronología de las crecidas en los ríos alimentados por glaciares o por el deshielo de nieve, y en fenómenos relacionados con el hielo en ríos y lagos (nivel de confianza alto).
2. Las simulaciones mediante modelos climáticos concuerdan en proyectar para el siglo XXI un aumento de la precipitación en latitudes altas (muy probable) y parte de los trópicos y una disminución en algunas regiones subtropicales y en latitudes medias y bajas (probable). Fuera de esas áreas, el signo y magnitud de los cambios proyectados varían de un modelo a otro, dando lugar a una considerable incertidumbre respecto a las proyecciones de precipitación. Así pues, las proyecciones de los cambios futuros de la precipitación son más fiables para unas regiones que para otras. Las proyecciones de los modelos concuerdan tanto menos cuanto más disminuye la escala espacial.
3. Para mediados del siglo XXI las proyecciones indican que, como consecuencia del cambio climático, el recurso y la disponibilidad de agua aumentarían en latitudes altas y en algunas áreas tropicales húmedas y disminuirían en algunas regiones secas de latitudes medias y en regiones tropicales secas. Muchas áreas semiáridas y áridas (por ejemplo, la cuenca mediterránea, el oeste de Estados Unidos de América, el sur de África o el nordeste de Brasil) están particularmente expuestas a los efectos del cambio climático y experimentarían una disminución de sus recursos hídricos como consecuencia del cambio climático (nivel de confianza alto).

4. Según las proyecciones, la intensidad y variabilidad crecientes de la precipitación agravarían el riesgo de inundaciones y sequías en numerosas áreas. La frecuencia de episodios de precipitación intensa o la proporción total de lluvia descargada por lluvias intensas aumentará muy probablemente en la mayoría de las áreas durante el siglo XXI, repercutiendo así en el riesgo de inundaciones provocadas por lluvias. Al mismo tiempo, aumentará la proporción de superficie terrestre que padece sequía extrema (probable), y se manifestará una tendencia a la sequía en el interior de los continentes durante el verano, particularmente en las regiones subtropicales de latitudes bajas y medias.
5. Las proyecciones indican que las reservas de agua almacenada en los glaciares y en la capa de nieve disminuirán durante este siglo. Se reduce así la disponibilidad de agua durante los periodos calurosos y secos debido a un cambio estacional del caudal fluvial, a un aumento de las aportaciones invernales al total anual y a reducciones de los caudales menores en regiones dependientes del deshielo en las principales cordilleras montañosas (nivel de confianza alto).

Estas conclusiones describen tanto una situación como un conjunto de predicciones de carácter negativo en latitudes similares a las de España. Por un lado, se menciona que se ha observado desde los años 70 una disminución de precipitaciones y del agua almacenada en glaciares y neveros, así como un aumento del número de eventos de lluvia intensa y de la superficie de tierra seca. Por otro, las proyecciones basadas en el uso de modelos climáticos indican como probable una disminución de lluvia, escorrentía y disponibilidad de agua y el aumento de las precipitaciones extremas y agravamiento de las sequías. El resto de conclusiones del documento IPCC (Bates, 2008) se refieren a efectos diferidos relacionados con la calidad del agua, la planificación hidráulica y la gestión del recurso.

En España, la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia es la contribución a sus compromisos en esta materia. Una de las áreas de actuación de la Estrategia es la Adaptación, concretada mediante el PNACC, marco de referencia para la coordinación entre las Administraciones Públicas en las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en España. El PNACC está en consonancia con los resultados de los trabajos llevados a cabo por el Grupo 2 del IPCC. Fue aprobado en julio de 2006 por la Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático y por el Consejo Nacional del Clima; el Consejo de Ministros tomó conocimiento del mismo en su sesión del 6 de octubre de 2006.

Dicho Plan contempla, inicialmente, una serie de sistemas ecológicos y sectores socioeconómicos donde realizar las evaluaciones de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: biodiversidad, recursos hídricos, bosques, sector agrícola, zonas costeras, caza y pesca continental, zonas de montaña, pesca y ecosistemas marinos, transporte, salud humana, industria y energía, turismo, finanzas–seguros, urbanismo y construcción. Consecuentemente, una de las tareas a realizar es la evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

El desarrollo del Plan se realiza mediante Programas de Trabajo. El primer Programa de Trabajo contempla, entre otras, las siguientes actividades:

- Generar escenarios climáticos regionales.
- Desarrollar, documentar y poner a disposición del Plan Nacional de Adaptación los escenarios climáticos regionales para España.
- Poner en funcionamiento un mecanismo de generación operativa y actualización de escenarios climáticos regionales para España, que alimente de forma periódica al Plan Nacional de Adaptación.

- Realizar una evaluación de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España en el siglo XXI mediante una modelización cuantitativa y cualitativa de los escenarios hidrológicos, identificando las áreas más críticas a los efectos del cambio climático.
- Realizar una evaluación de la capacidad del actual sistema de gestión de recursos hídricos para gestionar los nuevos escenarios hidrológicos.
- Realizar una primera valoración de los efectos potenciales del cambio climático sobre determinadas demandas en España, identificando medidas para la adaptación de la oferta y demanda de recursos hídricos.

El Reglamento de Planificación Hidrológica (RD 907/2007) y la Instrucción de Planificación Hidrológica (ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino indican que los planes hidrológicos evaluarán el posible efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos naturales mediante modelos de simulación hidrológica para el horizonte del año 2027. Hasta que no se disponga de esas evaluaciones, la Instrucción precisa que se deberán aplicar los siguientes porcentajes de reducción global de las aportaciones naturales de referencia:

Demarcación hidrográfica	Disminución (%)
Miño-Sil	3
Cantábrico	2
Duero	6
Tajo	7
Guadiana	11
Guadalquivir	8
Segura	11
Júcar	9
Ebro	5

Tabla 2.  $\Delta$  APN (%), horizonte 2027 (ARM/2656/2008)

La Directiva de Inundaciones tiene por objeto gestionar y reducir el riesgo de inundaciones, especialmente en las riberas y zonas costeras. Por tanto, prevé la evaluación del riesgo en las cuencas hidrográficas, la elaboración de una cartografía de inundaciones y de los planes de gestión de crisis. El concepto de cambio climático se menciona explícitamente en diferentes ocasiones en el texto (Directiva 2007/60/CE) con el objetivo de integrar las previsiones en las evaluaciones como riesgo futuro y en los procedimientos de revisión. Así, en el apartado de consideraciones,

*(2) Las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse. No obstante, algunas actividades humanas (como el incremento de los asentamientos humanos y los bienes económicos en las llanuras aluviales y la reducción de la capacidad natural de retención de las aguas por el suelo) y el cambio climático están contribuyendo a aumentar las probabilidades de que ocurran, así como su impacto negativo.*

*(4) La Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas [3], impone la elaboración de planes de gestión de cuenca fluvial para cada demarcación hidrográfica con objeto de conseguir un buen estado químico y ecológico, y contribuirá a mitigar los efectos de las inundaciones. No obstante, la reducción del riesgo de inundación no es uno de los objetivos principales de esa Directiva, que tampoco tiene en cuenta los futuros cambios del riesgo de inundación que se derivarán del cambio climático.*

*(14) Los planes de gestión del riesgo de inundación deben centrarse en la prevención, la protección y la preparación. Con miras a dar más espacio a los ríos, deben tomar en consideración, cuando sea posible, el mantenimiento o el restablecimiento de llanuras aluviales, así como medidas para prevenir y reducir los daños a la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica. Los elementos de los planes de gestión del riesgo de inundación deben revisarse periódicamente y en caso de necesidad actualizarse, teniendo en cuenta las repercusiones probables del cambio climático en la incidencia de inundaciones.*

En el capítulo Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, artículo 4, apartado 2

*2. Sobre la base de la información de que se disponga o que pueda deducirse con facilidad, como datos registrados y estudios sobre la evolución a largo plazo, en especial sobre el impacto del cambio climático en la frecuencia de las inundaciones, se realizará una evaluación preliminar del riesgo de inundación con objeto de proporcionar una evaluación del riesgo potencial. La evaluación tendrá como mínimo el siguiente contenido:*

*a) mapas de la demarcación hidrográfica, a la escala adecuada, que presenten los límites de las cuencas y subcuencas hidrográficas y, cuando existan, las zonas costeras, y que muestren la topografía y los usos del suelo;*

*b) una descripción de las inundaciones ocurridas en el pasado que hayan tenido impactos negativos significativos para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica y que tengan una probabilidad significativa de volver a producirse, con una indicación de la extensión y las vías de evacuación de dichas inundaciones y una evaluación de las repercusiones negativas que hayan provocado;*

*c) una descripción de las inundaciones de importancia ocurridas en el pasado cuando puedan preverse consecuencias adversas de futuros acontecimientos similares y en función de las necesidades específicas de los Estados miembros:*

*d) una evaluación de las consecuencias negativas potenciales de futuras inundaciones para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, teniendo en cuenta, siempre que sea posible, factores como la topografía, la localización de los cursos de agua y sus características hidrológicas y geomorfológicas generales, incluidas las llanuras aluviales como zonas de retención naturales, la eficacia de las infraestructuras artificiales existentes de protección contra las inundaciones, la localización de las zonas pobladas, de las zonas de actividad económica y el panorama de la evolución a largo plazo, incluidas las repercusiones del cambio climático en la incidencia de inundaciones.*

Y finalmente en el capítulo Revisiones, Informes y Disposiciones Finales, artículo 14, apartado 4,

*4. Las posibles repercusiones del cambio climático en la incidencia de inundaciones se tomarán en consideración en las revisiones indicadas en los apartados 1 y 3.*

En el LBAE (MIMAM, 2000a) se abordaron los problemas del tratamiento de las sequías en España destacando el tratamiento heterogéneo y la falta de un inventario histórico de las sequías acaecidas. La Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional incluyó en el capítulo de Normas Complementarias a la Planificación Hidrológica el artículo 27 sobre Gestión de las sequías,

*Artículo 27. Gestión de las sequías.*

*1. El Ministerio de Medio Ambiente, para las cuencas intercomunitarias, con el fin de minimizar los impactos ambientales, económicos y sociales de eventuales situaciones de sequía, establecerá un sistema global de indicadores hidrológicos que permita prever estas situaciones y que sirva de referencia general a los Organismos de cuenca para la declaración formal de situaciones de alerta y eventual sequía, siempre sin perjuicio de lo establecido en los artículos 12.2 y 16.2 de la presente Ley. Dicha declaración implicará la entrada en vigor del Plan especial a que se refiere el apartado siguiente.*

2. *Los Organismos de cuenca elaborarán en los ámbitos de los Planes Hidrológicos de cuenca correspondientes, en el plazo máximo de dos años desde la entrada en vigor de la presente Ley, planes especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía, incluyendo las reglas de explotación de los sistemas y las medidas a aplicar en relación con el uso del dominio público hidráulico. Los citados planes, previo informe del Consejo de Agua de cada cuenca, se remitirán al Ministerio de Medio Ambiente para su aprobación.*

3. *Las Administraciones públicas responsables de sistemas de abastecimiento urbano que atiendan, singular o mancomunadamente, a una población igual o superior a 20.000 habitantes deberán disponer de un Plan de Emergencia ante situaciones de sequía. Dichos Planes, que serán informados por el Organismo de cuenca o Administración hidráulica correspondiente, deberán tener en cuenta las reglas y medidas previstas en los Planes especiales a que se refiere el apartado 2, y deberán encontrarse operativos en el plazo máximo de cuatro años.*

4. *Las medidas previstas en los apartados 1 y 2 del presente artículo podrán ser adoptadas por la Administración hidráulica de la Comunidad*

Se fijaron entonces dos objetivos básicos. Un primer objetivo consistió en la implementación de un Sistema Global de Indicadores Hidrológicos. El segundo, en la redacción de los planes de sequía, con distintas consideraciones en función de las distintas administraciones responsables. En lo que se refiere a las Demarcaciones Hidrográficas, los contenidos de los planes de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía desarrollan aspectos relacionados con la caracterización de sequías, eventos históricos singulares, las demandas y elementos vulnerables, los indicadores de estado, el establecimiento de los diferentes niveles de actuación y las medidas de mitigación. El cambio climático solamente aparece mencionado como elemento a considerar dentro de las actuaciones estratégicas en estado de normalidad, es decir, como consideración de planificación a largo plazo. La definición de trabajos a realizar se indica explícitamente como *estudios con modelos proyectivos que contemplen la incidencia del Cambio Climático en la frecuencia e intensidad de las sequías*.

Las sequías no cuentan con una Directiva Marco específica como es el caso de las inundaciones. Sí se ha realizado una comunicación e informe de seguimiento al Parlamento Europeo y al Consejo (EC, 2007a, EC, 2007b; EC, 2008) sobre los problemas de la escasez de agua y sequía en la Unión Europea. En estos documentos se menciona el cambio climático como un factor que posiblemente empeore los impactos producidos por sequías y escasez de agua. La más reciente guía para la consideración del cambio climático en la gestión de cuencas (EC, 2009) o la anterior guía para la elaboración de planes de sequía (EC, 2007c) señala a los planes de cuenca y a los de sequía como los pilares desde los que articular las estrategias de mitigación de sequías y del posible efecto del cambio climático.

### 3 BASES TÉCNICAS

#### 3.1 Proyecciones de cambio climático

##### 3.1.1 Modelos climáticos y técnicas de proyección regional

Un modelo climático es una representación matemática simplificada del sistema climático de la Tierra. Resuelve, en términos de ecuaciones diferenciales sobre una rejilla tridimensional, la dinámica de la atmósfera considerando ecuaciones del movimiento de los fluidos (Navier-Stokes), la conservación de masa y energía y las interacciones de la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera. La dinámica atmosférica es función de variables como la presión atmosférica, la temperatura, el contenido de vapor de agua y el viento. La consideración del papel del océano en los flujos de energía y cantidad de movimiento con la atmósfera da lugar a los denominados Modelos de Circulación General acoplados Atmósfera–Océano (MCGAO). La familia de modelos se completa con la implementación de otros módulos para simular la actividad de componentes químicos de la atmósfera (CTMs por sus siglas en inglés, Chemical Transport Models, CTMs), las interacciones con la cobertura de hielo (Ice Sheet Models) o los que ocurren en la superficie terrestre como la evapotranspiración.

El conjunto de ecuaciones de estos modelos no tiene una solución explícita, por lo que han de resolverse por métodos numéricos. Los modelos globales se integran en todo el planeta, en escalas espaciales y temporales razonablemente amplias. Actualmente, la resolución de la parte atmosférica de un modelo normal es de 100 a 300 km en línea horizontal y, aproximadamente, el doble para los océanos. En ambos casos, la resolución vertical es de unos 20 niveles. Las ecuaciones se resuelven generalmente en pasos de media hora. Sin embargo, existe un conjunto de procesos asociados a resoluciones menores como los procesos convectivos de formación de nubes, radiación, viento, procesos hidrológicos sobre la superficie terrestre, etc. que se han de implementar en los modelos por medio de parametrizaciones, simplificando su variabilidad real.

Los resultados de los MCGAO no son aplicables directamente a la hidrología terrestre ya que los fenómenos hidrológicos son de una escala mayor. Las técnicas de proyección regional (*downscaling*) proyectan los resultados obtenidos en modelos globales sobre regiones. Pueden clasificarse en dos grandes grupos: dinámicas y estadísticas. Las técnicas dinámicas se basan en el anidamiento de modelos climáticos que trabajan en cada región (modelos climáticos regionales, MCR) tomando las condiciones de contorno de los resultados de los modelos de circulación global. Las técnicas estadísticas analizan las relaciones estadísticas entre series locales y regionales. La consideración de aspectos no lineales, estacionariedad o la correlación espacial entre las estaciones dan lugar a diferentes técnicas. Un último grupo de técnicas se conocen como método de los análogos consistentes en trasladar a los valores locales, los valores alcanzados en situaciones análogas registradas históricamente. Los trabajos en análogos parten de una clasificación de situaciones análogas y usan como predictores los campos obtenidos de MCG.

Las condiciones iniciales tienen en cuenta la memoria de los procesos involucrados, con ajustes de 5 a 50 años para aquellos que ocurren en la atmósfera o en el hielo o, mayores, para los que involucran balances entre la superficie y capas profundas del océano.

Los modelos climáticos y las diferentes técnicas de proyección regional conllevan términos de error. Los términos de error dependen lógicamente de aspectos como la representación matemática de los procesos e interacciones mencionados. Hay varios aspectos mencionados en el informe del IPCC (Bates et al., 2008) sobre los problemas teóricos respecto a la representación en los modelos del forzamiento inducido por los gases de efecto invernadero, la amplificación del forzamiento solar, la influencia de factores antropogénicos como la introducción de aerosoles, el acoplamiento de procesos océano-

atmósfera y las técnicas particulares de cada modelo, así como los errores derivados de la falta de ajuste de escala de procesos determinantes en la atmósfera y que escapan a la escala sinóptica.

Los modelos son evaluados de varias maneras. La principal consiste en comparar los datos climáticos simulados con los observados. Los resultados para el análisis de impacto del cambio climático en España (AEMET, 2008) utilizan el periodo de control 1961-1990. Esa comparación permite evaluar el modelo y realizar los ajustes necesarios. Algunos modelos han corregido desequilibrios en los flujos simulados en superficie mediante los denominados “ajustes de flujo”. Son ajustes sistemáticos determinados empíricamente en la interfaz atmósfera-océano que se mantienen fijos en el tiempo para aproximar el clima simulado al estado observado. Sin esta corrección, aparecían derivas globales en la temperatura de superficie de 1°C por cada 100 años. La mayoría de los modelos usados en el 3er y 4º informe del IPCC ya no usan esta corrección. Entre las variables resultado, la temperatura de superficie es la que menos errores presenta en las simulaciones de los modelos. Variables como la presión atmosférica y la precipitación tienen peor respuesta simulada. Los modelos tampoco reproducen adecuadamente el ciclo estacional.

Los MCGAO son complejos y se requieren potentes ordenadores para su resolución. Con frecuencia se utilizan también modelos más sencillos para investigar en mayor profundidad distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y los efectos de ciertas hipótesis o aproximaciones en los parámetros del modelo. Los distintos modelos dan soluciones diferentes debido a las distintas opciones y estructura, ecuaciones y términos fundamentales de la dinámica océano-atmósfera, de las técnicas de parametrización, de resolución numérica y de proyección regional. Los resultados difieren entre los distintos modelos y el abanico de resultados se ha asumido como incertidumbre asociada al tratamiento de los procesos. Es decir, se usan las soluciones de varios modelos para estimar una respuesta media y una incertidumbre respecto a esa media. La siguiente tabla reproduce esquemáticamente el conjunto de modelos del IPCC (2001a) y TAR que, por otra parte, son la base de las proyecciones utilizadas en este informe. Da una idea de la complejidad de componentes y alcance de los modelos en uso.

MODELO	CENTRO	REFERENCIAS EXTRAÍDAS DEL IPCC (2001A)	RESOLUCIÓN ATMOSFÉRICA	RESOLUCIÓN OCEÁNICA	COMPON. TERRESTRE	HIELO MARINO	AJUSTE FLUJO
ARPEGE/OPA1	CERFACS	GUILYARDI AND MADEC, 1997	(5.6 X 5.6) L30	2.0X2.0 L31*	C	(D)	—
ARPEGEIOPA2	CERFACS	BARTHELET ET AL, 1998A,B	(3.9 X 3.9) L19	2.0X2.0 L31*	C	T	—
BMRCA	BMRC	POWER ET AL, 1993	(3.2 X 5.6) L9	3.2X6 L12	M,B	T	—
BMRCb	BMRC	POWER ET AL, 1998	(3.2 X 5.6) L17	3.2X5.6 L12*	M,B	T	H,W
CCSRJNIES	CCSRINTES	EMORI ET AL, 1999	(5.6 X 5.6) L20	2.8X2.8 L17	M,BB	T	H,W
CGCM1	CCCMA	BOER ET AL, 2000; FLATO ET AL, 2000	(3.8 X 3.8) L10	1.8X1.8 L29	M,BB	T	H,W
CGCM2	CCCMA	FLATO AND BOER, 2001	(3.8 X 3.8) L10	1.8X1.8 L29	M,BB	T,R	H,W
COLA1	COLA	SCLMEIDER ET AL, 1997; SCLMEIDER AND ZHU, 1998	(4.5 X 7.5) L9	1.5X1.5 L20*	C	T	—
COLA2	COLA	DEWITT AND SCHNEIDER, 1999	(4 X 4) L18	3.0X3.0 L20*	C	T	—
CSIRO Mk2	CSIRO	GORDON AND O'FANELL, 1997	(3.2 X 5.6) L9	3.2X5.6 L21	C	T,R	H,W,M
CSM 1.0	NCAR	BOVILLE AND GENT, 1998	(2.8 X 2.8) L18	2.0X2.4 L45*	C	T,R	—
CSM 1.3	NCAR	BOVILLE ET AL 2001	(2.8 X 2.8) L18	2.0X2.4 L45*	C	T,R	—
ECHAM1/LSG	DKRZ	CUBASCH ET AL, 1992; VON STORCH, 1994; VON STORCH ET AL, 1997	(5.6 X 5.6) L19	4.0X4.0 L11	C	T	H,W,M
ECHAM3/LSG	DKRZ	CUBASCH ET AL 1997; VOSS ET AL, 1998	(5.6 X 5.6) L19	4.0X4.0 L11	C	T	H,W,M
ECHAM4/OPYC3	DKRZ	ROECKNER ET AL, 1996	(2.8 X 2.8) L19	2.8X2.8 L11*	C	T,R	H,W(*)
GFDL_R15_A	GFDL	MANABE ET AL, 1991; MANABE AND STOUFFER 1996	(4.5 X 7.5) L9	4.5X3.7 L12	B	T,F	H,W

MODELO	CENTRO	REFERENCIAS EXTRAÍDAS DEL IPCC (2001a)	RESOLUCIÓN ATMOSFÉRICA	RESOLUCIÓN OCÉANICA	COMPON. TERRESTRE	HIELO MARINO	AJUSTE FLUJO
GFDL_R15_B	GFDL	DIXON AND LANZANTE, 1999	(4.5 X 7.5) L9	4.5X3.7 L12	B	T,F	H,W
GFDL_R15_C	GFDL	KNUTSON ET AL, 1999	(2.25 X 3.75) L14	1.875X2.25 L18	B	T,F	H,W
GISS1	GISS	MILLER AND JIANG, 1996	4.0 X 5.0 L9	4.0X5.0 L16	C	T	—
GISS2	GISS	RUSSELL ET AL,1995	4.0 X 5.0 L9	4.0X5.0 L13	C	T	—
GOALS	TAP/LASO	WUET AL, 1997; ZHANG ET AL, 2000	(4.5 X7.5) L9	4.0X5.0L20	C	T	H,W,M
HADCM2	TJKMO	JOHNS 1996; JOHNS ET AL, 1997	2.5 X 3.75 L19	2.5X3.75L20	C	T,F	H,W
HADCM3	TJKMO	GORDON ET AL, 2000	2.5 X 3.75 L19	1.25 X 1.25 L20	C	T,F	—
IPSL-CM1	IPSL/LMD	BRACONNOT ET AL, 2000	5.6 X 3.8 L15	2.0X2.0 L31*	C	(D)	—
IPSL-CM2	IPSL/LMD	LAURENT ET AL,1998;	5.6 X 3.8 L15	2.0X2.0 L31*	C	T	—
MRI1 <sup>A</sup>	MM	TOKIOKA ET AL, 1996	4.0 X 5.0 L15	2X2.5 L21(23)	M,B	T,F	H,W
MRI2	MM	YUKIMOTO ET AL, 2000	(2.8 X 2.8) L30	2.0X2.5 L23*	C	T,F	H,W,M
NCAR1	NCAR	MEEHL AND WASHINGTON, 1995; WASHINGTON AND MEEHL, 1996	(4.5 X 7.5) L9	1.0X1.0 L20	B	T,R	—
NRL	NRL	HOGAN AND LI, 1997; LI AND HOGAN, 1999	(2.5 X 2.5) L18	1.0 X 2.0 L25*	BB	T(P)	H,W(*)
DOE PCM	NCAR	WASHINGTON ET AL, 2000	(2.8 X 2.8) L18	0.67 X 0.67 L32	C	T,R	—
CCSR/NIES2	CCSR/NITES	NOZAWA ET AL,2000	(5.6 X 5.6) L20	2.8 X 3.8L17	M,BB	T	H,W
BERN2D	PIUB	STOCKER ET AL, 1992; SCHMITTNER & STOCKER, 1999	10 XZA L1	10* XZAL15	—	T	—
UVIC	UVIC	FANNING AND WEAVER, 1996; WEAVER ET AL, 1998	1.8 X 3.6 L1	1.8 X 3.6 L19	—	T,R	—
CLIMBER	PIK	PETOUKHOV ET AL,2000	10 X51 L2	10 XZA L11	C	T,F	—

Tabla 3. MCGAO utilizados en el proceso de evaluación en el TAR. Extraído del IPCC (2001a)<sup>1</sup>

Los resultados de los MCGAO dan desviaciones medias que varían enormemente de una región a otra y de un modelo a otro. Las desviaciones de los valores medios de la temperatura estacional a nivel subcontinental son normalmente de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ , y las desviaciones de las precipitación oscilan entre -40% y +80%. La evolución de los MCGA de alta resolución y de resolución variable indicaría una mejora en los resultados a medida que aumenta la resolución. Sin embargo, en algunos casos, los errores sistemáticos son más graves que en los modelos de resolución más baja, aunque se han documentado solamente unos pocos resultados.

Los MCR de alta resolución han mejorado considerablemente en los últimos años. En todos los modelos regionales mejora el grado de detalle del clima simulado en comparación con los MCGAO. Los MCR que se basan en las condiciones de contorno observadas muestran desviaciones de las temperaturas cuyo promedio por zona (celdas de unos  $100\text{ km}^2$ ) es, en general, menor de  $2^{\circ}\text{C}$ , mientras que la desviación de la precipitación es inferior al 50%.

Debido a la influencia que los errores pueden tener en los resultados, los análisis de impacto que tienen perturbaciones inducidas en la atmósfera, como por ejemplo el posible aumento de  $\text{CO}_2$ , se realizan en términos de series de anomalías estimadas como diferencias respecto a una situación de referencia. El análisis por diferencias permite hipotéticamente

<sup>1</sup> Resolución atmosférica y oceánica: Lmm, mm es el número de niveles verticales; \*, modelo con resolución horizontal mejorada en el Ecuador; ZA, modelo promediado zonalmente (resolución  $360^{\circ}$ ).

Componente Terrestre: B, balance hídrico; BB, balance hídrico con variabilidad en capacidad de almacenamiento en el suelo; M, esquema multicapas en análisis de temperatura; C, esquema de simulación del suelo complejo incluyendo análisis multicapa de temperatura y procesos en cubierta vegetal.

Modelo Hielo Marino: T, esquema termodinámico; F, deriva libre; R reología del hielo; (d) estimación de la extensión y grosor función de la temperatura de la superficie marina; (p), extensión hielo prefijada.

Ajuste de flujo: H, flujo de calor; W, flujo masa; M, flujo cantidad de movimiento; \*, la corrección de flujo es anual.

filtrar errores sistemáticos comunes a la pasada de referencia y la correspondiente a la perturbación inducida. Sin embargo, la proporcionalidad entre los errores y la magnitud de los errores demuestra que importantes errores que siguen influyendo en los resultados.

### 3.1.2 Escenarios de emisiones

El Informe sobre escenarios de emisiones del IPCC (Nakicenovic et al, 2000) considera 40 escenarios, agrupados en 4 familias y 6 grupos (la familia A1 contiene 3 grupos). Estos escenarios se clasificaron en función de 4 criterios de hipótesis de evolución global: crecimiento demográfico, desarrollo social, desarrollo económico y cambio tecnológico. En el TAR, el IPCC eligió 6 escenarios de referencia, uno por cada grupo: A1FI, A1T, A1B, A2, B1 y B2 (figura 2). Los supuestos de emisión de gases de efecto invernadero son los siguientes (Nakicenovic et al, 2000):

*A1. La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B) (entendiéndose por “equilibrada” la situación en la que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares).*

*A2. La línea evolutiva y familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.*

*B1. La línea evolutiva y familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo XXI y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.*

*B2. La línea evolutiva y familia de escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.*

Cada uno de los 6 grupos de referencia, A1B, A1FI, A1T, A2, B1 y B2, implica diferentes contextos globales y por lo tanto diferentes supuestos de valores de emisiones de GEI desde 1990 hasta el 2100. En la siguiente figura se muestran las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> provenientes de todas las fuentes (energía, industria y cambio en el uso de las tierras) entre 1990 y 2100 para los seis grupos de escenarios de emisiones, A1B, B1, A2 y B2 en trazo continuo y A1F1 y A1T en trazo discontinuo.

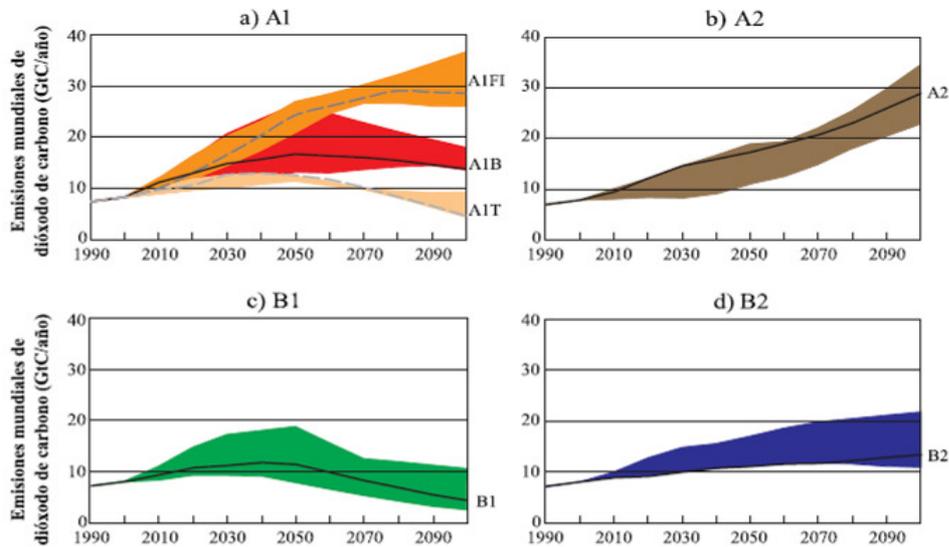


Figura 2. Emisiones anuales totales de CO<sub>2</sub> (Nakicenovic et al, 2000)

Cualquiera de los 6 escenarios debe considerarse igualmente adecuado. No obstante, los resultados de la modelización con MCGAO que figuran en el TAR utilizan únicamente los escenarios A2 y B2 en más de un MCGAO.

En el cuarto informe del IPCC se siguen analizando los 6 grupos de emisiones, si bien también se contemplan otros escenarios posteriores al informe de base del IPCC del año 2000 (IEEE). En figura siguiente se muestran las emisiones mundiales de GEI en ausencia de políticas climáticas adicionales, con seis ejemplos de escenarios testimoniales del IEEE (líneas de color), y percentil 80 de escenarios recientes publicados desde el IEEE (post-IEEE) (área sombreada en gris). Las líneas de trazos indican el abanico completo de escenarios post-IEEE. Las emisiones consideran los gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O y gases-F.

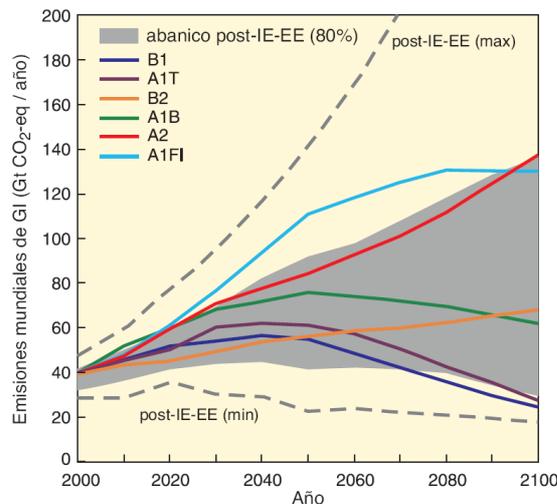


Figura 3. Emisión mundial de GEI en ausencia de políticas climáticas adicionales (IPCC, 2007)

### 3.1.3 Proyecciones climáticas consideradas en este trabajo

La evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en España utiliza como datos de partida las proyecciones climáticas regionales proporcionadas por la AEMET (2008) y la OECC. Éstas fueron generadas a partir de los resultados de los modelos climáticos del TAR.

Debido al gran número de proyecciones disponibles y a las fuertes exigencias de computación necesarias para analizar los datos, en los estudios de impacto se planteó la necesidad de seleccionar un número reducido de proyecciones que representaran suficientemente la incertidumbre del conjunto de proyecciones. Otros criterios manejados por la AEMET (2008) fueron utilizar el mayor número posible de modelos globales y de escenarios SRES y regionalizaciones estadísticas basadas en estaciones y no en rejillas, por su mayor resolución espacial. De las 33 proyecciones climáticas de la AEMET disponibles para Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, se seleccionaron 12 que combinan los resultados de 2 supuestos de emisión de gases de efecto invernadero, 4 modelos climáticos globales y 4 técnicas de proyección regional (tabla siguiente). Las series generadas son diarias, tanto en formato de rejilla como las proyectadas en los observatorios.

Nº Proyección climática	Acrónimo	Escenario de emisiones	Modelo climático global	Regionalización	Periodo 1961-1990	Periodo 2011-2040	Periodo 2041-2070	Periodo 2071-2100	Serie de precipitación	Serie de temperaturas	Extensión espacial	Resultado proyección regional
1	CA	A2	CGCM2	Análogos FIC	√	√	√	√	5579	1854	Península, Baleares y Canarias	Estaciones meteorológicas
2	CB	B2	ECHAM 4									
3	EA	A2										
4	EB	B2										
5	HA	A2			HadAM3	√						
6	HB	B2										
7	SA	A2	HadCM3	SDSM	√	√	√	√	2320	369		
8	SB	B2										
9	PA	A2	ECHAM 4	RCM-RCAO-SMHI y proyecto PRUDENCE	√			√	Total 988 celdas; (38x26)		34,25° N a 47,25° N y 12,25° W a 6,75° E. Sin Islas Canarias	Rejilla de resolución 0,5°
10	PB	B2										
11	UA	A2	HadCM3	RCM-PROMES-UCM y proyecto PRUDENCE								
12	UB	B2										

Tabla 4. Proyecciones objeto de simulación hidrológica

Las variables climáticas utilizadas para la evaluación de recursos hídricos procedentes de los modelos y proyecciones anteriores son la precipitación, PRE, y las temperaturas máxima y mínima, TMX y TMN respectivamente. Estas proyecciones incluyen dos escenarios climáticos de emisión: A2 y B2 que representan las tendencias socioeconómicas futuras. El escenario A2 presupone un futuro más pesimista y consecuentemente debería implicar un mayor impacto en el ciclo hidrológico.

De los 4 modelos climáticos globales, 3 de ellos son modelos acoplados atmósfera-océano y el otro es un modelo exclusivamente atmosférico. Proviene de tres familias de modelos creadas en el European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECHAM), en el Canadian Global Coupled Model (CGCM) y en el Hadley Center de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (Had):

- El modelo ECHAM4 es la cuarta generación de los modelos desarrollados en el Instituto Max Planck en Hamburgo (Alemania) para la previsión climática a medio plazo. Las siglas provienen de EC (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) y HAM, ciudad sede del Instituto. Existen dos versiones en función del número de niveles en vertical que se diferencian, 19 ó 42, desde la superficie del suelo hasta los 10hPa. Entre los procesos parametrizados se incluyen los relativos a la radiación, cúmulos convectivos, nubes estratiformes, ondas gravitacionales (gravity wave drag), difusividad vertical y horizontal y flujos desde superficie. Constituyentes de la radiación se implementan gases de efecto invernadero como el metano, óxidos nitrosos y otros CFC, ozono y varios tipos de aerosoles. Entre otras consideraciones sobre física de la atmósfera, el modelo incluye el tratamiento de los flujos de calor y HMS. Se parametriza la actividad de plantas y de la evapotranspiración, de la interceptación y de la generación de ESC mediante un modelo de balance de HMS. El modelo ECHAM4 se combina con el modelo de circulación oceánica OPYC3, constituyendo el modelo acoplado atmósfera-océano ECHAM4/OPYC3.
- Las siglas del modelo CGCM corresponden a Canadian Global Coupled Model. El trabajo del modelo se organiza en dos fases. En una primera se pasan las correspondientes al océano y atmósfera por separado, para posteriormente pasar a una segunda fase de ajuste con un extenso periodo. Se obtienen respuestas programadas en 4 esquemas correspondientes al forzado con incrementos anuales de CO<sub>2</sub> del 1% hasta el 2100, gases de efecto invernadero y efecto del ciclo de azufre en la atmósfera.
- Los modelos Had son desarrollados en el Hadley Center de la Oficina Meteorológica del Reino Unido. El HadCM3 es un modelo de circulación global atmósfera-océano que ya no usa de la corrección de flujo a diferencia del HadCM2. La estructura de la rejilla es más fina en la componente oceánica, que está representada por el modelo HadOM3. Hay intercambio de información diaria entre ambos componentes. El modelo HadAM3 trabaja en la atmósfera con 19 niveles en vertical y una resolución de 2,5° latitud y 3,75° longitud. Respecto al HadCM2, este nuevo modelo incorpora mejoras en el tratamiento de la radiación y la parametrización de la superficie terrestre; en la PRE y mecanismos de formación de nubes; y en la incorporación de un módulo para el ciclo de los sulfatos. El modelo oceánico, HadOM3 tiene 20 niveles en vertical y resolución de la rejilla de 1,25°.

Las series disponibles para el estudio del impacto climático en los recursos proceden de los resultados de los MCG anteriores una vez proyectados con técnicas de regionalización dinámicas en rejillas de mayor escala o estadísticas a los observatorios meteorológicos.

Las regionalizaciones estadísticas utilizan los métodos basados en análogos e índices de circulación. Las proyecciones por análogos FIC (Fundación para la Investigación del Clima)

se basan en estimar las variables climatológicas en función de situaciones meteorológicas similares ocurridas en el pasado (AEMET, 2007; Sordo, 2006). Por otro lado, las proyecciones SDSM (Statistical DownScaling Method) utilizan métodos de regresión. Tanto las FIC como las SDSM dan estimaciones diarias de PRE, TMN y TMX en estaciones meteorológicas de AEMET.

El tratamiento de la información de las proyecciones en estaciones comienza con su carga en la base de datos HIDRO del CEDEX (Quintas, 1996) para su identificación y georreferenciación y asignaron coordenadas UTM en huso 30. Un número reducido de serie fue desestimada al no ser reconocidas por la base HIDRO como estaciones históricas de la red AEMET. Los datos de las series son diarios que se transforman en mensuales por suma en el caso de las precipitaciones (PRE), por selección de la máxima diaria en las lluvias máximas (PMX) y por selección de máxima y mínima en el caso de las temperaturas (TMX y TMN). En total se procesaron 96.948 archivos de entrada, correspondientes a series de 5.579 (proyecciones FIC) y 2.320 (proyección SDSM) estaciones de PRE y 1.854 (FIC) y 369 (SDSM) de TMX y TMN. Cada archivo del conjunto distribuido por AEMET contiene de cada estación, variable climática y proyección, la serie de 30 años de datos diarios del periodo de control y los del siglo XXI. Hay un único fichero del periodo de control para los escenarios climáticos A2 y B2 en las proyecciones HadAM3-FIC. Los resultados finales se organizaron en ficheros formato LEMA (Quintas, 1996).

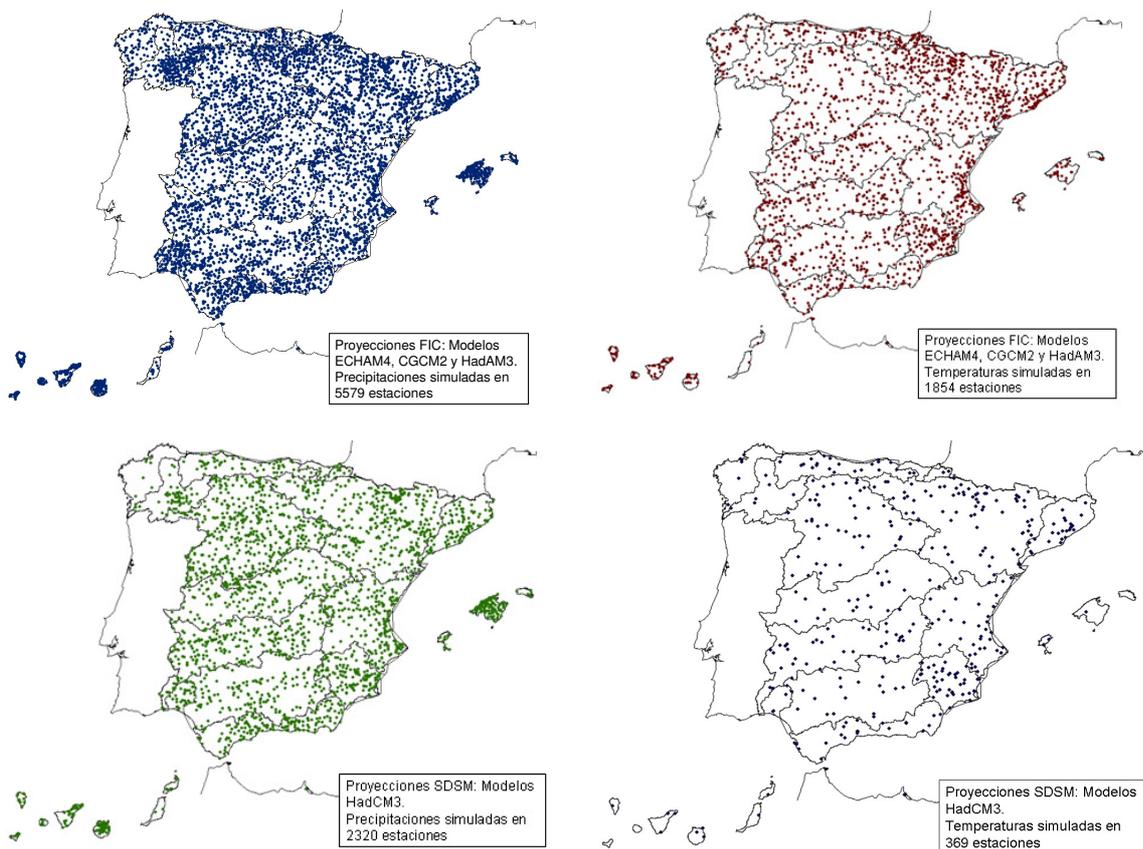


Figura 4. Estaciones meteorológicas con proyecciones de PRE y temperatura. FIC y SDSM

Las proyecciones presentan singularidades. Las proyecciones CGCM2-FIC dan estimaciones los 365 días del año, si bien no consideran los años bisiestos. ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM consideran que todos los meses son de 30 días. La proyección HadCM3-SDSM solamente llega hasta el año 2099.

Además, las estimaciones de cada proyección durante el periodo de control difieren ligeramente entre los escenarios de emisiones A2 y B2, en contra de lo que cabría esperar. Así, CGCM2-FIC dan estimaciones diferentes en A2 y B2 para diciembre 1990, ECHAM4-FIC, desde diciembre 1980 a diciembre 1990 y HadCM3-SDSM también son ligeramente diferentes para A2 y B2. Además, se han encontrado lagunas en los datos originales en HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM, faltando datos en algunas estaciones. También se han encontrado umbrales en las estimaciones de PRE; por ejemplo, en la estación 04043 de CGCM2-FIC se encuentra un umbral de PMX de 100 mm.

Proyección Climática	Serie de PRE	Serie de temperatura	Nº días/mes	Lagunas	Diferencias A2 – B2 en periodo de control	Limitaciones
CGCM2-FIC	5579 (5584 en origen)	1854 (1965 en origen)	Meses con días correctos. No bisiestos		Diciembre 1990	Umbrales en precipitación
ECHAM4-FIC			Todos los meses de 30 días		Desde diciembre 1989 a diciembre 1990	
HadAM3-FIC				SÍ		
HadCM3-SDSM	2320 (2324 en origen)	369 (370 tmin y 373 tmax en origen)		SÍ	Los ficheros de partida son ligeramente diferentes para A2 y B2	Las proyecciones acaban en el año 2099
ECHAM4-RCAO	988 celdas	988 celdas				
HadCM3-PROMES						

Figura 5. Características de las series climáticas estudiadas.

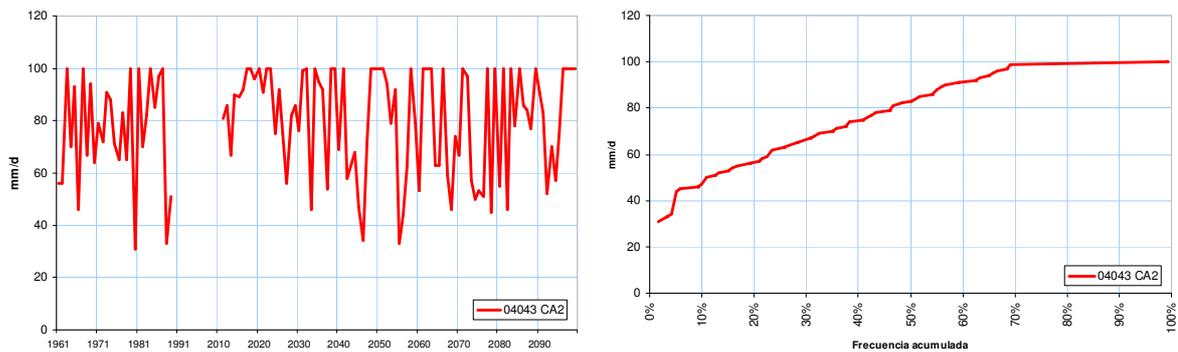


Figura 6. Serie de PMX en estación 04043 y CGCM2-FIC-A2

Las proyecciones o regionalizaciones dinámicas se han obtenido a partir de los trabajos de varios centros para el Proyecto PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects). De las numerosas proyecciones del proyecto PRUDENCE, se han implementado dos versiones: la correspondiente a la participación española en el proyecto a través de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), la cual ha utilizado los datos del modelo global Hadley y el modelo de regionalización PROMES, y la versión del Instituto Meteorológico e Hidrológico

de Suecia (SMHI), que ha utilizado el modelo global ECHAM4 y el modelo de regionalización RCAO. El periodo de cálculo comprende únicamente el periodo de control del s. XX y desde 2071 hasta 2100.

Del conjunto de variables climáticas que calcula PRUDENCE, se han utilizado para este trabajo las variables PRE, TMX y TMN. Los archivos recibidos de PRUDENCE contienen datos diarios de PRE (mm/día) y de TMX y TMN (en °K) en celdas de 0,5° de longitud por 0,5° de latitud (celdas de unos 50 km de lado en las latitudes de España), en una rejilla con límites 34,25° N a 47,25° N y 12,25° W a 6,75° E. De ese modo, la rejilla tiene 38 celdas en longitud por 26 celdas en latitud (988 celdas en total). Esa rejilla está centrada en la Península Ibérica, pero deja fuera el archipiélago canario (figura siguiente). Los datos PRUDENCE contienen datos diarios en años de 12 meses de 30 días, es decir, en años de 360 días.

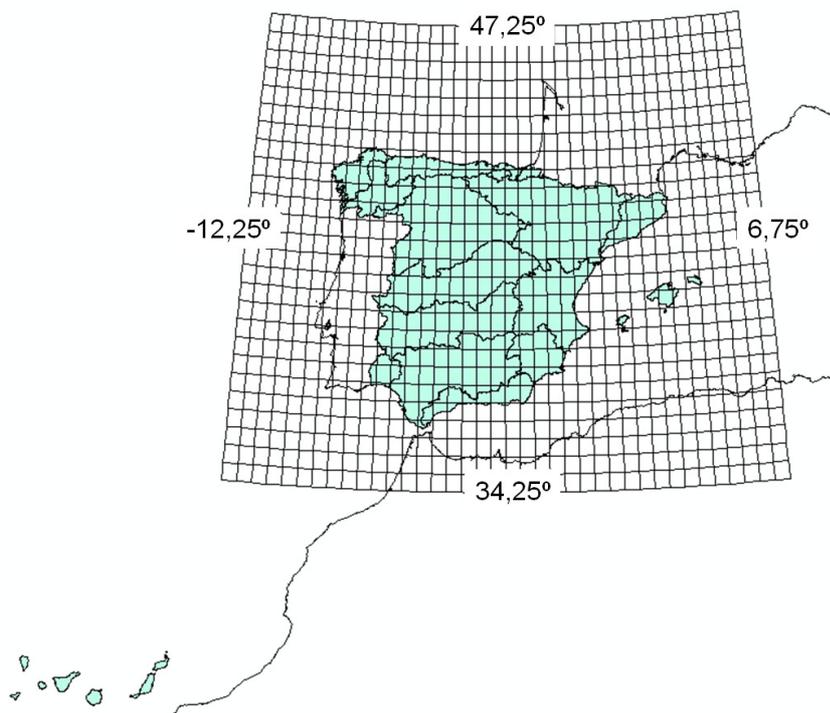


Figura 7. Ámbito geográfico de las proyecciones PRUDENCE en España

### 3.2 Estimaciones en España del impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico

El IPCC publica desde el año 1990 informes de estado en los que se recoge información sobre impactos previsibles del cambio climático. En estas fechas el Instituto Nacional de Meteorología (INM, 1995) publica resultados del modelo climático global HadCM2 de 1990 que permiten la realización de trabajos como los publicados por Ayala-Carcedo en 1995, 1996 y 2000. En Ayala-Carcedo e Iglesias (1996) se estudia el impacto del cambio climático en los recursos hídricos para el horizonte 2060 aplicando un balance de paso anual en cada una de las principales cuencas hidrográficas españolas. Los resultados del estudio daban para el año 2060 en España un incremento de TEM anual de 2,5°C, un descenso de PRE de 8% y una reducción de recursos hídricos de un 20%, siendo esta reducción más importante en el sur de España, llegando a un 36% en la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir.

En el Libro Blanco del Agua en España, LBAE (MIMAM, 2000a), se analizaron los impactos de tres escenarios climáticos en el horizonte del año 2030, para el que se suponía que se habría duplicado el CO<sub>2</sub> atmosférico. El escenario 1 implicaría un aumento de 1°C en la TEM anual, mientras que en el escenario 2 habría una disminución de un 5% en la PRE anual y

un aumento de 1°C en la TEM anual. Un tercer escenario con resultados desestimados por ser poco verosímiles consideraba una reducción del 15% de la PRE y un aumento de 4°C. El análisis se realizó utilizando la ley de Budyko (Budyko, 1974) que relaciona la ESC con la PRE y la ETP. Se ha vuelto a retomar en el presente trabajo bajo la denominación de Schreiber-Budyko (Donohue et al. 2007; Arora, 2002). Entonces se concluyó que el cambio climático produciría, en el escenario menos pesimista, una disminución del 5% en las aportaciones totales en régimen natural en España, siendo el impacto más severo en el sureste peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular (siguientes figuras y tabla). Esta disminución vendría acompañada de una mayor variabilidad anual y estacional que se expresaría por un aumento en el rango de los caudales, cuya cuantía no se establecía.

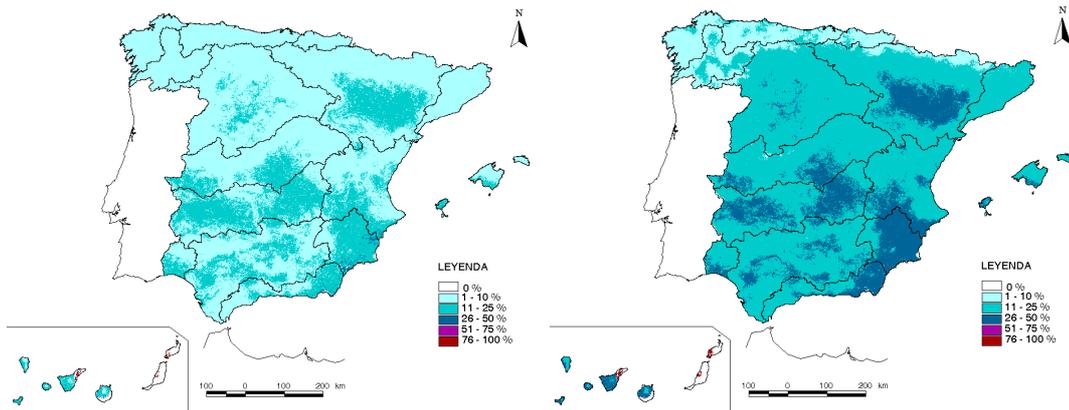


Figura 8. Δ ESC anual (%) para 2030. Mapas LBAE escenarios 1 (izda) y 2 (dcha)

Ámbito	Escenario 1	Escenario 2	Ámbito	Escenario 1	Escenario 2
Norte I	-3	-10	Sur	-7	-18
Norte II	-2	-10	Segura	-11	-22
Norte III	-2	-9	Júcar	-9	-20
Duero	-6	-16	Ebro	-5	-15
Tajo	-7	-17	C.I. de Cataluña	-5	-15
Guadiana I	-11	-24	Galicia Costa	-2	-9
Guadiana II	-8	-19	Baleares	-7	-18
Guadalquivir	-8	-20	Canarias	-10	-25
<b>España</b>	<b>-5</b>	<b>-14</b>			

Tabla 5. Δ ESC anual (%) para 2030. Tabla. Escenarios LBAE (MIMAM, 2000a y b)

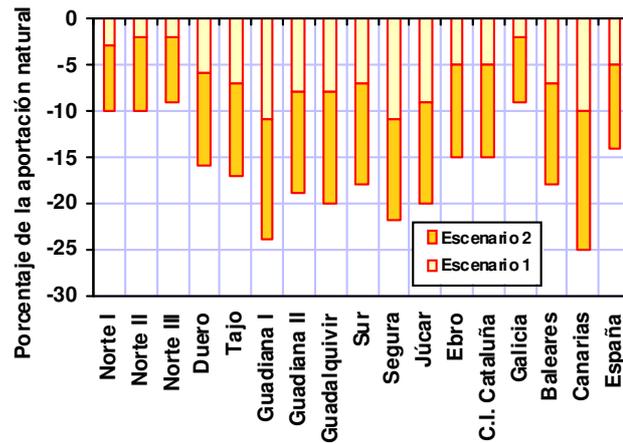


Figura 9. Δ ESC anual (%) para 2030. Escenarios (MIMAM, 2000a y b)

Fernández Carrasco (2002) utilizó el modelo climático regional PROMES y el modelo hidrológico SIMPA (Ruiz García, 1999) para estudiar el impacto en los recursos hídricos que tendría una duplicación del CO<sub>2</sub> en el horizonte 2050 en 19 pequeñas cuencas de la Península Ibérica. En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos. En 12 cuencas aumenta la PRE entre el 1% y 13% y en otras 6 disminuye del 4% al 22%, aunque la invernal ascienda y baje más pronunciadamente la estival y otoñal. Los aumentos de TEM anual se cifran entre 2°C y 3°C. La ETP anual aumenta de manera generalizada entre el 14% y el 22%. La ETR anual aumenta en 6 cuencas entre el 3% y 12% y disminuye en otras 7 cuencas entre el 5% y 21%. Finalmente, la ESC estimada mediante un modelo de balance mensual implementado en SIMPA aumenta en términos anuales en 11 cuencas entre el 9 y el 74%; disminuye en otras 4 cuencas entre el 11% y 41%. En el resto de cuencas los resultados se mantienen similares a los del periodo de control.

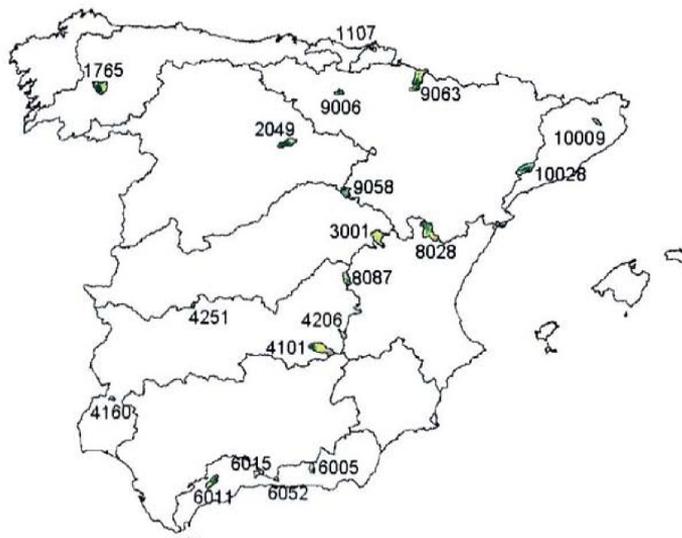


Figura 10. Localización de las 19 cuencas estudiadas (Fernández Carrasco, 2002)

Estos valores diferían notablemente de los valores de ESC anual obtenidos mediante el modelo Schreiber-Budyko. Con este modelo, las ESC anuales disminuían en 18 cuencas entre un 5% y un 52%; solamente una cuenca presentaba incrementos del 12%. Estos datos obtenidos por el método Schreiber-Budyko coinciden mejor con los datos reflejados en el LBAE (MIMAM, 2000a), también obtenidos por Schreiber-Budyko. Estas diferencias en resultados anuales cabe suponer asociadas a que el último modelo no considera la

distribución intranual de PRE y ETP (Donohue et al, 2007; Milly, 1994). En la tabla siguiente se muestran los resultados agregados de las 19 cuencas con sombreado naranja cuando los modelos de SIMPA y Budyko producen disminuciones de ESC; amarillos, cuando hay incremento de aportaciones según SIMPA y disminución según Budyko; y verde cuando ambos pronostican aumentos de aportaciones. Los términos de ESC de las tres últimas columnas se han estimado mediante la formulación de Schreiber-Budyko.

Cuenca	PRE (mm)	PRE (mm)	ETP (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	ETR (mm)	ESC (mm)	ESC (mm)	%Δ PRE	%Δ ETP	%Δ ETR	%Δ ESC SIMPA	Schreiber-Budyko ESC (mm)	Schreiber-Budyko <sup>(1)</sup> ESC (mm)	%Δ ESC Schreiber-Budyko
1107	2147	1880	731	836	730	821	1413	1057	-12	14	12	-25	1527	1205	-21
1765	1189	1344	732	842	578	582	612	762	13	15	1	25	642	718	12
2049	568	543	736	869	453	422	116	122	-4	18	-7	5	155	110	-30
3001	850	770	722	870	547	499	301	269	-9	20	-9	-11	364	249	-32
4101	475	490	921	1122	393	408	82	81	3	22	4	-1	68	50	-27
4206	450	457	919	1117	408	411	43	47	2	22	1	9	58	40	-32
4251	977	1026	1032	1245	575	570	402	456	5	21	-1	13	340	305	-10
4160	845	913	995	1198	570	575	276	338	8	20	1	22	260	246	-6
6011	703	714	975	1172	474	471	230	242	2	20	-1	5	176	138	-21
6015	789	810	985	1191	517	524	271	284	3	21	1	5	226	186	-18
6052	662	703	1043	1268	460	468	200	232	6	22	2	16	137	116	-15
6005	472	508	881	1046	413	427	58	81	8	19	3	40	73	65	-11
8028	475	411	691	838	435	342	40	69	-13	21	-21	74	111	53	-52
8087	536	581	762	918	422	424	112	155	8	20	0	38	129	120	-7
9006	816	636	712	818	550	479	265	156	-22	15	-13	-41	341	176	-48
9058	505	504	748	898	423	393	77	105	0	20	-7	37	115	85	-26
9063	1156	961	717	822	619	594	535	365	-17	15	-4	-32	622	409	-34
10009	966	1031	813	986	701	663	265	368	7	21	-5	39	416	396	-5
10028	529	568	806	956	470	487	58	80	7	19	4	38	115	106	-8

Tabla 6. Resultados en 19 pequeñas cuencas españolas (Fernández Carrasco, 2002)

Cabezas (2004) estudia el impacto sobre la ESC en España para la década 2050-2060. Utiliza el escenario de emisiones de GEI A2, siete modelos AOGCM del TAR (CGCM1, CSIRO-Mk2b, ECHAM4, HadCM2 y WWF1999) y seis modelos hidrológicos (Thornthwaite-Mather, Palmer, abcd, Témez, GR4 y V2m). Se concluye que la ESC anual disminuiría en un 9% para el conjunto de España tomando la media de todas las simulaciones de los modelos para el escenario A2. Se indica además que la reducción para el escenario A1 sería del 6%. Finalmente, se recomienda utilizar la reducción del 6% como criterio de diseño, debido a que el escenario A1 sería más razonable.

La Agencia Europea de Medio Ambiente (Lehner et al, 2005) evaluó el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en Europa mediante la desviación porcentual de las ESC

en el horizonte 2070 respecto a las del año 2000. Los escenarios de emisiones A2 pronosticaban una reducción destacable de ESC en el sur de Europa. En la Península Ibérica los resultados varían en función del MCGAO utilizado. El modelo ECHAM4 muestra una fuerte polaridad E-O, pasando de reducciones del 50% en el oeste a incrementos en las cuencas del Júcar y en las islas Baleares; el modelo HadCM3 muestra una polaridad E-O inversa, con valores de reducción del 50% en el área mediterránea de España y menores reducciones hacia el noroeste.

La OECC promovió la recopilación de información sobre efectos del cambio climático en España. El informe final (MIMAM, 2005) refleja una serie de consideraciones sobre el clima e hidrología del siglo XXI. En orden inverso de fiabilidad se citan:

- tendencia progresiva al incremento de las TEM a lo largo del siglo
- tendencia a un calentamiento más acusado en el escenario con emisiones más altas
- aumentos de TEM significativamente mayores en los meses de verano que en los de invierno
- mayor calentamiento en verano en las zonas del interior que en las costeras
- tendencia generalizada a una menor PRE acumulada anual
- mayor amplitud y frecuencia de anomalías térmicas mensuales
- mayor frecuencia de días con temperaturas máximas extremas en la Península (especialmente en verano)
- mayor reducción de PRE en primavera durante el último tercio del siglo
- aumento de PRE en el oeste de la Península en invierno y en el noreste en otoño
- mayores cambios de PRE en el escenario de emisiones más elevadas.

Con relación a los recursos hídricos, el informe presenta las siguientes consideraciones en parte ya recogidas en el LBAE (MIMAM, 2000a):

- El cambio climático causará una disminución de aportaciones hídricas.
- La sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de la temperatura y disminución de PRE es muy alta, precisamente en las zonas con TEM altas y con PRE bajas. Las zonas más críticas son las semiáridas, en las que las aportaciones pueden reducirse hasta un 50% sobre el potencial actual.
- Los recursos hídricos sufrirán en España disminuciones importantes como consecuencia del cambio climático. Para el periodo de 2030, simulaciones con aumentos de TEM de 1°C y disminuciones medias de PRE de un 5% ocasionarían disminuciones medias de aportaciones hídricas en régimen natural de entre un 5 y un 14%.
- Para 2060, simulaciones con aumentos de TEM de 2,5°C y disminuciones de PRE de un 8% producirían una reducción global media de los recursos hídricos de un 17%. Estas cifras pueden superar el 20% a 22% para los escenarios previstos para final de siglo.
- Junto la disminución de los recursos se prevé un aumento de la variabilidad interanual de los mismos. El impacto se manifestará más severamente en las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares.

Garrote et al (2007) analizaron los datos diarios de ESC aportados por el proyecto PRUDENCE para la España peninsular. La comparación entre los valores mensuales obtenidos para el periodo de control llevan a concluir que la capacidad de la mayor parte de los modelos regionales para reproducir el valor medio de la ESC en España es bastante pobre: 11 de las 12 series simuladas dan ESC inferiores a las del LBAE (MIMAM, 2000a), y sólo 3 de éstas simulan con una diferencia inferior al 10%. Ello les lleva a indicar que los resultados en cuanto a proyecciones climáticas deben interpretarse con prudencia y a sugerir la conveniencia de realizar estudios específicos mediante herramientas de simulación que permitan capturar la complejidad del comportamiento hidrológico de las cuencas españolas. El análisis de la comparación entre las ESC mensuales del periodo 2071-2100 con relación al periodo de control para 15 escenarios climáticos dan los siguientes resultados:

- Las 11 proyecciones climáticas para el escenario de emisiones A2 simulan una reducción de ESC. La media da una reducción de ESC del 35% para las series A2, siendo el impacto mayor en la mitad meridional peninsular, con descensos simulados superiores al 50% en algunas zonas
- Dos de las proyecciones climáticas para el escenario de emisiones B2 simulan una reducción de ESC, mientras que los otros dos dan un aumento. La media de los cuatro da un aumento de ESC del 15% para las series B2

La Agencia Catalana del Agua ha estudiado el impacto del cambio climático en cuatro cuencas de Cataluña (ACA, 2008). El modelo hidrológico utilizado es el Sacramento, que da resultados diarios de las variables del ciclo hidrológico. En la cuenca del río Cardener, se produciría una disminución de recursos hídricos del 3% al 11% durante la primera mitad del siglo XXI según el escenario de emisiones. Finalmente, en el escenario extremo, estimado para la segunda mitad del siglo XXI, en el que aumenta la TEM 4 °C y disminuye la PRE un 15% respecto a la situación inicial, se produciría un aumento de la evapotranspiración del 22% y una disminución de recursos del 34%. La segunda cuenca (desde la cabecera del río Tordera hasta La Llavina) se analizó mediante el modelo GOTILWA+ a partir de las series directamente suministradas por el modelo climático global del Centro Hadley en lugar de la generación de series sintéticas. Las características de la cuenca de estudio, con bastante bosque y una pluviometría elevada, determinarían una hidrología bastante regular incluso con condiciones de cambio climático, de forma que la reducción media de aportaciones (8% a 15%) no es tan acusada como se podría esperar en otros ámbitos hidrológicamente más irregulares. En las otras dos cuencas, se utilizan 6 proyecciones con datos en rejilla para el periodo 2071-2100 aportadas por la AEMET (Análogos INM y PRUDENCE). Los datos medios para esas cuencas para 2071-2100 indican un descenso de la PRE del 5 al 21%, un aumento de la TEM de 2,3 a 4,1 °C, un aumento de la ETP del 17 al 30% y una variación de la ESC del +3 hasta un -52%, siendo muy acusada la disminución en los meses de verano.

El proyecto de investigación europeo PRUDENCE ha aportado una serie de proyecciones climáticas regionalizadas para Europa para el periodo 2071-2100. En el caso de España, el conjunto de proyecciones dan un incremento medio de TEM anual de 1,3°C, siendo máximo en los meses de verano (1,8°C). Estima un descenso medio de PRE anual del 5,7% en el norte de España y del 9,1% en el sur. Los descensos máximos de PRE se estiman para los meses de verano (entre el 13,9% y el 14,9%), mientras que en invierno la variación oscila desde un aumento del 1,9% en el norte a un descenso del 3,7% en el sur de España.

Los resultados del proyecto PRUDENCE también sirvieron para la estimación del impacto del cambio climático en cuencas de Navarra: Bidasoa en Enderlaza, Arga en Funes y Queiles en Tudela. En este trabajo se concluía la disminución de aportaciones anuales como consecuencia de un aumento de TEM y, consecuentemente de ETP, y de la disminución de la PRE. Estacionalmente se encontraba que en los meses invernales, las

dos cuencas con PRE superior a los 1000 mm/año, Bidasoa y Arga, aumentaban la PRE y ESC. En el río Queiles, las proyecciones de PRE y ESC disminuían en todas las estaciones climáticas.

En la cuenca del Ebro la Oficina de Planificación Hidrológica (CHE, 2005) ha desarrollado trabajos de evaluación de impacto utilizando una versión del modelo BALAN implementada sobre un SIG. Los resultados se ofrecen en un conjunto de cuencas de margen izda. y dcha. con conclusiones similares respecto a la disminución esperada de recursos y al menor impacto en los meses invernales. Este estudio trabaja con un único modelo de circulación global, CGCM3 durante los tres periodos del siglo XXI, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100.

El proyecto SWURVE (Sustainable Water: Uncertainty, Risk and Vulnerability in Europe) utilizó como cuencas experimentales para el análisis del impacto del cambio climático en los recursos hídricos las internacionales del Tajo y Guadiana entre otras europeas. Kilsby et al (2007) estimaron con un modelo hidrológico distribuido de paso mensual impactos equivalentes a una disminución de la ESC media anual en el periodo 2070-2100 respecto al de control 1961-1990 entre un 49% y 23% en el Tajo y entre 26% y 24% en el Guadiana. Refieren además otros estudios en los que se estimaron incrementos de ESC en invierno. La primera cifra de cada estimación procede de la implementación de los resultados de PRE de un modelo regional, HadRM3H del Hadley Center, con corrección de medias; la segunda de un generador de clima (Hong Xu et al, 2007) que trabaja sobre los resultados en campo de presiones de los modelos de circulación global, HadCM3.

### **3.3 Metodología de evaluación de impacto**

#### **3.3.1 Recursos hídricos**

El objetivo del análisis de impacto del cambio climático en los recursos hídricos es conocer en términos porcentuales cuánto variaría la ESC y cualquier otra variable hidrológica en términos medios anuales, de cada periodo del siglo XXI respecto a la correspondiente media anual del periodo de control del s. XX. Los datos de partida están constituidos por proyecciones diarias de PRE, TMX y TMN de cada una de las 12 proyecciones climáticas seleccionadas por la AEMET (2008). Estas series proceden de la proyección estadística (procedimiento de análogos, FIC, y de regresión lineal, SDSM) o bien por proyecciones dinámicas (PRUDENCE; modelos regionales PROMES y RCAO) de MCG. Las proyecciones estadísticas FIC y SDSM son series climáticas en estaciones meteorológicas; las proyecciones dinámicas son series de rejillas de unos 50 km<sup>2</sup> de resolución. Los periodos temporales del conjunto de series son: 1961-1990 o periodo de control; 2011-2040 y 2041-2070 únicamente en seis proyecciones climáticas; y finalmente 2071-2100.

El siguiente esquema muestra el conjunto de trabajos realizados para la implementación de las proyecciones de variables atmosféricas en el modelo hidrológico y la estimación del impacto del cambio climático.

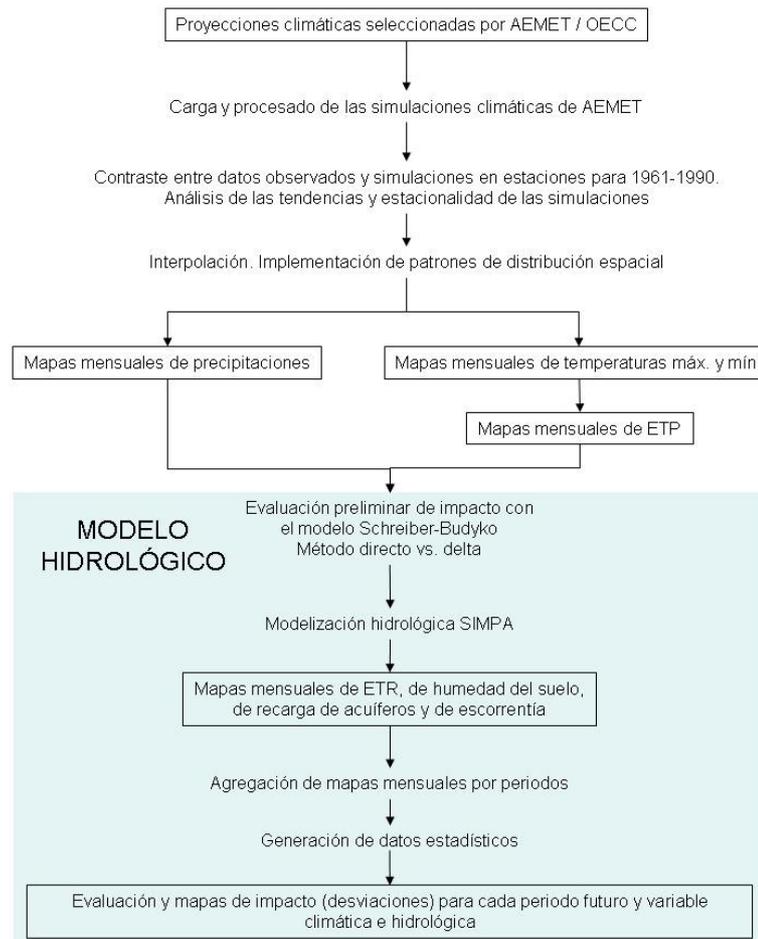


Figura 11. Esquema de la metodología seguida

Primeramente, se han cargado y procesado los datos diarios de las proyecciones. Una vez obtenidos los datos a escala mensual, se procedió al contraste de las proyecciones FIC y SDSM con los valores mensuales registrados en las estaciones meteorológicas durante el periodo común de información, 1961-1990. Para este contraste se seleccionaron series con un número mínimo de registros anuales completos. Se utilizaron gestores de bases de datos, hojas de cálculo, programas en fortran y scripts de linux y GRASS. Asimismo, se analizaron los cambios en las proyecciones del s. XXI respecto al periodo de control en términos de tendencia, localización y variabilidad de la PRE y TEM. La descripción del contraste, de las tendencias y de sus resultados se presentan en el capítulo 4 de este informe.

El siguiente paso es interpolar estos datos en estaciones y rejillas para proyectarlos a la resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> del modelo hidrológico. El método utilizado combina la interpolación de anomalías y el uso de patrones en media, elaborados conforme a una parametrización de factores fisiográficos como la orografía, la proximidad a la costa o la orientación. En el caso de los datos en rejilla, los patrones se adaptaron proporcionalmente a las medias en cada celda de la rejilla. Los resultados son mapas mensuales de PRE, TMX, TMN y media por semisuma de los anteriores (TEM) en la totalidad del territorio español. Los cálculos se realizan básicamente mediante la aplicación SIMPA en todos sus horizontes: 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. La descripción detallada de las interpolaciones y el cálculo de la ETP se presentan en el capítulo 5 de este informe.

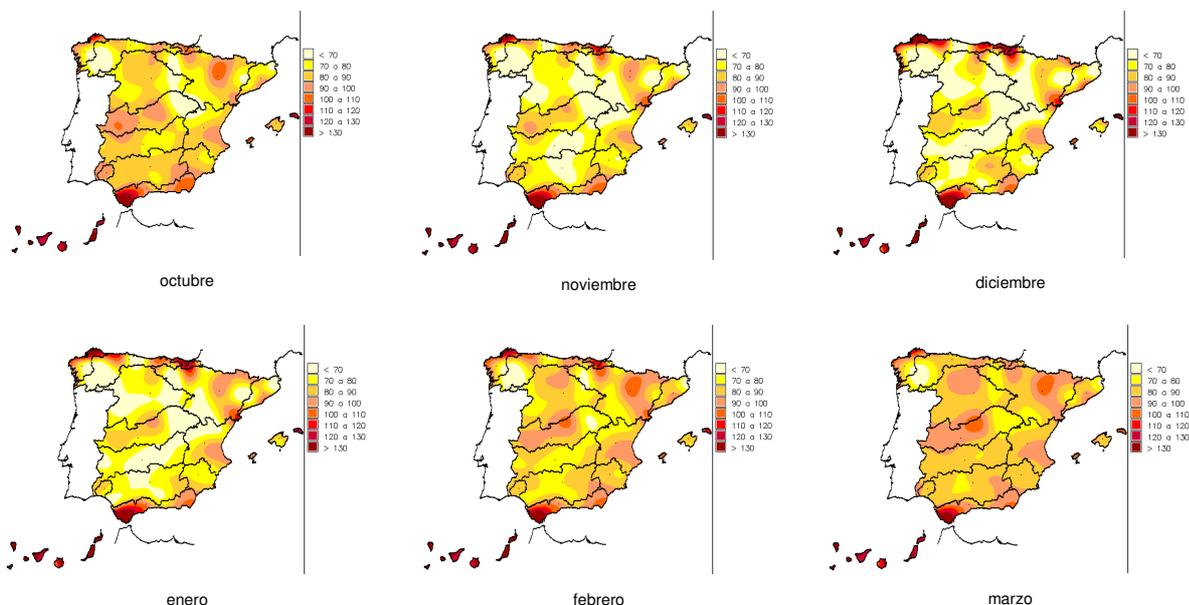
La ETP se define como tasa máxima a la que se podría evapotranspirar el agua desde la cubierta vegetal, superficies libres de agua, suelo y vegetación en unas condiciones óptimas de suministro, con el suelo y vegetación existente. En la Instrucción de Planificación Hidrológica (ARM/2656/2008) se indica en el ámbito de elaboración de los Planes Hidrológicos de cuenca: "... En la determinación de la ETP se utilizarán preferentemente formulaciones basadas en ajustes de medidas directas en tanques de evaporación o en la ponderación de términos aerodinámicos y energéticos. Si se utilizan formulaciones simplificadas basadas exclusivamente en datos de temperatura se verificará su aplicabilidad a las condiciones climáticas de la región correspondiente y se realizarán, en su caso, los ajustes regionales necesarios".

La información básica de las proyecciones climáticas está constituida por las temperaturas y PRE. Por ello se ha seleccionado el método de Hargreaves (Allen et al., 1998) recomendado por la FAO. Este método calcula la ETP a partir de temperaturas y las coordenadas geográficas, lo que permite su cálculo en todas las celdas de 1 km<sup>2</sup> en las que se discretiza España.

$$ETP_r = 0,0023 \cdot (TEM + 17,8) \cdot (TMX - TMN)^{0,5} \cdot R_A$$

Siendo  $R_A$ , la radiación solar extraterrestre.

La ETP se ha calculado combinando los métodos Penman-Monteith y Hargreaves, ya que si bien el primero se considera más adecuado bajo cualquier condición climática, precisa numerosos datos que sólo están disponibles en escasas estaciones y simulaciones. Por el contrario, el método de Hargreaves se apoya únicamente en las temperaturas por lo que necesita corregirse regionalmente. Se han utilizado mapas de coeficientes regionales de corrección producto de la comparación de resultados de ETP estimada mediante el método de referencia de Penman-Monteith y el de Hargreaves. Esta relación es característica de cada mes y se ha obtenido en las estaciones completas en las que se pueden aplicar los dos métodos. Los coeficientes correctores de las estaciones, se han interpolado para obtener mapas mensuales correctores.



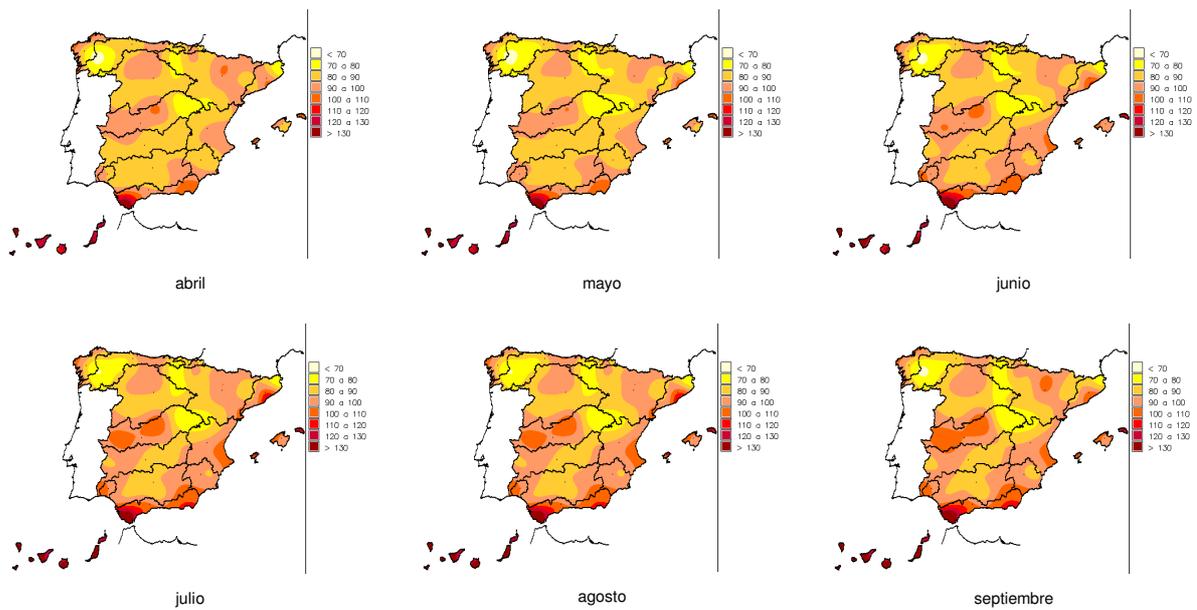


Figura 12. Mapa corrector Hargreaves-Penman Monteith. Octubre a septiembre

Las estimaciones de la fase atmosférica del ciclo hidrológico finalizan creando el conjunto de coberturas de ETP. Los mapas mensuales de ETP se refieren al cultivo de referencia. Finalmente, se aplica un coeficiente de cultivo (siguiente figura) a los mapas de ETP obtenido a partir de los usos de suelo (CORINE LAND COVER).

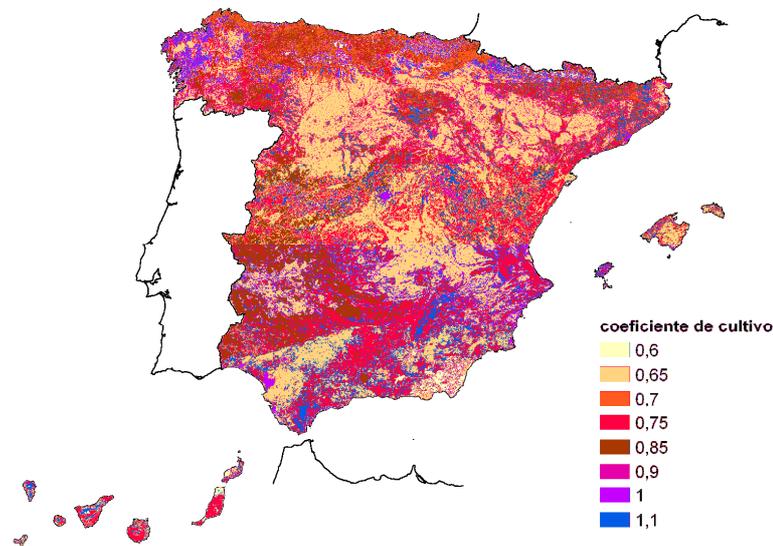


Figura 13. Coeficiente de cultivo en España

Los MCG trabajan a pequeñas escalas respecto a las necesidades de un modelo hidrológico y sus resultados no dan una variabilidad espacial adecuada y presentan un sesgo en diversas propiedades estadísticas. Estas diferencias entre las proyecciones y los datos registrados siguen apareciendo en las proyecciones regionalizadas como las propuestas para este trabajo, mediante técnicas estadísticas o dinámicas (AEMET, 2008), lo que puede invalidar la utilidad de las simulaciones (Wood et al, 2004) para evaluar el impacto en el ciclo hidrológico ya que los procesos hidrológicos dependen de la escala de las variables climáticas. La aplicación de transformaciones lineales, tales como el método delta (Hay et al, 2002) o no lineales, Leander et al (2006) en caudales máximos, derivadas de la

comparación de datos observados y proyecciones en el periodo de control se presenta como una opción de adaptación de las proyecciones al clima observado (Hay et al, 2003; Fujihara et al, 2008; Steele-Dunne, S. et al, 2008). Sin embargo, cabe destacar que la aplicación de transformaciones a las proyecciones de partida distorsiona el fundamento físico y el conjunto de propiedades y relaciones con las que las variables climáticas se han estimado. Además, los cambios evaluados para el periodo de control pueden no ser trasladables al resto de las series del siglo XXI.

La metodología seguida en este proyecto para el análisis del impacto del cambio climático ha sido utilizar directamente los datos de las proyecciones climáticas consistentes en resultados de MCGAO y downscaling estadístico y dinámico, sin corregir los sesgos que aparecen al comparar las proyecciones con la situación observada durante el periodo de control. Al no transformar las proyecciones de PRE y temperatura, se respeta la complejidad estadística de las proyecciones (Wood et al., 2004; Lenderik et al., 2007; Akhtar et al 2008), lo que tiene interés por el amplio enfoque desde el que se aborda en este trabajo el análisis del impacto en el ciclo hidrológico, con capítulos relativos a recursos hídricos y a fenómenos extremos como sequías y crecidas. Otros aspectos considerados a la hora de no realizar ninguna transformación son no alterar las relaciones entre varias variables climáticas, en este caso temperatura y PRE, y no trasladar al siglo XXI las transformaciones deducidas por comparación de los datos del periodo de control. Una aproximación similar, sin aplicar ninguna corrección de sesgo, es contemplada en Cabezas (2004) utilizando de ámbito espacial toda España. Los impactos en cada variable hidrológica y procesos se presentan como desviaciones de los valores medios de cada periodo de treinta años del siglo XXI respecto a los simulados en el periodo de control 1961-1990. Estas desviaciones serían trasladables a la situación real con la ventaja formal de que no se desvirtúa la información de partida proporcionada por las proyecciones sin transformar.

Los modelos hidrológicos utilizan técnicas de modelización matemática que simulan dinámicamente la fase terrestre del ciclo hidrológico. Establecen balances hídricos para los distintos procesos que tienen lugar desde el momento en que llueve hasta el momento en que el agua escurre superficial o subterráneamente. El modelo hidrológico de simulación de recursos hídricos de SIMPA ha sido ampliamente descrito durante los últimos años (Álvarez et al, 2004) y se ha aplicado al caso de España en sucesivos pasos de la Planificación Hidrológica. En SIMPA se implementó una versión distribuida del modelo de Témez (Ruiz García, 1999; Estrela et al., 1999; Témez, 1977) que reproduce los procesos esenciales del transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico (figura siguiente). Plantea el principio de continuidad de masa y leyes de reparto y transferencia entre los distintos almacenamientos en cada una de las celdas en que se discretiza el territorio. Simula el caudal medio mensual en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca, así como capas mensuales del resto de variables del ciclo hidrológico, ETR, ESC superficial, subterránea y total, HMS y REC a los acuíferos. La fase subterránea se simula en las denominadas unidades acuíferas mediante un modelo agregado de tanque. La resolución temporal que utiliza es el mes, por lo que puede obviarse la simulación de un gran número de almacenamientos intermedios y la propagación del flujo en la cuenca. Por tanto, se trata entonces de un modelo hidrológico conceptual y cuasidistribuido. La resolución espacial usada en este trabajo es de 1 km<sup>2</sup>.

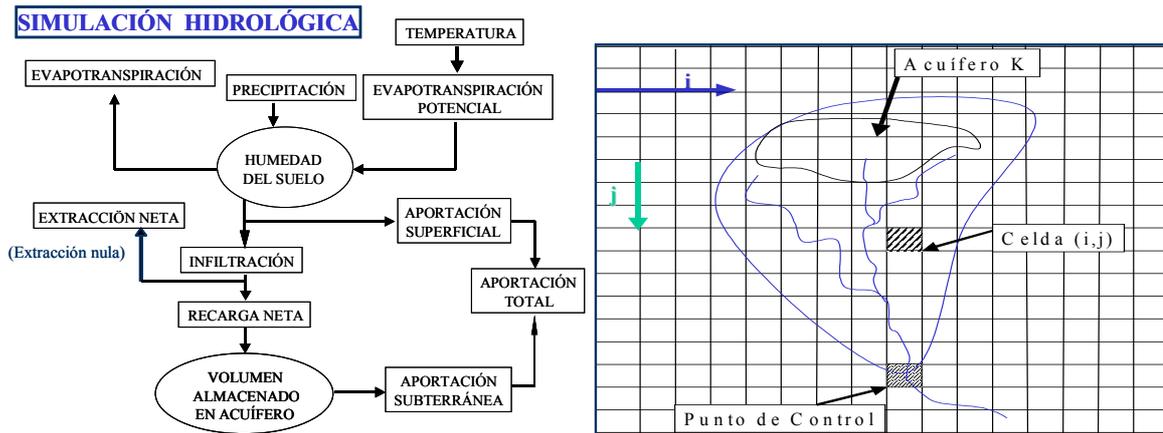
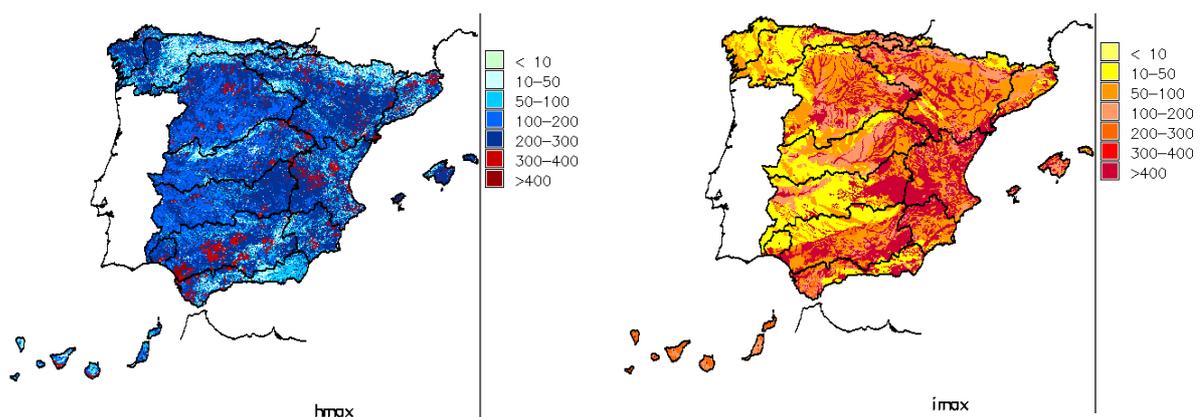


Figura 14. Esquema conceptual del módulo de evaluación de RR.HH. en SIMPA

Los procesos del ciclo hidrológico simulados dependen de una serie de parámetros que se ajustan en función de las características fisiográficas del medio y del grado de ajuste entre los caudales observados y los simulados. En el modelo, estos parámetros están representados por mapas, con variabilidad espacial, y están relacionados con la capacidad de almacenamiento en el suelo, la capacidad de infiltración y con la descarga de los acuíferos al sistema superficial, mediante un coeficiente de descarga.

El modelo implementado para el estudio del impacto del cambio climático en los recursos hídricos considera como unidades hidrogeológicas las correspondientes a la caracterización de las denominadas masas de agua subterránea definidas durante el proceso de planificación hidrológica. Los parámetros relativos al suelo, capacidad máxima de almacenamiento ( $h_{max}$ ), a la REC, máxima infiltrabilidad vertical ( $i_{max}$ ) y el parámetro de descarga de cada acuífero ( $alfa$ ), han sido calibrados dentro del proceso de evaluación de recursos hídricos correspondiente a los trabajos de *Evaluación de los recursos hídricos en España y adaptación de resultados al marco de planificación hidrológica* para la Encomienda de Gestión por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua) al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento para la Realización de Asistencia Técnica, Investigación y Desarrollo Tecnológico en Materias Competencia de la Dirección General del Agua (2007-2011).



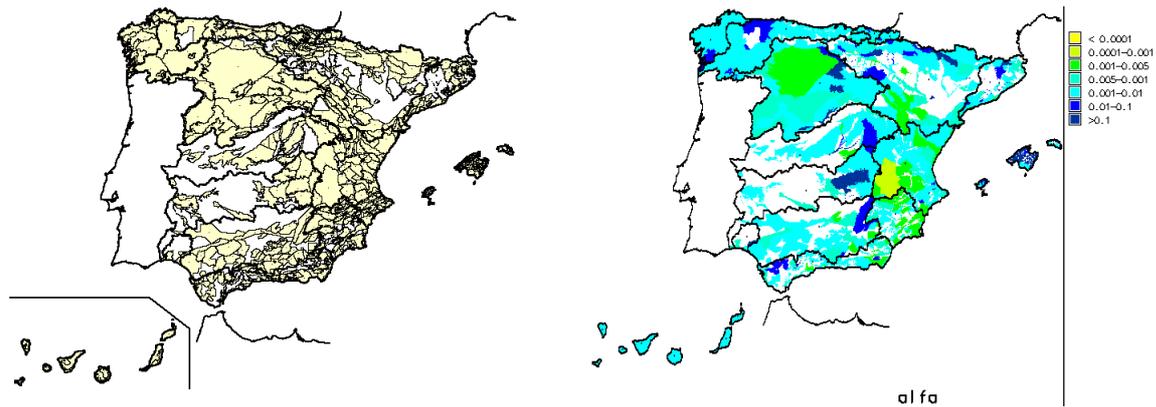


Figura 15. Parámetros del modelo de evaluación de RR.HH. y masas de agua subterránea

Los resultados del modelo son los mapas de los distintos almacenamientos (HMS y volumen de acuífero) y de las variables de salida del ciclo hidrológico (ETR y ESC total, obtenida esta última como suma de la ESC superficial y la subterránea). Los caudales medios mensuales, en cada intervalo de tiempo, se obtienen integrando la ESC total en las cuencas vertientes a los puntos de simulación.

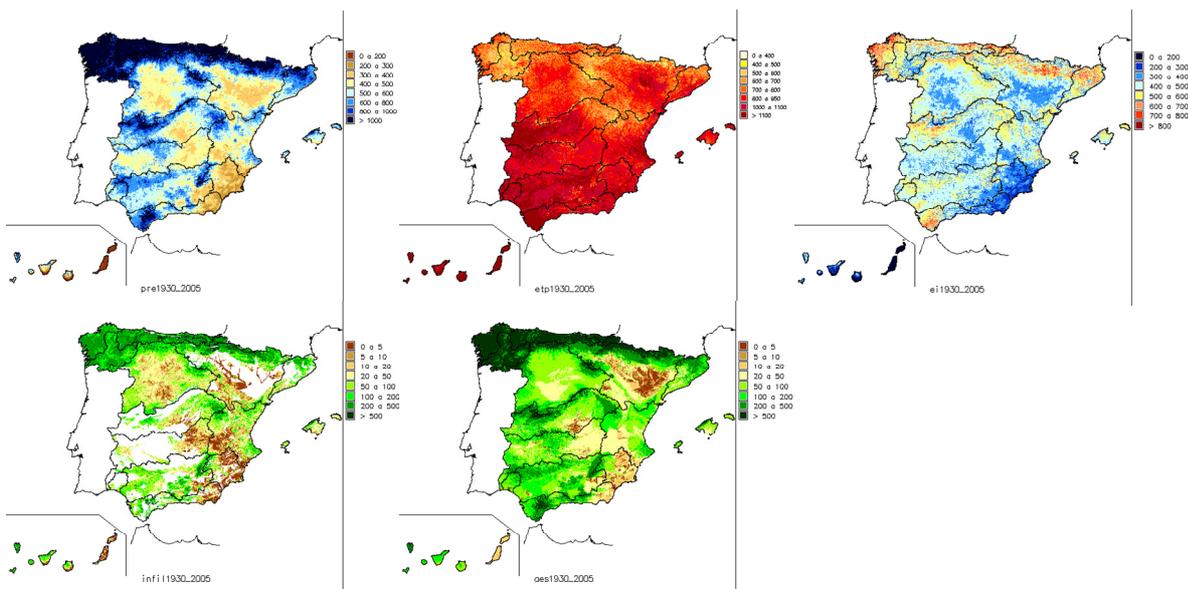


Figura 16. Resultados de PRE, ETP, ETR, REC Y ESC en SIMPA

Los mapas de variables hidrológicas se promedian para cada uno de los periodos objeto de estudio (1961-90, 2011-2040; 2041-2070 y 2071-2100). El grado de impacto del cambio climático resulta de la comparación, para cada proyección y escenario climático, de los valores medios obtenidos durante el periodo de referencia, 1961-1990, con los correspondientes al resto de periodos temporales del siglo XXI. Durante estos 4 periodos se han simulado las distintas fases del ciclo hidrológico utilizando como variables de entrada o fase atmosférica, los datos de las proyecciones climáticas.

De esa manera se obtuvieron los mapas, tablas y gráficos de desviaciones para cada periodo futuro y variable climática e hidrológica. Las tablas de resultados muestran las desviaciones promedio de cada proyección obtenidas en España y en cada D.H. respecto al periodo 1961-1990. Aunque las proyecciones son equiprobables, el índice de impacto se considera el promedio de la desviación del conjunto de las proyecciones para cada escenario de emisiones (A2 y B2). Para ello, se obtiene el mapa promedio anual de cada

variable hidrológica y, del mismo, el valor medio areal con el que calcular la desviación media.

Esta desviación obtenida a partir de valores areales promediados filtra la variabilidad espacial que se da en el interior de cada D.H. Agregando los resultados en términos de aportaciones en cada celda de la red hidrográfica, se obtuvieron los mapas de desviaciones de aportaciones acumuladas entre cada periodo del siglo XXI con respecto al periodo de control. Finalmente, además de las desviaciones obtenidas respecto al periodo 1961-1990, se obtuvieron para el caso de las aportaciones, las desviaciones del periodo 2011-2040 que cabría esperar respecto a los periodos a los que hace referencia la Instrucción de Planificación Hidrológica (orden ARM/2656/2008), 1940-2005 y 1980-2005, usando relaciones de proporcionalidad entre medias de estos periodos y el de control.

En total, se han utilizado unas 60.000 series de PRE o temperaturas simuladas durante 60 ó 120 años, según la proyección, para generar unos 200.000 mapas de unas 500.000 celdas de información, lo que ha requerido disponer de una capacidad de almacenamiento cercana a 1 TB. Este trabajo se ha realizado tanto en entorno Windows como Linux, mediante módulos preestablecidos en SIMPA, con programas nuevos específicos realizados en fortran y SIG-GRASS, con tratamiento de bases de datos y con su análisis en hojas de cálculo.

### 3.3.2 Fenómenos extremos

Este apartado ha sido incluido en los trabajos de la encomienda de gestión, aunque no constituye su objetivo principal. La metodología aplicada entonces al estudio del impacto del cambio climático en fenómenos extremos como crecidas y sequías está básicamente centrada en extraer aspectos descriptivos de las series de datos. En el caso de las crecidas la descripción se centrará en las PMX y en la aplicación del modelo del mapa de PMX en la España Peninsular para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a diversos periodos de retorno. En concreto se usa el de 100 años de periodo de retorno para obtener un índice de impacto respecto a las máximas diarias derivadas de las series diarias del periodo de control. En el caso de las sequías, se pueden utilizar las series de aportaciones derivadas del modelo de recursos. En este caso, las funciones de distribución que caracterizan la probabilidad de ocurrencia dependen de al menos dos variables, duración y déficit. Se suponen independientes para facilitar el ajuste de la función de distribución a eventos muestrales tomados de series sintéticas con las aportaciones de las principales cuencas en España.

### 3.3.3 Test de contraste de hipótesis

Los test de contraste de hipótesis son herramientas estadísticas para evaluar la verosimilitud de determinadas características en una muestra. En el presente trabajo se han utilizado para el análisis de los cambios en propiedades relativas a la tendencia central, variabilidad y tendencias en las series climáticas, desde el s. XX al XXI, así como para evaluar el grado de significación de las diferencias entre series de datos observados y proyectados. Los test se han aplicado mediante el paquete informático de estadística R (The R foundation for Statistical Computing, 2008), de libre y extendida difusión.

Los test de contraste de hipótesis juzgan si una propiedad que se supone cumple una población estadística es observada en una muestra de dicha población. La hipótesis que se contrasta es la hipótesis nula,  $H_0$ . Es la hipótesis que aceptaremos a menos que el test indique su falsedad. Es nula ya que  $H_0$  nunca se considera probada, aunque sí puede ser rechazada por la evidencia existente en los datos. Aceptar o rechazar la hipótesis  $H_0$  supone rechazar o aceptar la hipótesis alternativa,  $H_1$ .

Esta decisión se basa en estadísticos de los que se conoce su distribución de probabilidad. El estadístico toma para la muestra dada un valor determinado y mediante la probabilidad asociada a la presentación de este valor, se obtiene un criterio para aceptar o no una hipótesis. Es necesaria la utilización de un estadístico como medida y de una distribución de probabilidad que permita valorar cómo de raro es el resultado del estadístico obtenido en función de los datos de la muestra. El p-valor es la probabilidad de obtener un valor del estadístico mayor que el obtenido de la muestra. El nivel de significación es el valor de esta probabilidad tal que se rechaza la  $H_0$ . Las pruebas se plantean desde un punto de vista conservador y el nivel de significación se fija en valores bajos, normalmente un 5% o un 1%.

Si el p-valor de la muestra es inferior al  $\alpha$  elegido, rechazaremos la  $H_0$ ; en caso contrario, la aceptaremos. Consecuentemente, el resultado del test va a depender de la elección que se haga a priori del valor de  $\alpha$ , pudiendo aceptarse  $H_0$  con  $\alpha$  igual a 0,05 y rechazarse  $H_0$  con, por ejemplo,  $\alpha$  igual a 0,04. El p-valor, por tanto, es una medida de la credibilidad del resultado. En este trabajo, se acepta  $H_0$  cuando el p-valor es mayor que 0,20; cuando el p-valor es menor que 0,05, se rechaza  $H_0$ ; finalmente, cuando el p-valor está entre 0,05 y 0,20, se considera que hay dudas razonables en cuanto al resultado del test. Los test utilizados son los de Mann-Kendall, Wilcoxon, F-Snedecor, Fligner Killeen y binomial.

### 3.3.3.1 Test de Mann-Kendall

El test no paramétrico de Mann-Kendall se utiliza para detectar tendencias en las series temporales o, lo que es lo mismo, para detectar la consecuente falta de homogeneidad temporal. La hipótesis nula es que no hay tendencia en los datos, independientes y pertenecientes a la misma población. Es un test no paramétrico desarrollado originalmente por Mann en 1945 y modificado posteriormente por Kendall en 1975. El test de Mann Kendall permite explorar esta existencia de tendencias calculando el siguiente estadístico:

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

Donde

$$\text{signo}(x) = \begin{cases} +1, & \text{para } x > 0 \\ 0, & \text{para } x = 0 \\ -1, & \text{para } x < 0 \end{cases}$$

El estadístico se compone de un sumatorio tal que para cada elemento, se calcula el número de elementos posteriores en la serie que le superan, restando el número de elementos posteriores que le son inferiores. La suma de los resultados para los elementos de la serie desde 1 a  $n-1$  da el valor del estadístico  $S$ . Este estadístico tomará valores enteros de  $+n(n+1)/2$  a  $-n(n+1)/2$ . Se asume que sigue una distribución normal con media 0 y varianza,

$$V = \frac{n \cdot (n-1) \cdot (2n+5) - \sum_{i=1}^g t_i \cdot (t_i-1) \cdot (2t_i+5)}{18}$$

$V$  es función del número total de datos ( $n$ ) y del número de grupos con medida idéntica ( $g$ ), siendo  $t_i$  el número de medidas con igual valor de cada uno de los grupos.

De ese modo, si la serie no tiene tendencia, el estadístico  $S$  estará próximo a 0; si tiene tendencia positiva, se obtendrá un valor positivo; y si tiene tendencia negativa, un valor negativo. El test es no paramétrico ya que no depende de distribuciones a priori, trabaja

sobre rangos y filtra la sensibilidad a los extremos. El estadístico  $S$  se estandariza para obtener otra variable ( $z$ ) que tenga una distribución normal estandarizada. La estandarización se ajusta según las siguientes expresiones:

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V}}, & \text{para } S > 0 \\ 0, & \text{para } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V}}, & \text{para } S < 0 \end{cases}$$

Como  $S$  toma valores enteros,  $S$  y  $z$  tienen el mismo signo.

Del valor del cuantil ( $z$ ) correspondiente a la serie que se está analizando se puede obtener su p-valor, utilizando para ello la tabla de la distribución normal estandarizada. Si ese p-valor es superior al nivel de significación elegido ( $\alpha$ ), se aceptará la homogeneidad en la serie, pero si es inferior se aceptará la existencia de una tendencia positiva o negativa. Este test se puede aplicar unilateralmente o bilateralmente.

Un estadístico relacionado con  $S$  es la *tau de Kendall* ( $\tau$ ):  $\tau = S/D$ , siendo  $D$  el máximo valor de  $S$ . Consecuentemente, el signo de *tau* es igual que el de  $S$  y  $z$ .

En R (The R foundation for Statistical Computing, 2008) se ha utilizado el comando MannKendall del paquete estadístico denominado KENDALL para obtener el p-valor de la muestra. Este comando sólo permite la aplicación bilateral; no obstante, se ha aplicado unilateralmente aceptando tendencias crecientes cuando p-valor es mayor que 0,10 y *tau*, positivo.

### 3.3.3.2 Test de Wilcoxon

El test de Wilcoxon o Mann-Whitney contrasta si dos series temporales independientes ( $x_i$ ,  $y_j$ ) ( $i=1..n$ ,  $j=1..m$ ) son homogéneas o no. La hipótesis nula consiste en que las dos series tienen la misma mediana. Es un test no paramétrico desarrollado inicialmente por Wilcoxon en 1945 para muestras de igual tamaño y extendido en 1947 por Mann y Whitney para tamaños arbitrarios de muestras.

El test trabaja sobre los rangos y se aplica con independencia de la función de distribución a la que pertenezcan. Para aplicar el test, se mezclan las dos muestras y se asigna un rango a cada uno de los valores de la nueva serie única. Siendo el estadístico  $R_x$  de Wilcoxon o Mann-Whitney la suma de los rangos ocupados por la serie  $x_i$ :

$$R_x = \sum_{i=1}^n r_{xi}$$

Este índice sigue aproximadamente una distribución normal, si el tamaño de las muestras no es pequeño ( $n$  y  $m > 5$ ), con la media y desviación típica de  $R_x$  siguientes:

$$\mu = \sum_{i=1}^n i \frac{1}{N} = n \frac{N+1}{2} \quad \sigma = \sqrt{\frac{nm(N+1)}{12}}$$

El test de Wilcoxon puede trabajar con datos que no sigan una distribución normal, ya que analiza sus rangos ordenados y éstos sí se asume que siguen la distribución normal. Al trabajar con rangos no se atiende al valor de los datos, sino a la posición relativa que ocupan; por ello este test analiza si hay un cambio en las medianas y no en las medias.

Estos resultados permiten estandarizar el valor de  $R_x$  obtenido de la muestra y determinar los límites de las regiones de aceptación y crítica según los valores normales. Según

Kundzewicz (2000) se pueden tomar como valores estandarizados los de las siguientes expresiones:

$$R_x < \mu \Rightarrow R_x = \frac{R_x - \mu + 0,5}{\sigma}$$

$$R_x = \mu \Rightarrow R_x = 0$$

$$R_x > \mu \Rightarrow R_x = \frac{R_x - \mu - 0,5}{\sigma}$$

A partir de esos valores estandarizados se puede calcular el p-valor de la serie temporal y aceptar o rechazar  $H_0$ .

En R (The R foundation for Statistical Computing, 2008) se ha utilizado en paquete estadístico denominado STATS y el comando wilcox.test para obtener el *p-valor* de la muestra. Se ha aplicado unilateralmente considerando crecimiento o decrecimiento de las variables hidrológicas.

### 3.3.3.3 Test de F-Snedecor

El test de *F-Snedecor* se usa para verificar la hipótesis de que las medias de múltiples poblaciones normalmente distribuidas y con la misma desviación estándar son iguales. También se usa para probar la hipótesis de que las desviaciones estándar de dos poblaciones normalmente distribuidas son iguales. Consecuentemente, es un test paramétrico.

En estadística se denomina prueba *F (de Fisher)* a cualquier prueba en la que el estadístico utilizado sigue una distribución *F*. Usada en teoría de probabilidad y estadística, la distribución *F* es una distribución de probabilidad continua. También se la conoce como distribución *F* de Snedecor o como distribución *F de Fisher-Snedecor*. El estadístico del contraste es:

$$\frac{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (x_i - \mu_x)^2}{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_1^m (y_i - \mu_y)^2} = \frac{\frac{s_x^2}{\sigma_x^2}}{\frac{s_y^2}{\sigma_y^2}}$$

Cuya distribución es *F de Snedecor* con  $n-1$  y  $m-1$  grados de libertad. El planteamiento de hipótesis puede ser de dos tipos:

#### 1. Test bilateral

- a.  $H_0$ : las varianzas son iguales ( $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$ )
- b.  $H_1$ : las varianzas son distintas ( $\sigma_x^2 \neq \sigma_y^2$ )

#### 2. Test unilateral

- a.  $H_0$ : las varianzas son iguales ( $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$ )
- b.  $H_1$ : la varianza en la primera población es mayor ( $\sigma_x^2 > \sigma_y^2$ )

En un contraste bilateral y denominando  $F_0$  al cuantil  $\alpha/2$  y  $F_1$  al cuantil  $1-\alpha/2$  de la distribución *F-Snedecor* con  $n-1$  y  $m-1$  grados de libertad, se rechaza la hipótesis nula cuando:

$$\frac{S_x^2}{S_y^2} < F_0 \text{ y } S_x^2 < S_y^2 \quad \text{o} \quad \frac{S_x^2}{S_y^2} > F_1 \text{ y } S_x^2 > S_y^2$$

En el caso unilateral, si  $F_0$  es el cuantil  $1-\alpha$  de la distribución *F-Snedecor* con  $n-1$  y  $m-1$  grados de libertad, se rechaza la hipótesis nula cuando:

$$\frac{S_x^2}{S_y^2} > F_0$$

En R (The R foundation for Statistical Computing, 2008) se ha utilizado en paquete estadístico denominado *STATS* y el comando *var.test* para obtener el p-valor de la muestra. Se ha aplicado bilateralmente.

### 3.3.3.4 Test de Fligner Killeen

Para evaluar los cambios en variabilidad de la series de extremos, se ha utilizado el test no paramétrico de Fligner Killeen. Sirve para evaluar si varias ( $k$ ) muestras tienen la misma varianza. Fue desarrollado por Fligner-Killeen en 1976 y modificado posteriormente por Conover et al. (1981).

El test se basa en juntar las  $k$  muestras y ordenar los valores absolutos de  $|X_{i,j} - \tilde{X}_j|$ , siendo  $\tilde{X}_j$  la mediana de la muestra  $j$  ( $1 \leq j \leq k$ ) y  $X_{i,j}$  el valor  $i$  de la muestra  $j$ . Se asigna una puntuación a cada valor ordenado según:

$$a_{N,i} = \Phi^{-1}\left(\frac{1}{2} + \frac{i}{2(N+1)}\right)$$

donde  $\Phi^{-1}(z)$  es la distribución acumulada  $N(0, 1)$  de  $-\infty$  a  $z$  y así  $\Phi^{-1}(p)$  es el percentil 100 de la distribución  $N(0,1)$ . El estadístico de prueba es:

$$x_o^2 = \frac{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{A}_j - \bar{a})^2}{V^2}$$

Donde  $\bar{A}_j$  es la puntuación media para la muestra  $j$ ,  $\bar{a}$  es la puntuación media para todos los  $a_{N,j}$  y  $V^2$  es la varianza muestral de todas las puntuaciones:

$$N = \sum_{j=1}^k n_j \quad \bar{A}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} a_{N,m_i}$$

siendo  $a_{N,m_i}$  la puntuación del rango en orden creciente para la observación  $i$  en la muestra  $j$

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{N,i} \quad V^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_{N,i} - \bar{a})^2$$

Para muestras grandes, este estadístico bajo  $H_0$  tiene una distribución chi-cuadrado asintótica con  $k-1$  grados de libertad. Conover et al (1981) llevaron a cabo una simulación comparando diferentes tests de homogeneidad de varianza y concluyeron que el test de Fligner-Killeen modificado es menos sensible a desviaciones del supuesto de normalidad.

En R (The R foundation for Statistical Computing, 2008) se ha utilizado en paquete estadístico denominado *STATS* y el comando *fligner.test* para obtener el p-valor de la

muestra. Se ha aplicado unilateralmente a las series de PMX, pero se ha controlado el crecimiento o decrecimiento de la varianza muestral por sus implicaciones en el ajuste de funciones de distribución de máximos.

### 3.3.3.5 Test basado en la distribución binomial

Dadas en una región  $n$  estaciones sobre cuyas series se ha aplicado un test como los anteriormente descritos, se ha utilizado este test de la binomial para extraer conclusiones regionales. Dicho de otro modo, se quiere saber si un número  $r$  de rechazos de  $H_0$  en una región con  $n$  estaciones en las que se ha aplicado un test determinado (Wilcoxon por ejemplo), son suficientes para rechazar la homogeneidad en el conjunto de la región. La función de distribución binomial depende de un número total de  $n$  estaciones en las que solamente se puede dar dos situaciones con probabilidades de ocurrencia  $p$  y  $q$ . La probabilidad  $p$  es la del suceso alternativo, equivalente al nivel de significación del primer test;  $q$  es su complementaria y coincide con la probabilidad del acierto. A su vez, es necesario seleccionar un nivel de significación para el test regional.

Con carácter regional, se supone que la evidencia en contra de la hipótesis de homogeneidad es significativa cuando el número de estaciones supera el dado por su nivel de significación. La probabilidad de que se produzcan más de  $r$  rechazos se obtiene mediante la fórmula:

$$P(y > r) = \sum_{y=r+1}^n B(y) = \sum_{y=r+1}^n \binom{n}{y} \cdot p^y \cdot q^{n-y}$$

Siendo  $y$  la variable aleatoria;  $B$  la distribución binomial;  $n = n^{\circ}$  total de estaciones en la región;  $r =$  número de estaciones en las que se acepta la  $H_1$ ;  $p =$  nivel de significación del primer test;  $q =$  complementario del anterior;  $n-r = n^{\circ}$  de estaciones en las que se acepta la  $H_0$ .

La aplicación de este test solamente necesita del conteo de resultados de la aplicación de una prueba como las descritas en los apartados anteriores, el conteo de serie que cumplen y no cumplen la  $H_0$  y el cálculo del número mínimo de estaciones asociado al nivel de significación tal que una vez superado se considera que hay suficiente evidencia en contra de la homogeneidad regional.

## 4 CONTRASTE Y ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS

Este capítulo está dividido en dos apartados principales. En el primero se contrastan los datos de PRE y TEM de las proyecciones con series observadas de la red AEMET durante el periodo 1961-1990. La segunda parte se dedica a describir qué tipo de cambios conllevan las proyecciones durante el s. XXI respecto al s. XX. Los análisis se realizan con series proyectadas en estaciones, previamente a la realización de cualquier operación de interpolación para su implementación en el modelo hidrológico.

### 4.1 Contraste entre proyecciones y datos observados durante el periodo 1961-1990

Se entiende que las diferencias resultantes del contraste de proyecciones y registros de PRE y TEM corresponden a las propias incertidumbres de la simulación física de procesos atmosféricos, a errores en la representación de los procesos en la atmósfera y a los relacionados con la regionalización dinámica o estadística. El contraste de los apartados siguientes se expresa básicamente en términos de diferencias y sesgos.

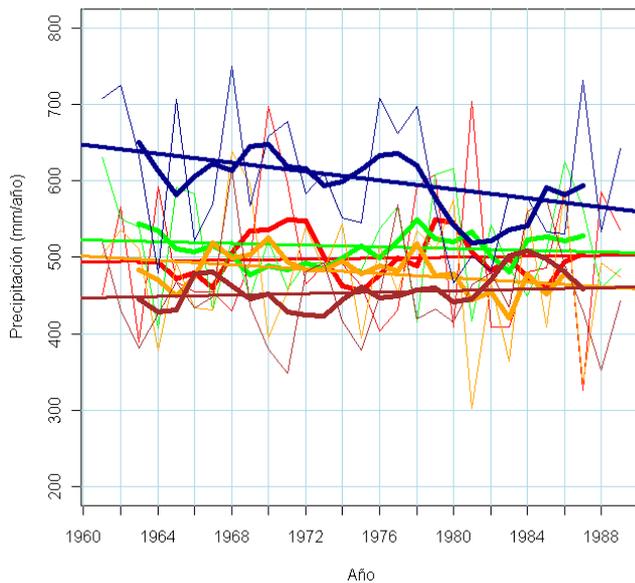
#### 4.1.1 Precipitación

La PRE es una de las variables que con más incertidumbre manejan los modelos de cambio climático. Una de las razones reside en que la PRE y la generación de nubes son procesos que ocurren a escalas mayores que las que actualmente pueden simular los modelos. Su importancia en los estudios hidrológicos es alta ya que es la variable más directamente relacionada con la generación de ESC. ACA (2008) concluía en un estudio en unas cuencas del noroeste peninsular que las PRE regionalizadas mediante anidamiento de modelos regionales en el proyecto PRUDENCE son inferiores a las observadas entre un 12% y 27%.

Cada una de las proyecciones usadas en este proyecto de evaluación del impacto climático en los recursos hídricos proviene de los resultados de un modelo MCG y de un procedimiento de regionalización estadístico o dinámico. Las técnicas de proyección regional FIC y SDSM aplicadas a los MCG CGCM2, ECHAM4, HadAM3 y HadCM3 permiten manejar entre 5.579 y 2.320 series PRE diarias.

En el presente estudio, se ha realizado una comparación de las series de PRE regionalizadas con datos registrados por AEMET durante el periodo de control 1961-1990. Se han seleccionado para ello unas 622 series de PRE que cuentan con más de 28 años de registros completos durante el periodo de control de 30 años, 1961-1990. Durante este periodo, los resultados de las proyecciones CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM en cualquiera de los dos escenarios de emisiones de GEI, A2 y B2, se asume idéntico.

La siguiente gráfica muestra las series promediadas al conjunto de estaciones desde 1961 hasta 1990. La tabla muestra los estadísticos comparados entre proyecciones y datos observados. En cada año se ha calculado la PRE media de las 622 estaciones y de cada serie anual. La media aritmética lógicamente solo es un resultado aproximado de la PRE media en España, pero suficiente para valorar el acuerdo entre datos simulados de proyecciones y datos observados. La tabla que acompaña a la gráfica incluye el valor medio, la desviación típica y coeficiente de variación, los valores máximo y mínimo de las series de PRE anuales, así como el p-valor resultante de la aplicación del test de Mann-Kendall para el contraste de la significación de la pendiente general de los treinta años de PRE.



Proyecciones	Observada AEMET	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM
Media	603	515	480	454	499
Desviación típica y coeficiente variación	85 0,14	65 0,13	82 0,17	65 0,14	92 0,18
Máximo y mínimo	749 467	630 408	638 303	616 349	704 326
P valor Tendencia Mann Kendall	0,12	0,69	0,59	0,67	0,87

Figura 17. Estadísticas PRE anual en España en 622 estaciones meteorológicas

Los estadísticos anteriores permiten apreciar diferencias importantes. Las mayores PRE corresponden a la serie registradas de AEMET, entre un 15% y un 25% superiores al resto, marcando un claro sesgo respecto a las proyecciones. Con la variabilidad de las series anuales aparentemente no ocurre lo mismo. Son significativamente inferiores las desviaciones típicas de las proyecciones CGCM2-FIC y HadAM3-FIC; sin embargo, las otras dos proyecciones sí tienen varianzas en el orden de magnitud de los datos observados.

Las componentes de tendencia son claramente distintas entre los datos observados y los proyectados. En la gráfica anterior, la tendencia se ha representado mediante una recta dibujada sobre los datos de cada serie. Mientras la tendencia de datos observados muestra un carácter decreciente, las series simuladas son estacionarias. La aplicación del test estadístico de Mann Kendall y la obtención del *p-valor* destaca las diferencias entre la pendiente de la serie de datos observados (*p-valor* de 12%) y la del resto de proyecciones, con *p-valor*s similares o superiores al 60%.

Por último, las fluctuaciones plurianuales tampoco siguen una evolución pareja entre la media de los datos observados y las correspondientes a las proyecciones, sin dar una apariencia de acuerdo general, tal como se puede comprobar visualmente mediante la superposición de medias móviles en la figura anterior (en trazo grueso). Así, las series medias proyectadas no describen ningún ciclo seco como el predominante en la década de los años 80. Cabría esperar que el periodo de control hubiera servido para la calibración y permitiera comprobar cierto grado de ajuste y que algunas de las características de las series observadas hubieran sido reproducidas por las series simuladas.

Desde otro punto de vista, estas simulaciones pueden asimilarse a realizaciones que, en un contexto estocástico, guardarán similitudes con las distribuciones de frecuencia de los datos observados. La siguiente figura representa un diagrama *qq* en el que se ha superpuesto la distribución de cuantiles de valores observados y los correspondientes al periodo de control de cada una de las proyecciones.

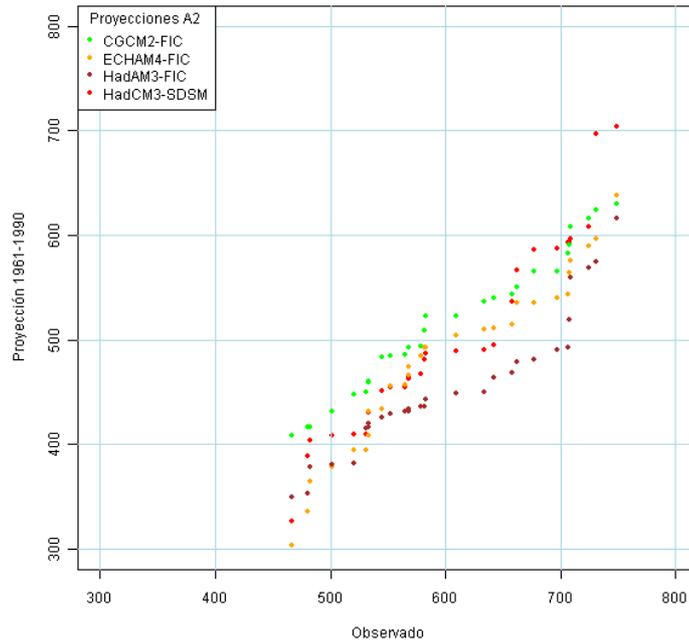


Figura 18. Diagrama QQ de PRE (mm) observada y proyectada para los SRES A2

La figura anterior permite apreciar la alineación entre los valores observados y los de CGCM2-FIC. Esto permitiría inferir que las distribuciones de frecuencia de los observados y CGCM2-FIC son similares. En el resto de proyecciones, no hay relación lineal entre las frecuencias de PRE, por lo que no serían suficientes transformaciones lineales de las proyecciones basadas únicamente en la corrección del sesgo de parámetros como la media y variabilidad.

Se ha calculado en cada una de las 622 estaciones el error medio relativo (EMR) respecto a los datos observados. En las siguientes imágenes se aprecia que existen patrones regionales en la magnitud de los errores medios o sesgo. CGCMA2-FIC alcanza mayores valores de PRE que los observados en las estaciones de la cuenca del Duero, Galicia y parte de mitad norte de la cuenca del Ebro. Esta proyección obtiene la PRE media más alta del conjunto. Los déficit de PRE se encuentran en el sureste, Guadalquivir, Levante, Baleares y Canarias. En las otras tres proyecciones hay un predominio claro de EMR negativos, es decir, con PRE proyectadas inferiores a las observadas. Los EMR más altos en valor absoluto al 25% se encuentran en la mitad sur de la Península. Otra singularidad en el patrón de diferencias de PRE se encuentra en HadAM3-FIC, con disimetría este oeste y mayores errores, en valor absoluto, en la vertiente atlántica. El conjunto de mapas se resume en la presencia de un sesgo generalizado con valores observados superiores respecto a los simulados.

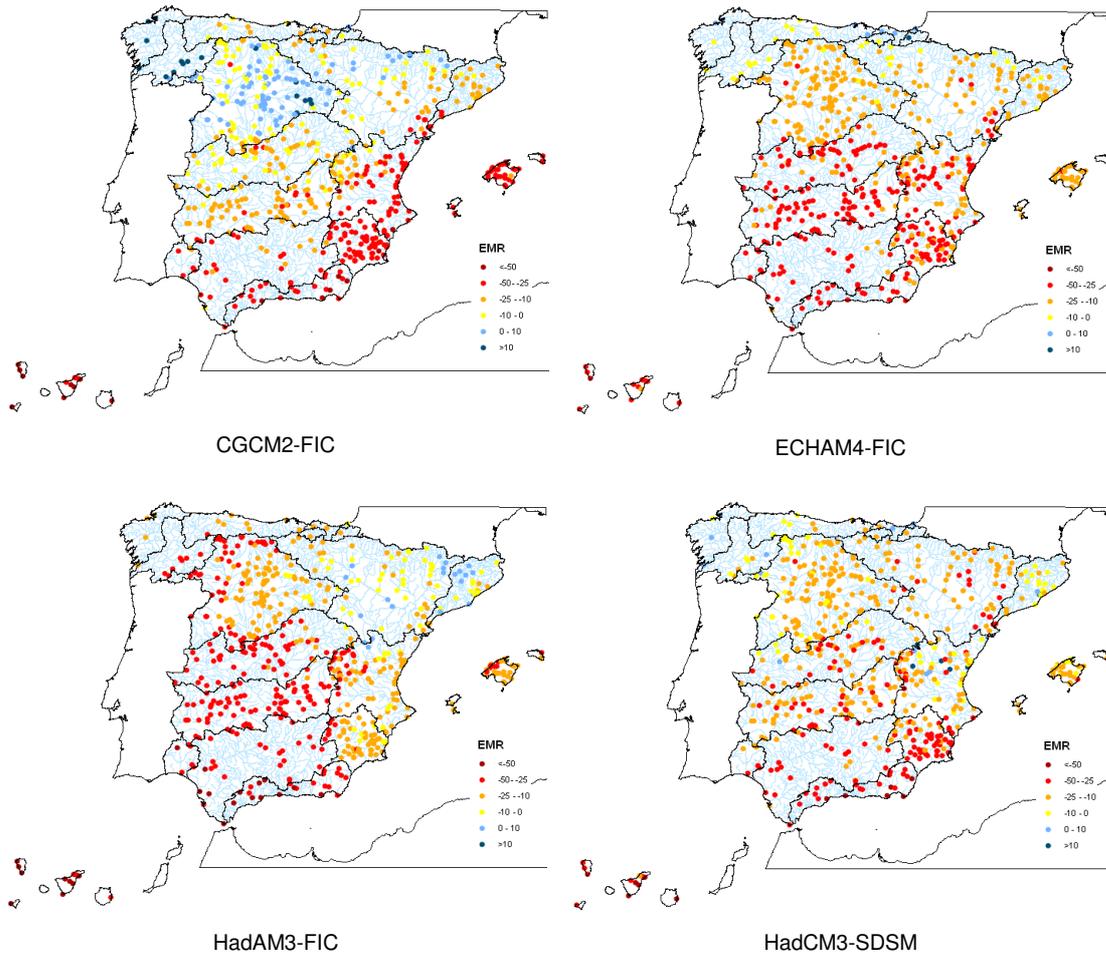


Figura 19. EMR anual (%) entre proyecciones y datos observados. Periodo 1961-1990

	Observados	CGCM2-FIC		ECHAM4-FIC		HadAM3-FIC		HadCM3-SDSM		Proyección media	
	mm	mm	EMR	mm	EMR	mm	EMR	mm	EMR	mm	EMR
Cuencas del Norte	1308	1321	0,97	1289	-1,49	1032	-21,08	1206	-7,80	1212	-7,35
Cuencas del Duero	628	620	-1,37	517	-17,67	475	-24,40	543	-13,62	539	-14,26
Cuencas del Tago	700	626	-10,52	513	-26,71	461	-34,07	567	-18,98	542	-22,57
Cuencas del Guadiana	549	451	-17,86	389	-29,13	344	-37,34	429	-21,89	403	-26,55
Cuencas del Guadalquivir	593	441	-25,61	417	-29,67	334	-43,64	424	-28,49	404	-31,85
Cuencas del Sur	481	292	-39,28	325	-32,59	264	-45,17	294	-38,85	294	-38,97
Cuencas del Segura	371	239	-35,51	277	-25,22	299	-19,36	272	-26,57	272	-26,67
Cuencas del Júcar	533	392	-26,46	403	-24,36	433	-18,73	459	-14,01	422	-20,89
Cuencas del Ebro	625	573	-8,27	528	-15,44	577	-7,57	508	-18,61	547	-12,47
Cuencas Internas de	693	573	-17,31	590	-14,97	664	-4,21	631	-8,98	615	-11,37

	Observados	CGCM2-FIC			ECHAM4-FIC		HadAM3-FIC		HadCM3-SDSM		Proyección media	
	mm	mm	EMR	mm	EMR	mm	EMR	mm	EMR	mm	EMR	
Cataluña												
Islas Baleares	599	385	-35,68	492	-17,81	453	-24,30	532	-11,16	465	-22,24	
Islas Canarias	418	219	-47,70	291	-30,30	207	-50,41	253	-39,58	242	-42,00	

Tabla 7. PRE (mm) y EMR (%) entre proyecciones y datos observados en grandes cuencas

Los mapas anteriores permiten localizar las diferencias de proyecciones y datos observados respecto al valor medio. La comparación de varianzas se ha realizado aplicando el test F de Snedecor y utilizando como criterio el p-valor. Hay homogeneidad de varianzas cuando el p-valor supera el 20%; se descarta la hipótesis de homogeneidad cuando es menor que el 5%. Los valores entre 5% y 20% quedan en un dominio de razonable duda.

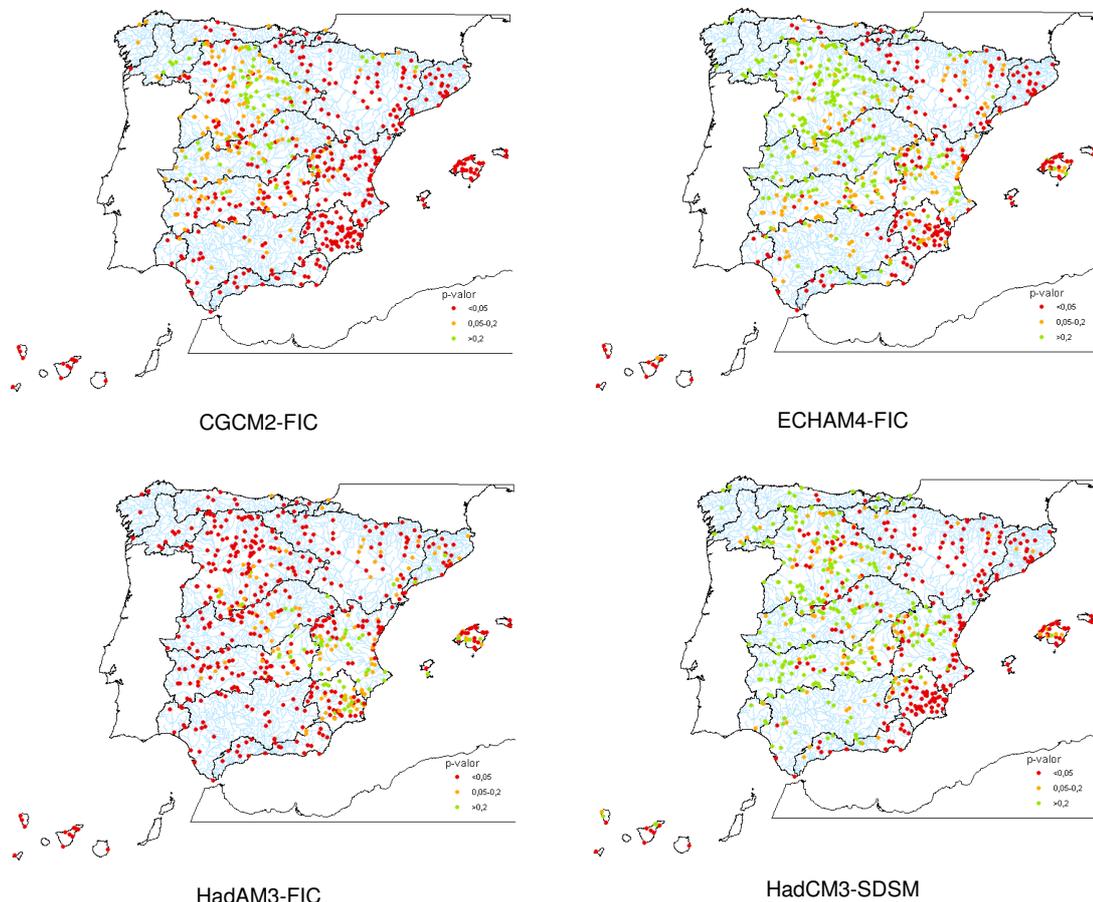


Figura 20. Test F-Snedecor: p-valor entre proyecciones y observados. Periodo 1961-1990

El aspecto general de los mapas anteriores no permite aceptar la hipótesis de homogeneidad de varianzas en las grandes cuencas y territorios insulares. Únicamente, ECHAM-FIC y HadCM3-SDSM dan la impresión de cierta homogeneidad en la submeseta norte y en fachada atlántica. Con generalidad, no se puede mantener la hipótesis de homogeneidad excepto en alguna región y siempre en función de la proyección elegida.

Las proyecciones también muestran diferencias al compararlas a escala mensual con los datos registrados en la selección de 622 estaciones. Las siguientes figuras muestran los valores medios mensuales y los de desviación típica. El ciclo estacional se inicia con el pico de PRE otoñal, el descenso relativo de invierno, al que sigue otro incremento primaveral. En verano las PRE caen a valores mínimos. Sin embargo, las evoluciones estacionales de las proyecciones dan un ciclo de PRE que no alcanza los valores medios de otoño y superan los de verano. ECHAM4-FIC y HadAM3-FIC sí muestran los picos de otoño y primavera, mientras que HadCM3-SDSM y CGCM2-FIC dan una única onda con un pico en invierno y valle en verano. Al existir una diferencia en medias y variabilidad, también se muestran las gráficas de valores estandarizados, resultado de la división del valor mensual por el respectivo parámetro medio anual. Se comprueba que las proyecciones HadCM3-SDSM y CGCM2-FIC intensifican las PRE de invierno, mientras que HadAM3-FIC se ajusta mejor a la oscilación anual. La desviación típica como medida de variabilidad mensual presenta un mejor acuerdo, especialmente durante los meses de verano, aunque las diferencias crecen hasta las máximas de otoño.

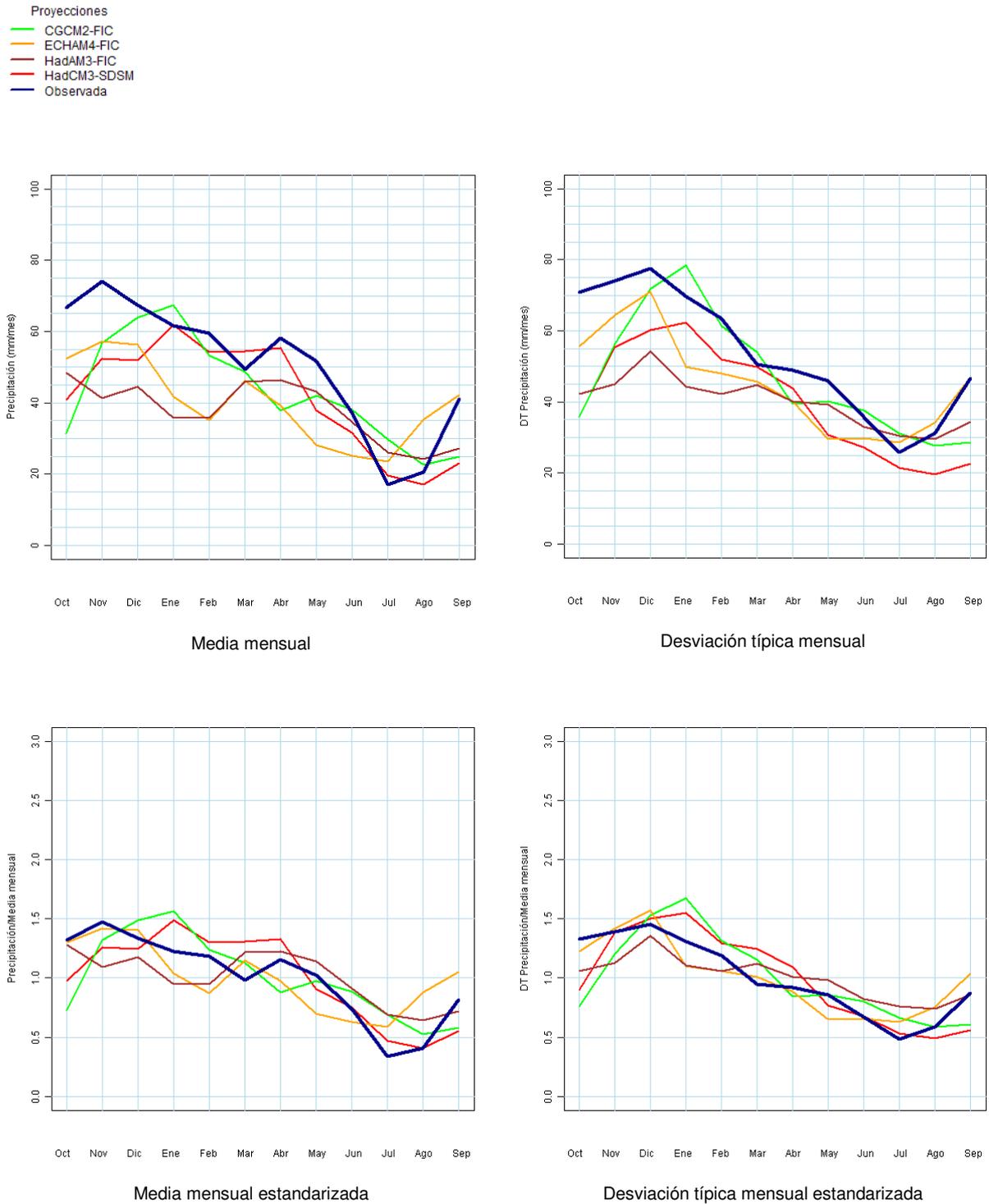


Figura 21. Ciclo estacional PRE. Periodo 1961-1990. España

La figura anterior se ha elaborado con datos medios de todas las estaciones seleccionadas de España. Las cuencas del Duero y Segura siguen ofreciendo discrepancias entre las distintas evoluciones del ciclo de PRE (siguiente figura). En el Duero, las PRE de CGCM2-FIC son superiores a las observadas durante la estación invernal, entre los meses de diciembre a marzo; en primavera las PRE son menores que las observadas. En la cuenca del Segura el mes de marzo presenta una anomalía en ECHAM4-FIC. En CGCM2-FIC y

HadAM3-FIC los máximos mensuales se encuentran entre finales de la primavera y principios del verano, retrasando el pico relativo de primavera e infravalorando el máximo absoluto de otoño.

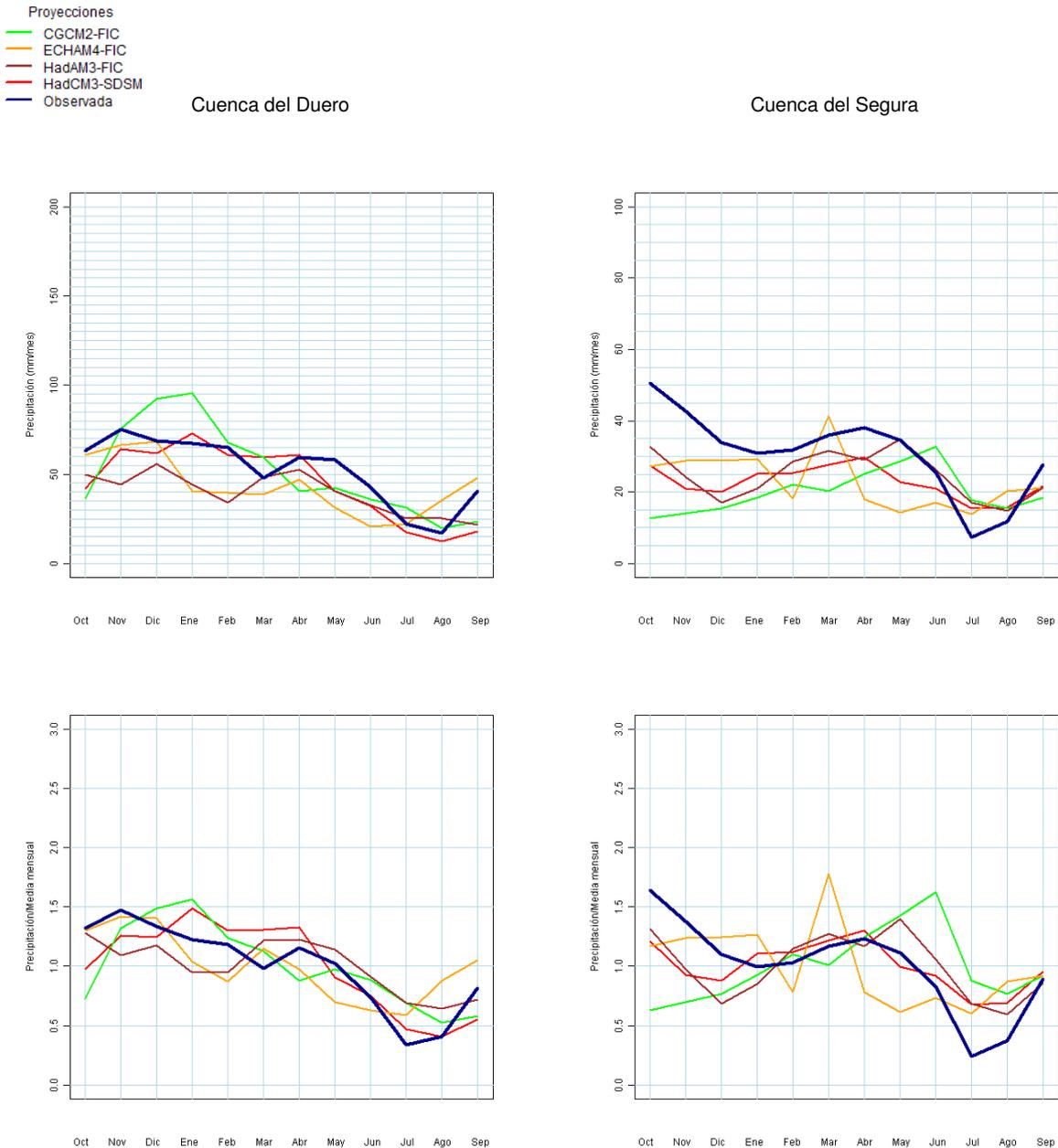


Figura 22. Ciclo estacional PRE. Periodo 1961-1990. Cuencas del Duero y Segura

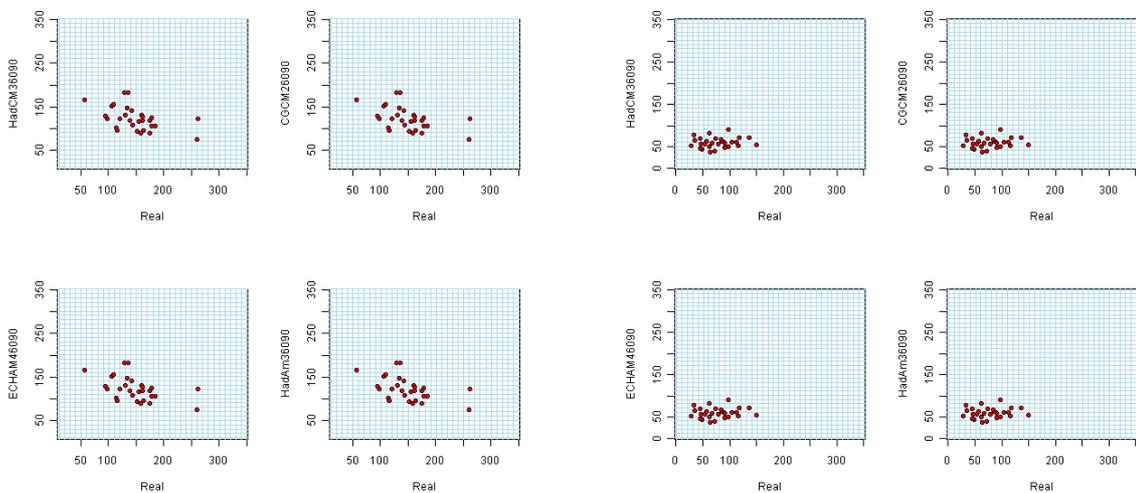
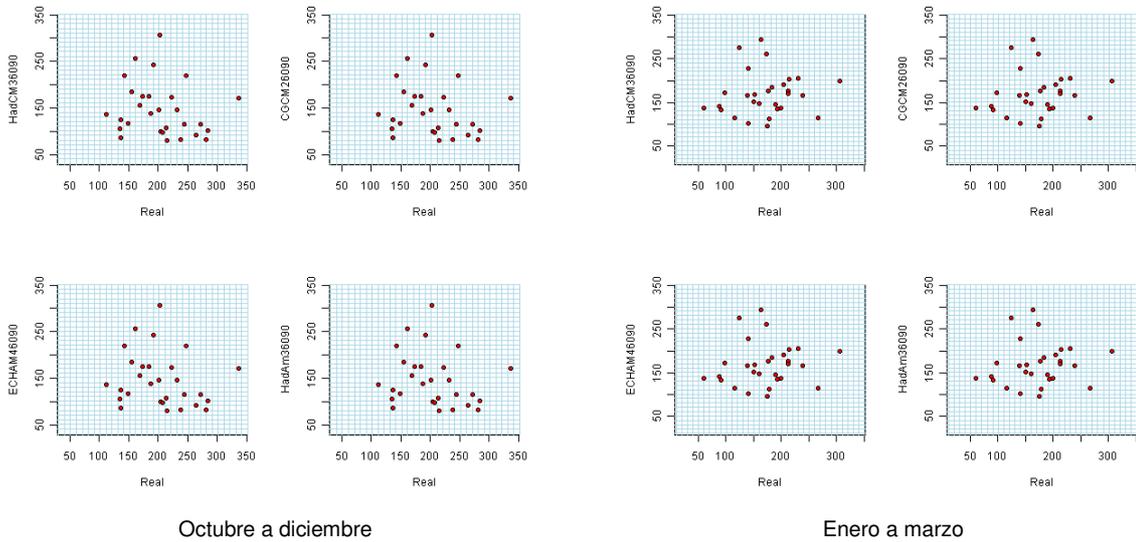
La siguiente tabla muestra los valores trimestrales de medias y desviaciones típicas para los datos observados y las cuatro proyecciones climáticas, así como los porcentajes de EMR de éstas (en letra cursiva). Considerando el conjunto de modelos, no hay estaciones con mejor comportamiento que otras. Respecto a la media de PRE, de otoño a primavera, todas las proyecciones muestran sesgos negativos; en verano, solamente HadCM3-SDSM tiene un EMR negativo.

Trimestre	Media (mm)				Desviación típica (mm)			
	oct a dic	ene a mar	abr a jun	jul a sep	oct a dic	ene a mar	abr a jun	jul a sep

Observado	203	172	148	77	54	55	43	31
CGCM2-FIC	151	167	118	78	41	55	24	16
<i>CGCM2-FIC</i>	-26%	-3%	-20%	1%	-24%	0%	-44%	-48%
ECHAM4-FIC	166	124	91	100	56	48	15	29
<i>ECHAM4-FIC</i>	-18%	-28%	-39%	30%	4%	-13%	-65%	-6%
HadAM3-FIC	137	115	124	78	39	41	23	23
<i>HadAM3-FIC</i>	-33%	-33%	-16%	1%	-28%	-25%	-47%	-26%
HadCM3-SDSM	147	169	123	60	58	49	27	12
<i>HadCM3-SDSM</i>	-28%	-2%	-17%	-22%	7%	-11%	-37%	-61%

Tabla 8. Comparativa de datos de PRE (mm) estacionales observados y proyectados

La falta de acuerdo entre datos observados y proyecciones se ilustra con los diagramas de dispersión elaborados con datos trimestrales desde 1961 hasta 1990. Cada nube solamente cuenta con treinta datos.



Abril a junio

Julio a septiembre

Figura 23. Dispersión datos trimestrales de PRE (mm) observados y proyectados

La siguiente tabla amplía los estadísticos alcanzados anteriormente con las 622 series PRE. El objetivo es mostrar una comparativa entre proyecciones durante el periodo de control y los cambios en media previstos por las proyecciones a lo largo del s. XXI. Si se comparan con los EMR del contraste durante el periodo de control, se comprueba que el orden de magnitud de los errores es superior a los cambios proyectados para el s. XXI. Este hecho, abunda en la necesidad de mejorar la calidad de la información de partida en estudios sectoriales de impacto del cambio climático. Con la variabilidad no ocurre lo mismo y hay proyecciones con desviaciones típicas en el mismo orden de magnitud que las series observadas. También hay proyecciones con decrecimientos notables. En todo caso estos resultados se han obtenido con 622. En apartados siguientes se describen los cambios del conjunto total de estaciones disponibles en cada proyección.

	1961-1990	2011-2040		2041-2070		2071-2100		2011-2100	
		A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Observado	603	-	-	-	-	-	-	-	-
CGCM2-FIC	515	520	491	493	504	467	494	494	496
ECHAM4-FIC	480	433	429	411	428	407	428	417	428
HadAM3-FIC	454	-	-	-	-	453	441	-	-
HadCM3-SDSM	499	489	490	460	453	371	456	442	467
Observado	85	-	-	-	-	-	-	-	-
CGCM2-FIC	65	64	63	45	70	52	42	58	59
ECHAM4-FIC	82	62	78	54	91	64	59	60	76
HadAM3-FIC	65					65	60		
HadCM3-SDSM	92	77	100	91	81	72	101	94	95

Tabla 9. Estadísticos de la selección de estaciones pluviométricas. Escenarios A2 y B2

En resumen, se han descrito varios tipos de diferencias entre las series de PRE procedentes de las proyecciones y las registradas. Las comparaciones se han realizado con cerca de 622 estaciones de las que se dispone de más de 28 años de datos completos y series de PRE de 4 MCG con regionalización estadística. Se ha comprobado la falta de acuerdo entre PRE observadas y proyectadas a escalas anuales y estacionales.

#### 4.1.2 Temperatura

La temperatura es una variable básica en los MCG asociada a escalas compatibles con procesos implementados en estos modelos. Esto implica que la respuesta de estos modelos debe ser de mayor calidad que la encontrada en el caso de las precipitaciones.

Al igual que con la PRE, el contraste de temperaturas se ha realizado con series observadas y proyectadas en estaciones (CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM). También se ha asumido que no hay diferencias entre los escenarios de emisiones de GEI A2 y B2 para el periodo de control. La comparación de los datos de temperaturas se hizo en 218 estaciones, seleccionadas por tener datos en todas las proyecciones FIC y SDSM y en las series de TMX y TMN observadas. Las series de TEM se obtienen por semisuma de las anteriores. De las últimas, se eligieron estaciones con series observadas que tenían al menos 25 años hidrológicos completos entre 1961 y 1990. No se tomaron las series de temperaturas reales originales ya que el número de estaciones se reducía ostensiblemente.

El completado de las series de temperatura se realizó mediante un modelo de regresión bivariada con estacionarización previa; los datos completados suponen el 17%.

La siguiente figura muestra la serie de TEM anual en 218 estaciones meteorológicas y las de cada una de las proyecciones entre 1961 y 1990. En trazo grueso se muestra la media móvil de cada proyección. Todas las series son crecientes, si bien la mayor pendiente es la correspondiente a los datos observados. Aparentemente, el acuerdo de los resultados de las proyecciones con los valores observados es mejor que el alcanzado en el caso de las PRE. Sin embargo, siguen existiendo sesgos importantes: HadAM3-FIC da una TEM anual superior a la observada en 3°C, ECHAM4-FIC en 1°C, CGCM2-FIC 1°C inferior y HadCM3-SDSM da valores medios similares a los observados.

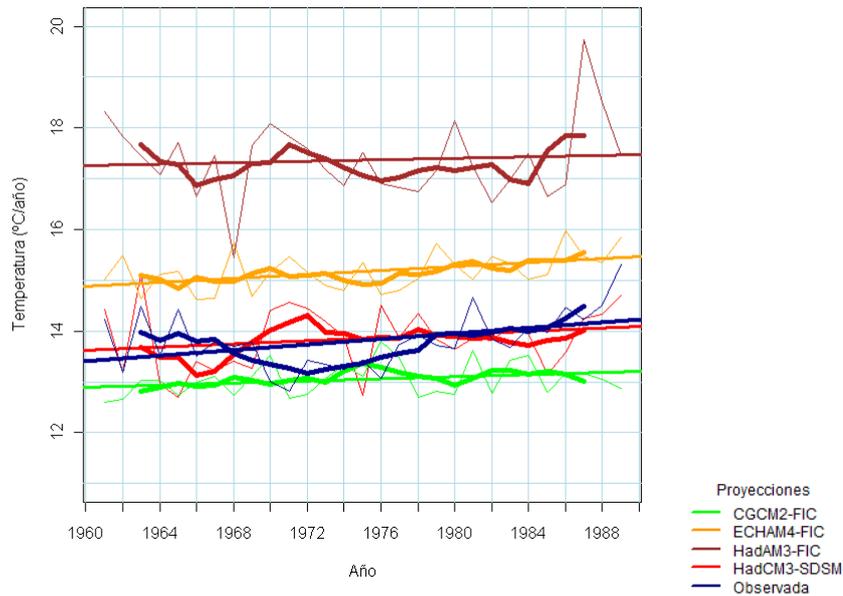
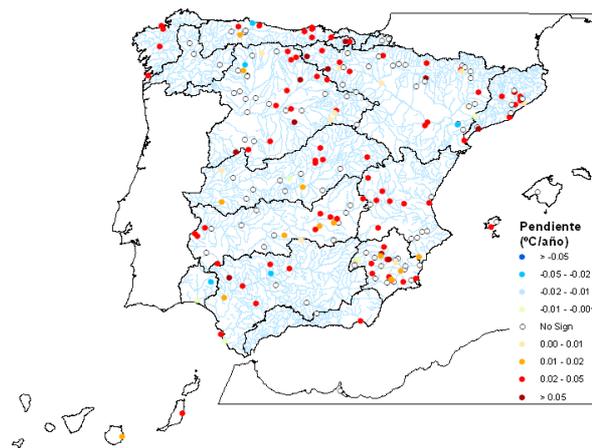
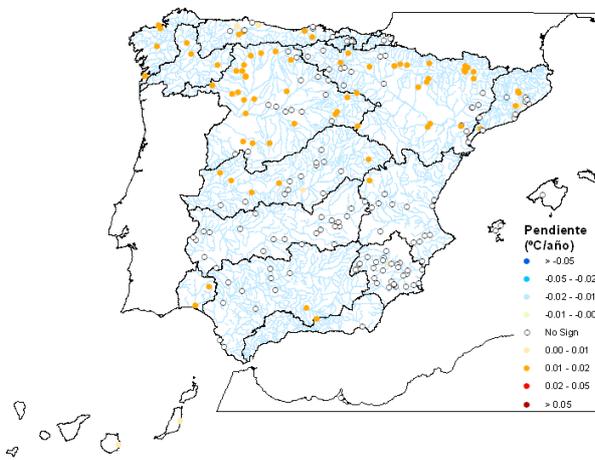


Figura 24. TEM anual en España en 218 estaciones meteorológicas

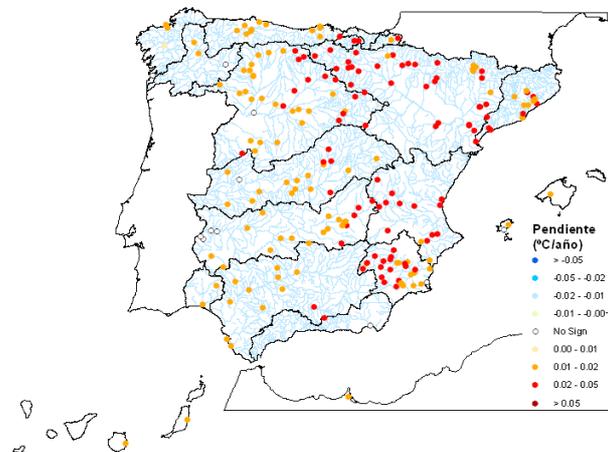
Todas las proyecciones dan una tendencia de incremento de TEM más suavizada que la registrada. Al desagregar la información anterior en las estaciones, se observa que, los incrementos de TEM observada son superiores a los 0,2°C/10 años de manera generalizada en España. Las proyecciones de los modelos del Hadley Center, HadCM3-SDSM y HadAM3-FIC, dan pendientes similares a cero excepto en estaciones del sureste Peninsular. CGCM2-FIC sitúa los incrementos entre 0,1°C y 0,2°C/10 años en la mitad norte de la Península. Por último, ECHAM4-FIC muestra tendencias crecientes más pronunciadas en la vertiente mediterránea que en la atlántica. Las siguientes figuras muestran el valor de las tendencias significativas calculadas durante el periodo de control para series observadas y proyectadas en estaciones.



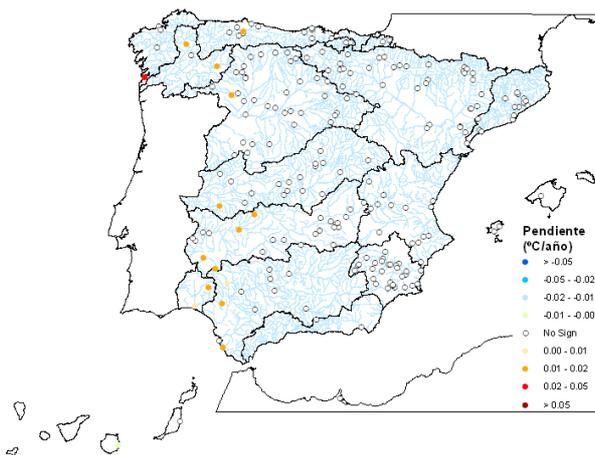
Series observadas



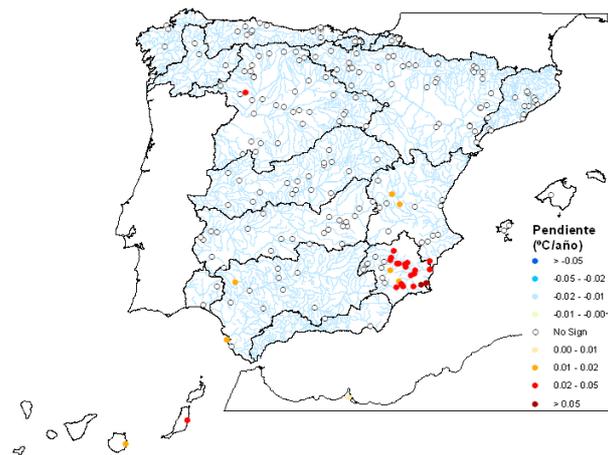
CGCM2-FIC



ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC



HadCM3-SDSM

Figura 25. Tendencia significativa en selección de series TEM. Periodo 1961-1990

Tal como se aprecia en la siguiente figura, la evolución mensual del ciclo estacional de TEM de las proyecciones es unimodal, con los meses más calurosos en verano y los más fríos en invierno. El acuerdo con los datos reales es aparentemente bueno, a pesar del sesgo,

repartido sistemáticamente en todos los meses. Únicamente destaca el adelanto de un mes que dan las TEM de ECHAM4-FIC. En términos de variabilidad vuelve a destacar ECHAM4-FIC con reducciones desde los meses de primavera a verano.

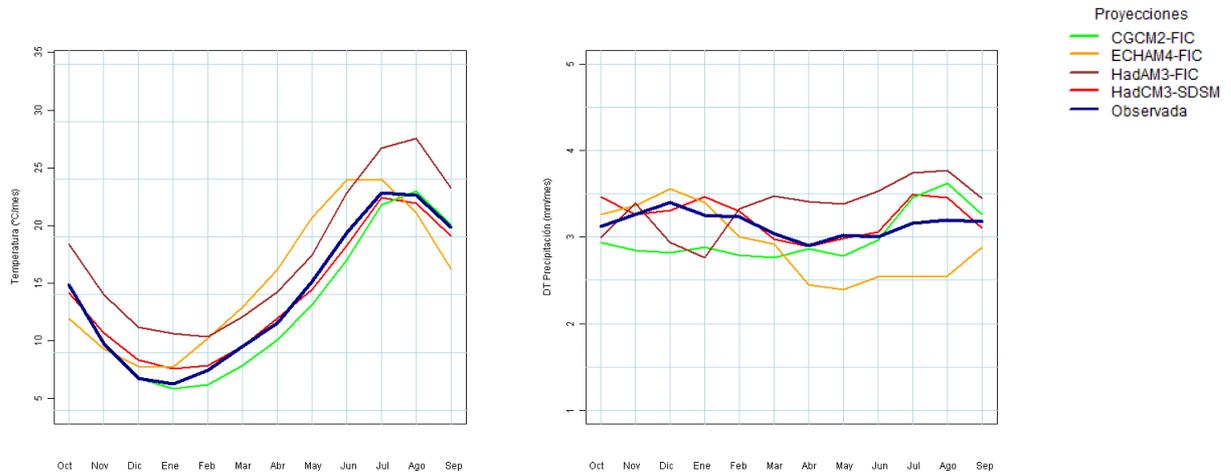


Figura 26. Ciclo estacional TEM ( $^{\circ}\text{C}$ ) en media (izda) y desviación típica (dcha). 1961-1990

Como en el caso de las PRE, es interesante comparar el orden de magnitud de las diferencias entre datos observados y proyectados con los resultados de las proyecciones durante el s. XXI. La evolución de la TEM durante el siglo XXI muestra tendencias crecientes muy acusadas, especialmente durante los últimos 60 años, desde 2040 hasta final de siglo. La siguiente gráfica superpone la evolución del promedio de TEM observadas entre los años 1961 y 1990 con las proyecciones correspondientes al escenario A2. Las diferencias de TEM observada y proyectada son de varios  $^{\circ}\text{C}$  en los casos ECHAM4-FIC-A2 y HadAM3-FIC, e inferiores a las correspondientes diferencias entre la TEM proyectada a final del s. XXI y la media del periodo de control. Los gradientes de TEM son positivos en todos los casos y los del s. XXI son también superiores a los del periodo de control.

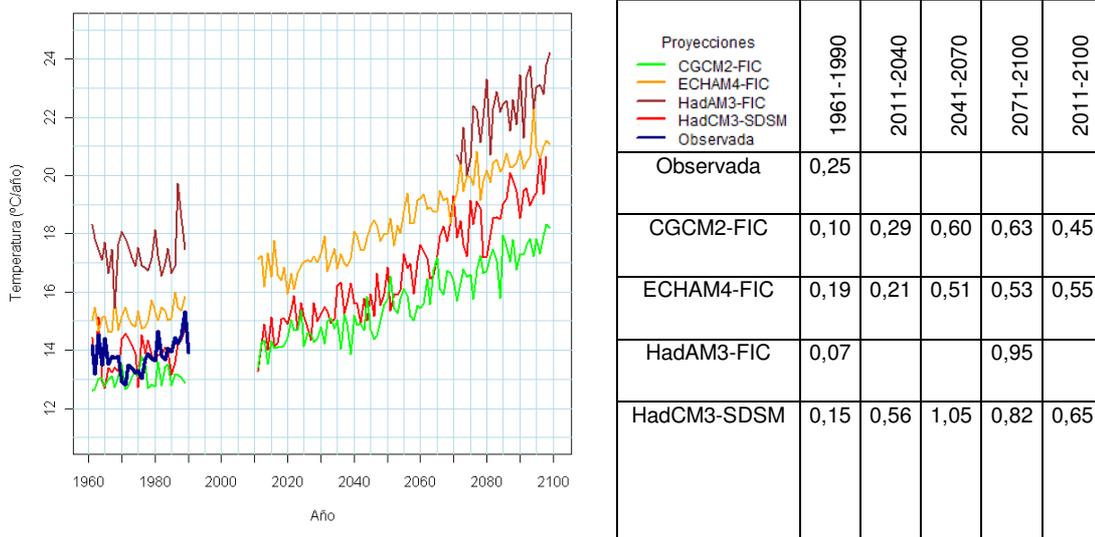


Figura 27. Series de TEM anual.  $\Delta$  TEM anual ( $^{\circ}\text{C}/10$  años) por proyección. Escenario A2

Los incrementos del escenario B2 son inferiores a los anteriores y las tendencias más suavizadas.

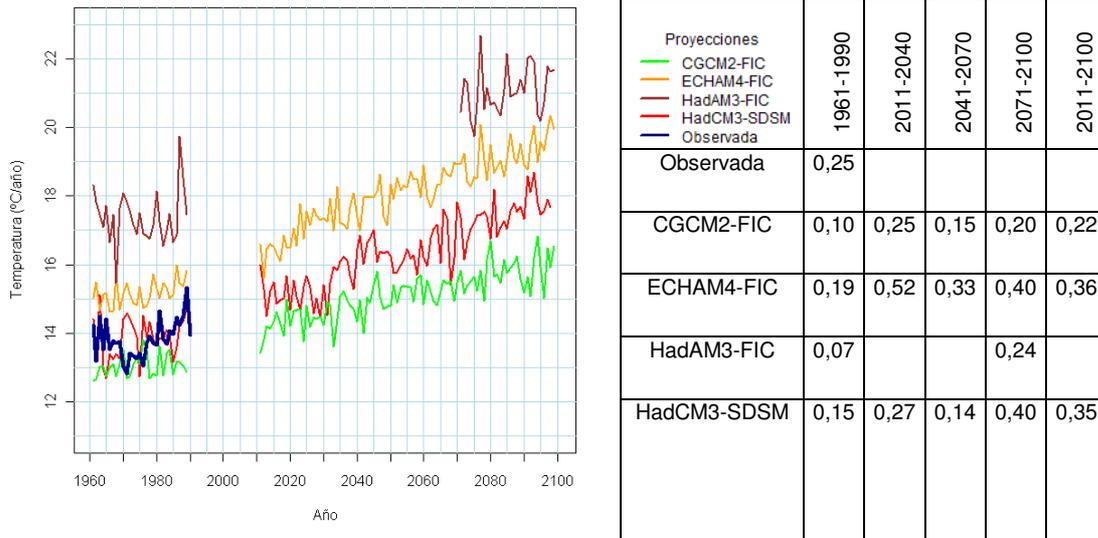


Figura 28. Series de TEM anual.  $\Delta$  TEM anual ( $^{\circ}\text{C}/10$  años) por proyección. Escenario B2

### 4.1.3 Precipitación máxima diaria

Los valores de PMX anual simulados presentan importantes diferencias con respecto a los valores observados, tal como ocurre con la PRE anual. El contraste se ha llevado a cabo comparando las series de PMX anual observadas con las series simuladas en estaciones (CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM) durante el periodo de control. Se ha asumido que no hay diferencias entre los escenarios de emisiones de GEI A2 y B2 para el periodo de control.

En primer lugar, se comparan los estadísticos media, desviación típica y coeficiente de asimetría. La comparación de la media y la desviación típica se realiza en aquellas estaciones con datos observados durante más de 22 años completos en los registros históricos del periodo de control 1961-1990. El número de estaciones seleccionadas para contrastar las proyecciones FIC y SDSM es de 1.769 y 1.384 respectivamente. La comparación del coeficiente de asimetría se ha calculado con series de más de 25 años completos de observaciones durante el periodo 1961-1990, ya que el coeficiente de sesgo es más sensible al número de años de las series. Al aumentar el criterio de 22 a 25 años, se reduce el número de estaciones a 1.212 (FIC) y 953 (SDSM). Las figuras siguientes muestran la dispersión de los estadísticos estimados con los correspondientes a las proyecciones regionalizadas.

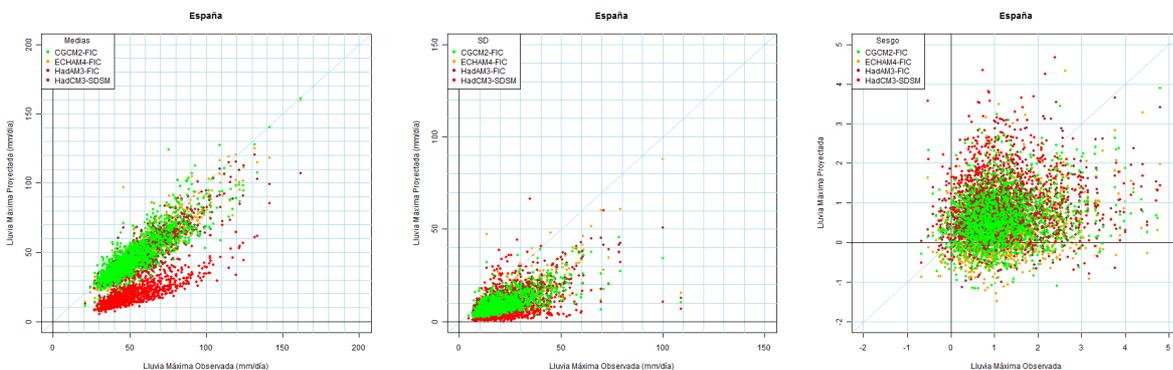


Figura 29. Dispersiones de medias, desviaciones típicas y coeficientes de asimetrías de series observadas y regionalizadas para el conjunto de información disponible en España

Respecto a los valores estimados de las medias en el conjunto de estaciones disponible de España, se comprueba que existe un sesgo entre los datos observados y las proyecciones regionalizadas. Las medias de las series registradas son mayores que las de las proyecciones. Además, existe una proyección, la HadCM3-SDSM con diferencias claras respecto a los datos observados y los procedentes de las otras regionalizaciones. Al contrario, CGCM2-FIC es la más cercana a la línea de 45°. La desviación típica vuelve a mostrar que las proyecciones infravaloran el estadístico elaborado con los datos observados. Los coeficientes de asimetría no muestran un patrón claro de error. La masa de puntos revela una alta dispersión y su centro de gravedad parecería indicar que los sesgos de las series observadas son mayores que los de las proyecciones.

Las gráficas de dispersión se elaboran con series regionales. Para ello se han considerado las regiones establecidas para el cálculo de PMX en la España Peninsular en función del coeficiente de variación (Ardiles y Ferrer, 1994; DGC, 1997).



Figura 30. Regiones meteorológicas (Ardiles y Ferrer, 1994)

Regionalmente se aprecia que la bondad de ajuste de unas proyecciones a otras cambia. Respecto a la media, ECHAM-FIC y HadAM3-FIC parecen comportarse mejor en la zona mediterránea, mientras que la CGCM2-FIC da mejores resultados en la atlántica. La HadCM3-SDSM da peores resultados en cualquiera de las regiones consideradas.

Media

Desviación típica

Coefficiente de asimetría

### Media

### Desviación típica

### Coefficiente de asimetría

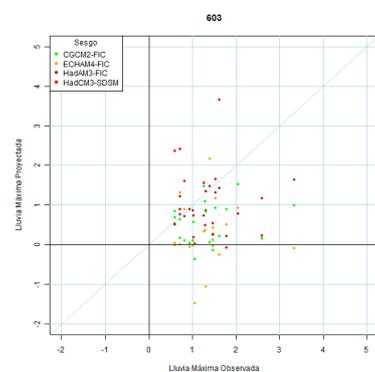
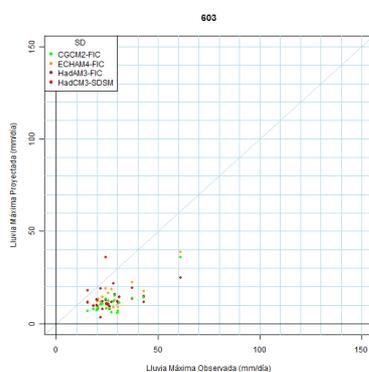
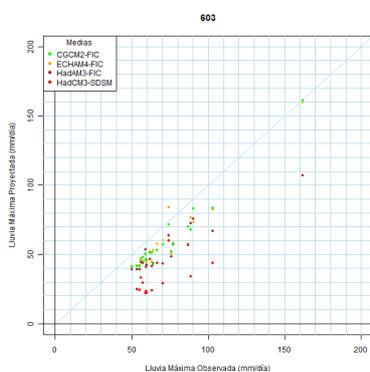
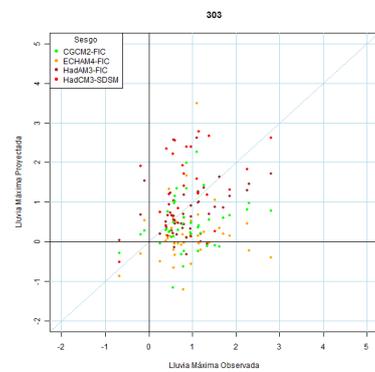
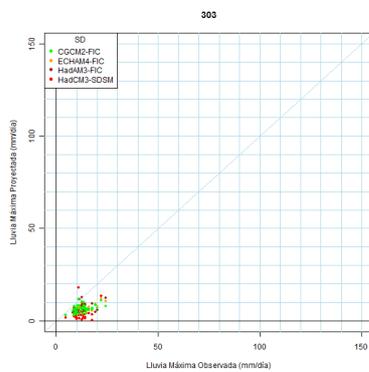
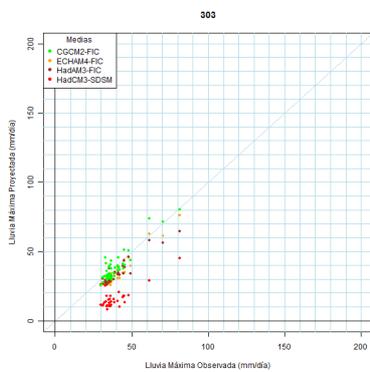
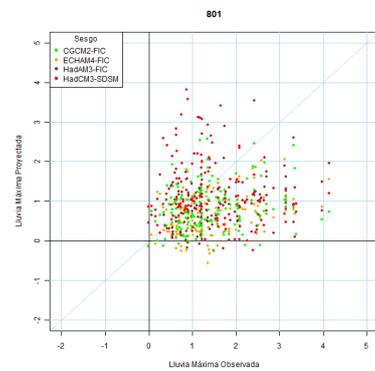
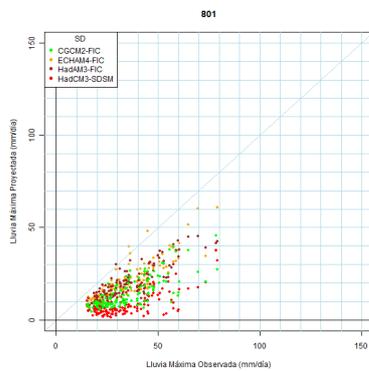
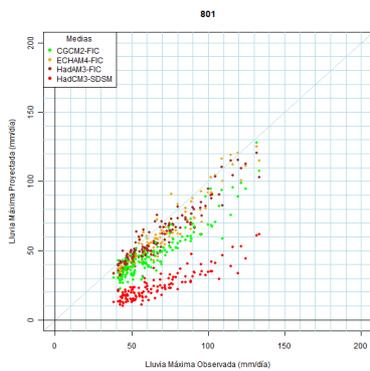
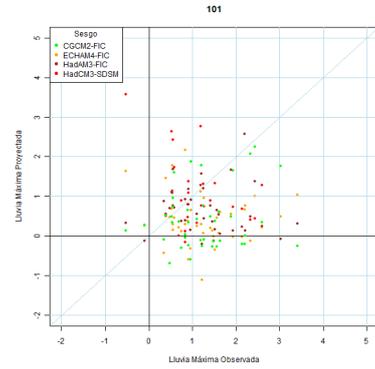
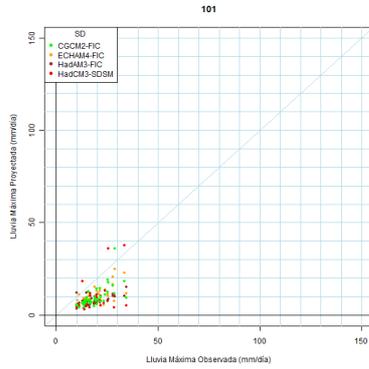
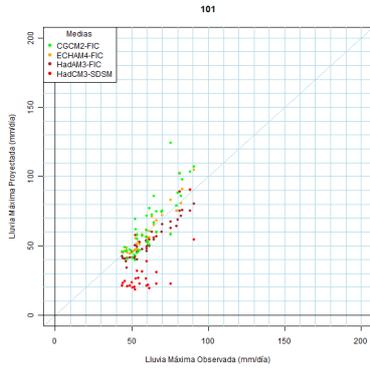
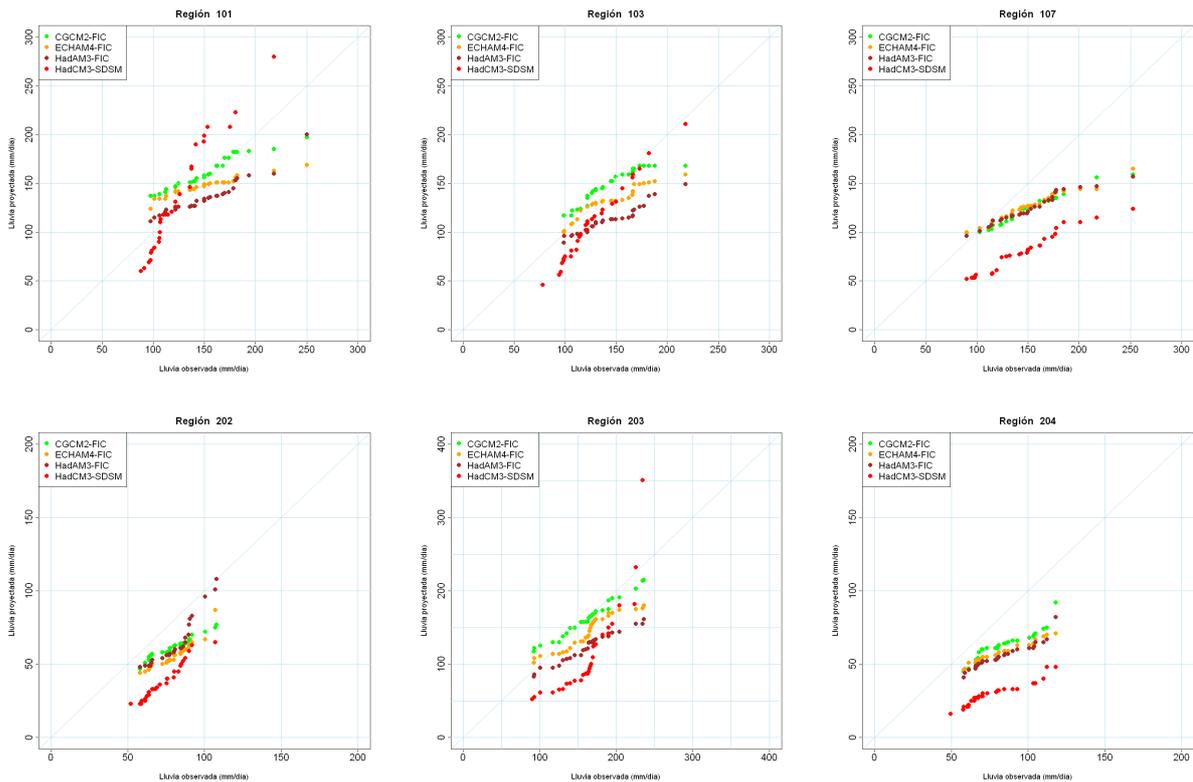
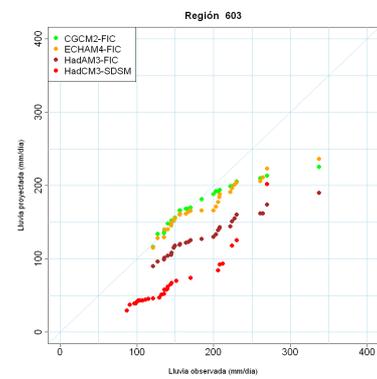
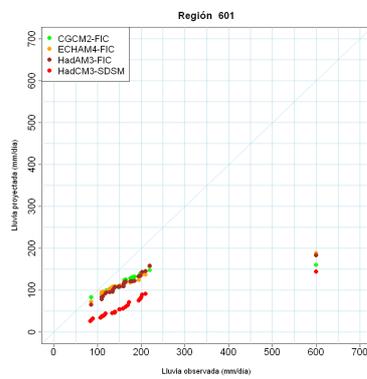
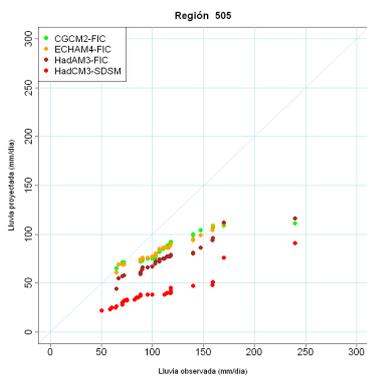
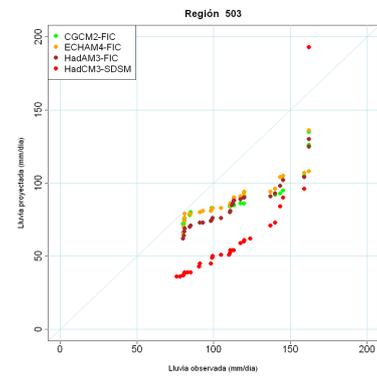
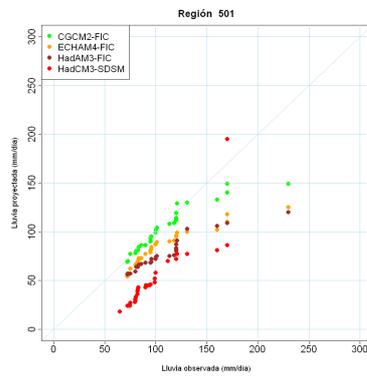
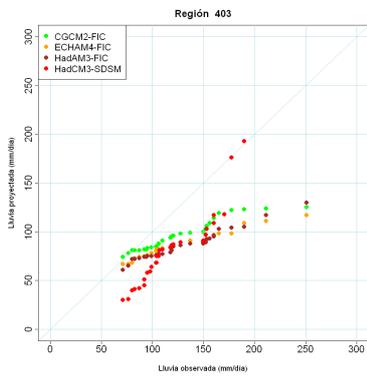
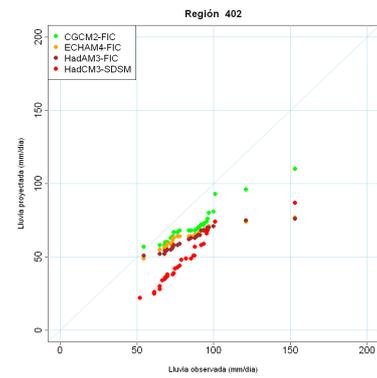
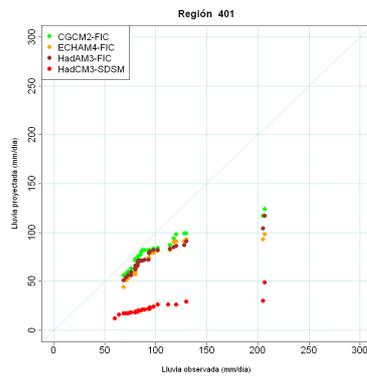
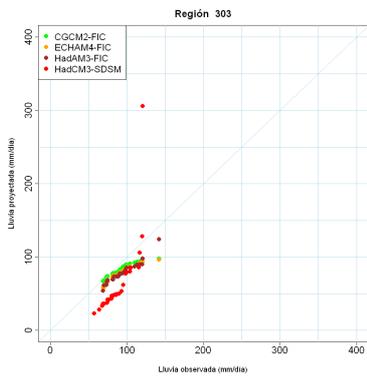
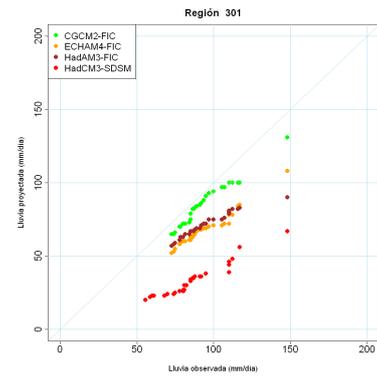
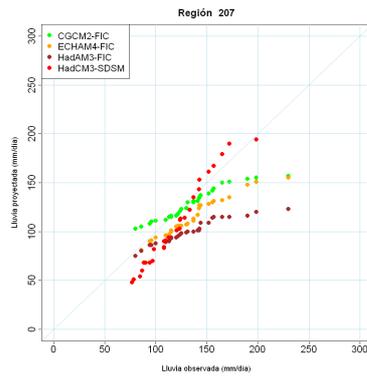
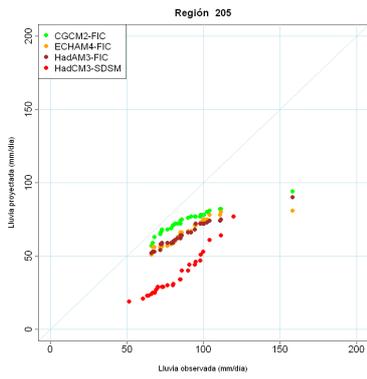


Figura 31. Dispersiones de medias, desviaciones típicas y coeficientes de asimetría de series observadas y proyectadas en las regiones noroccidental atlántica (0101), Levante (0801), centro (0303) y suroeste (0603)

Con carácter general, se concluye que las proyecciones infravaloran los estadísticos observados. Los errores de cada una de las proyecciones varían con la región, lo que entra en conflicto con la hipótesis de equiprobabilidad de cualquiera de las proyecciones. HadCM3-SDSM da sistemáticamente los menores valores medios de PMX en cualquiera de las regiones consideradas y cabría esperar que su utilidad fuera menor a la del resto en el análisis de PMX. Sin embargo, en términos de los otros dos estadísticos, variabilidad y sesgo, esta conclusión no es tan clara y regionalmente pueden alcanzarse máximos con HadCM3-SDSM.

Por último, se han considerado series de valores de PMX absoluta en cada región y periodo con objeto de contrastar las similitudes regionales de las distribuciones de frecuencia de las series observadas y las correspondientes a las proyecciones. La siguiente figura muestra los diagramas QQ del conjunto de regiones consideradas. Estos diagramas destacan las diferencias de localización por las derivas sobre el eje x de los puntos. Con carácter general, para una misma frecuencia, los máximos regionales observados son mayores que los de las proyecciones. Además, en la mayoría de las regiones destaca que la relación de frecuencias no es lineal, indicativo de las diferencias en las distribuciones de frecuencia.





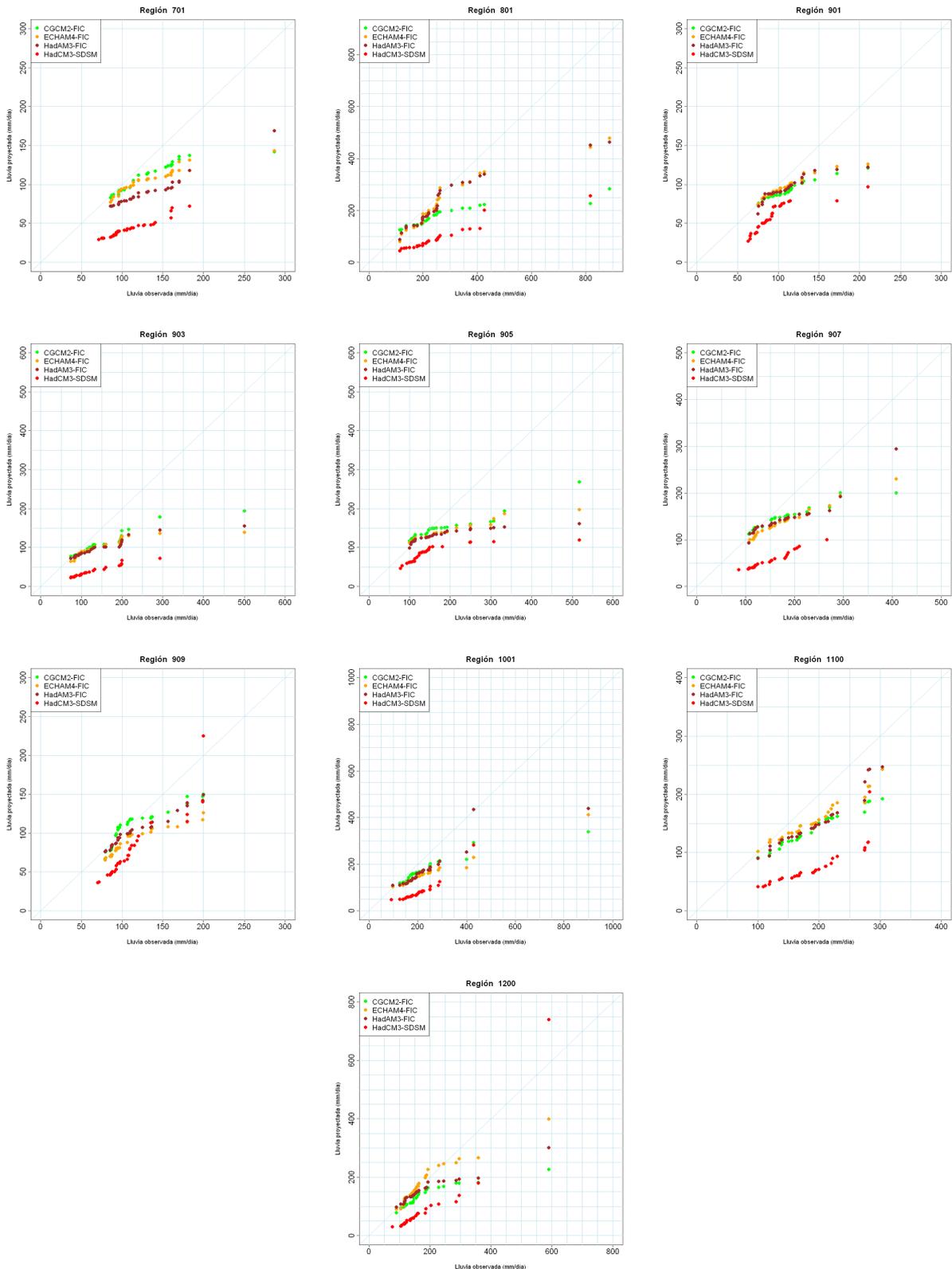
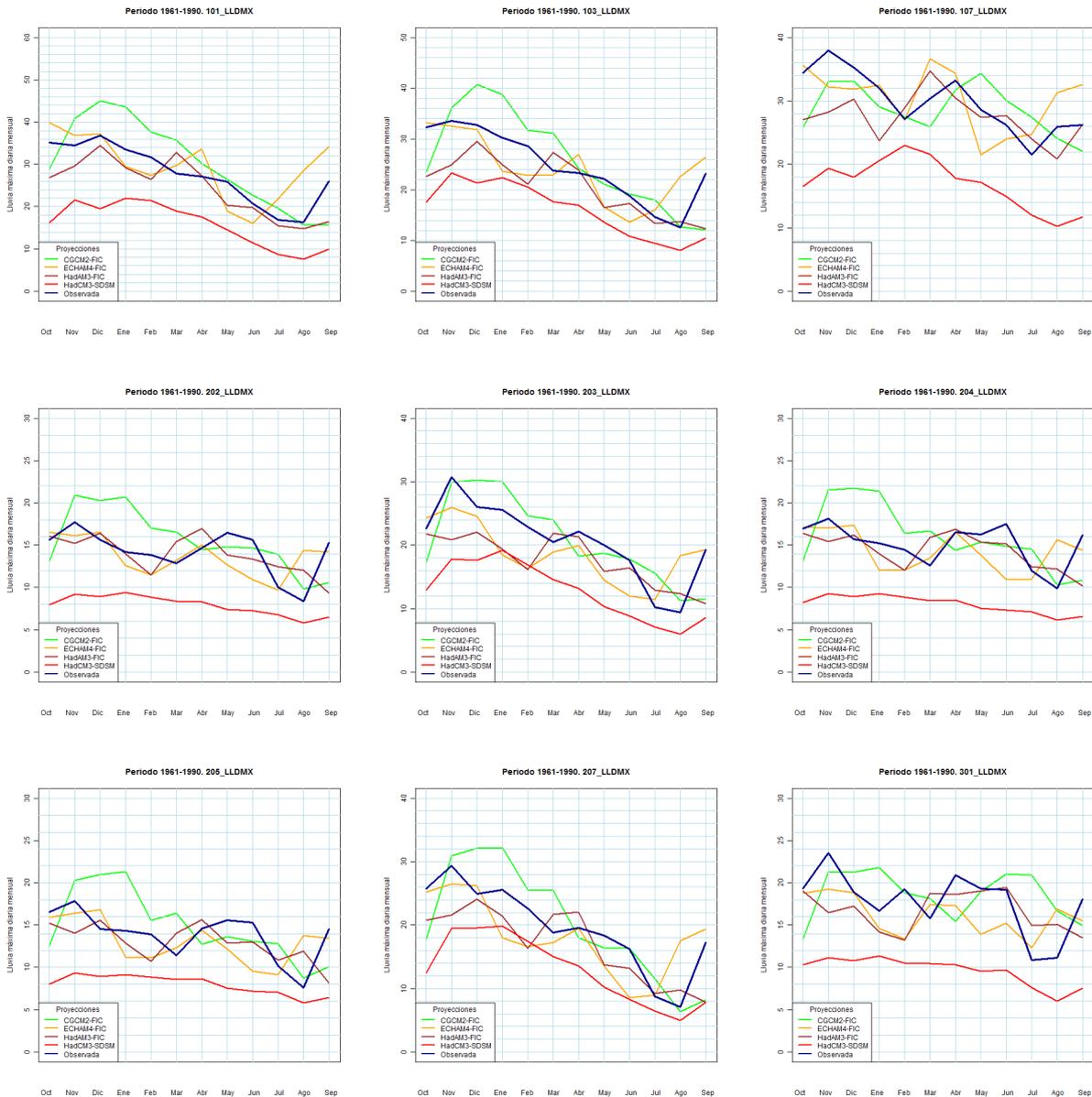


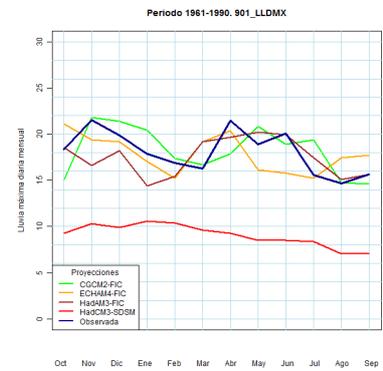
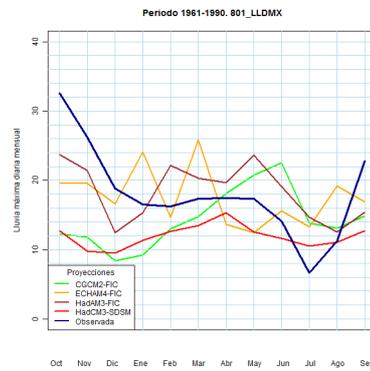
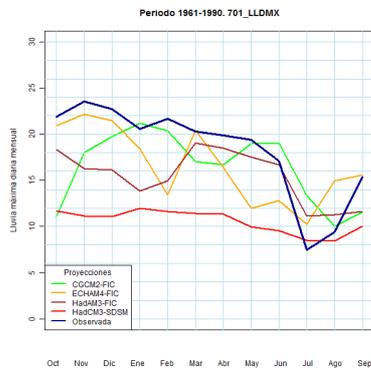
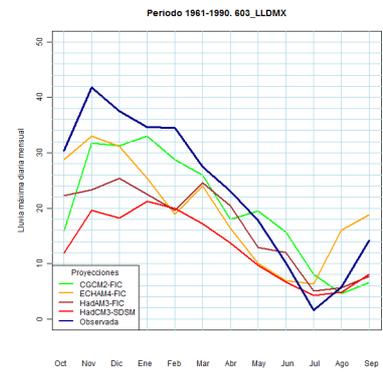
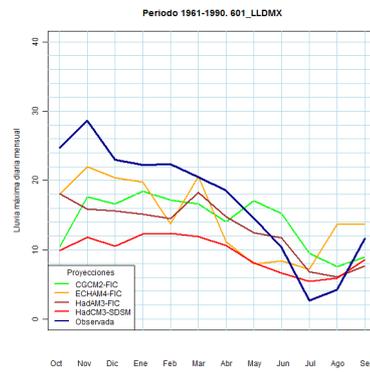
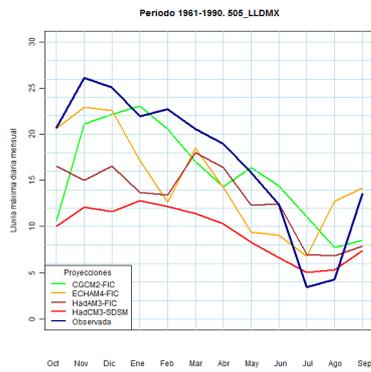
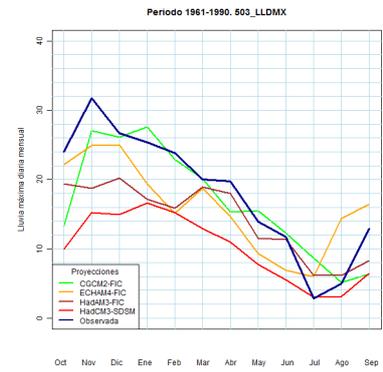
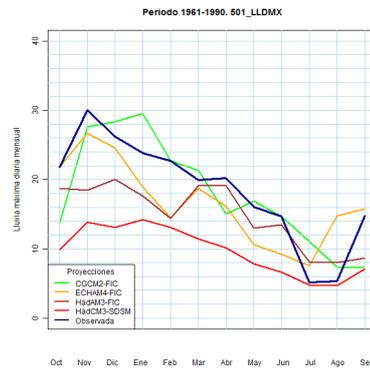
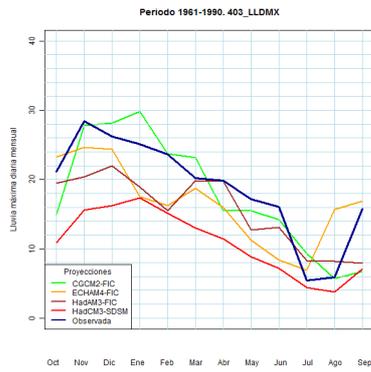
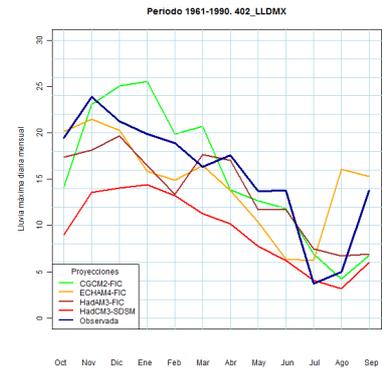
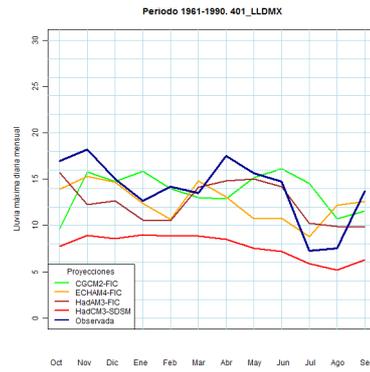
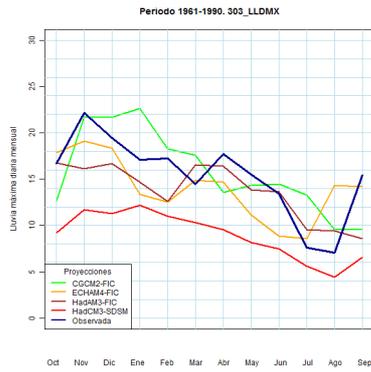
Figura 32 Diagramas QQ de PMX observadas y en proyecciones durante 1961-1990

En definitiva al comparar las características de las series observadas y las proyectadas durante el periodo 1961-1990, se comprueba que las propiedades estadísticas de las series

de PMX de las proyecciones resultan infravaloradas y que sus distribuciones de frecuencia son distintas de las procedentes de las series observadas.

La siguiente figura muestra la evolución estacional comparada de PMX observadas y proyecciones en cada región durante el periodo 1961-1990. La característica común a todas las regiones es el sesgo de la HadCM3-SDSM, proyección que da valores de medias de PMX siempre inferiores a las del resto de proyecciones. Las proyecciones FIC sí dan evoluciones en un orden de magnitud similar a las de las observadas, al menos en la mitad norte peninsular y fachada atlántica. No obstante, en la fachada atlántica las PRE observadas son mayores en primavera. Además, desde la cabecera del Guadalquivir, el sur de la Península, Mediterráneo, Baleares y Canarias se comprueba que el ciclo estacional observado se caracteriza por picos de PRE en otoño que no alcanzan las series proyectadas.





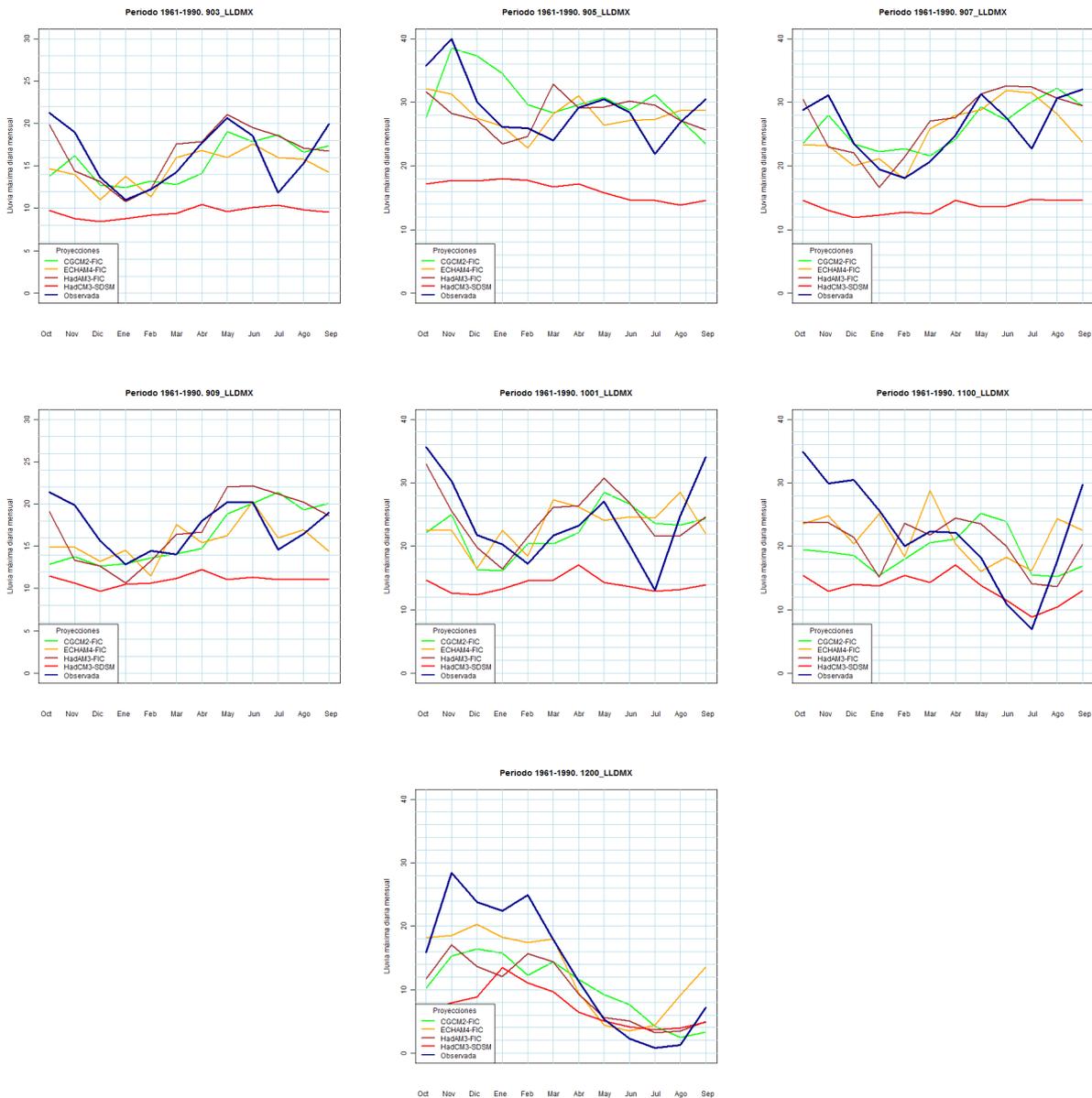
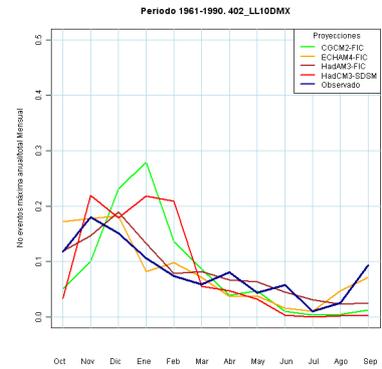
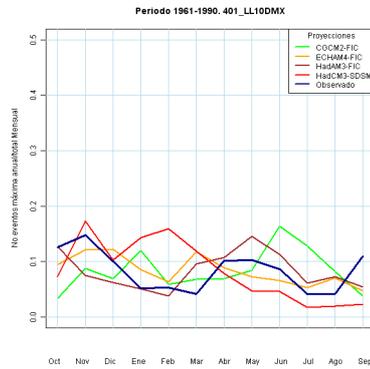
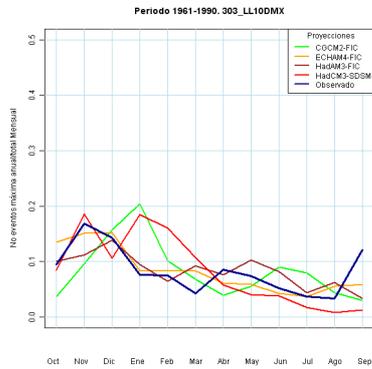
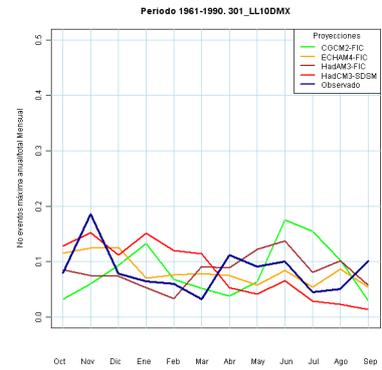
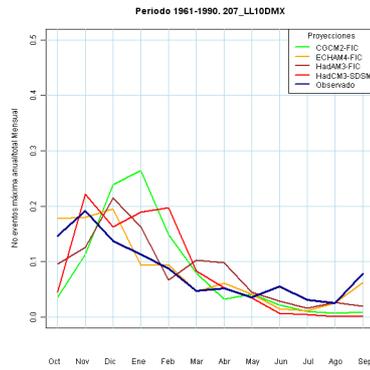
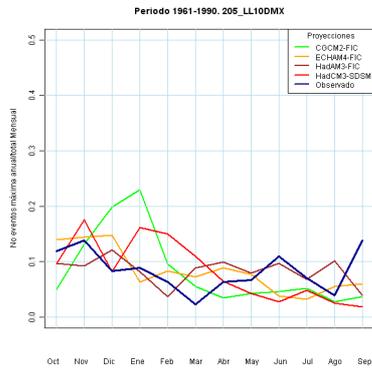
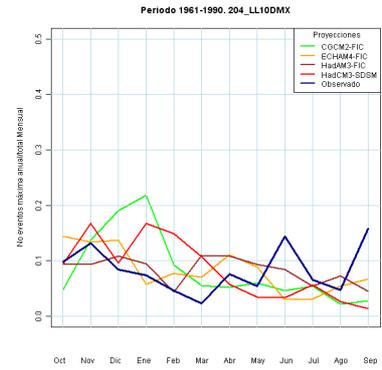
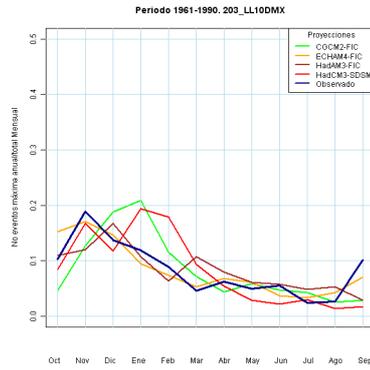
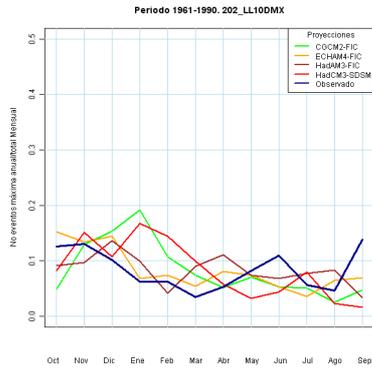
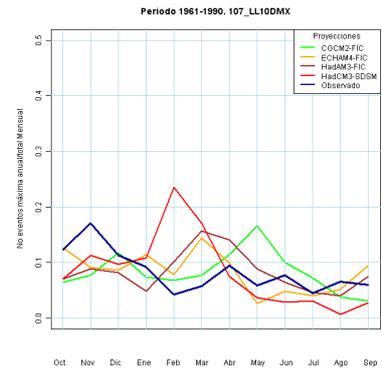
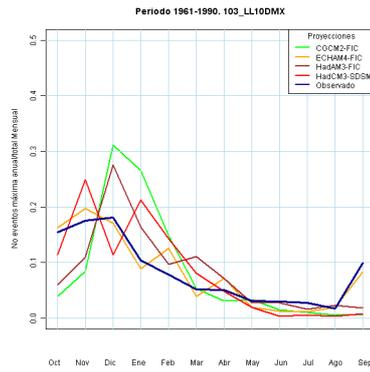
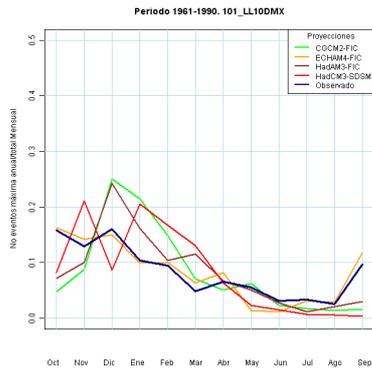
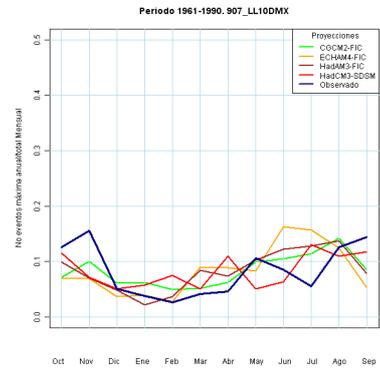
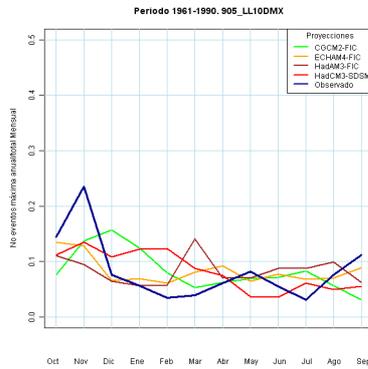
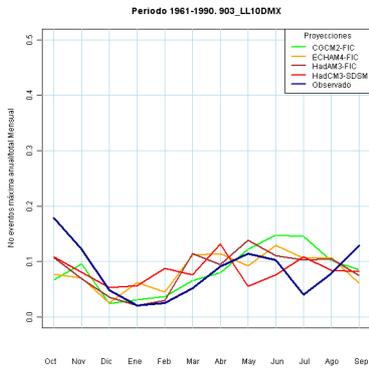
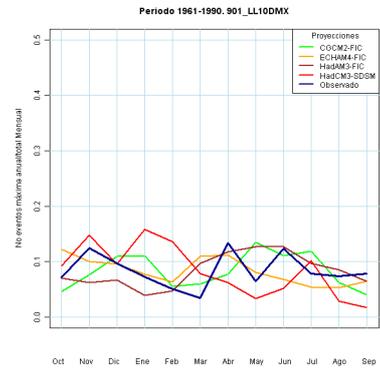
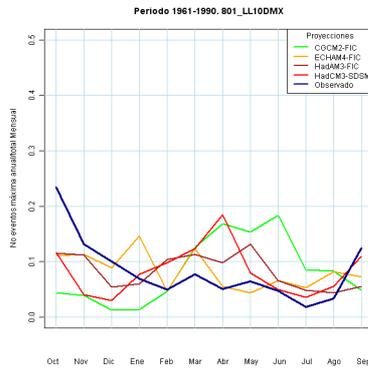
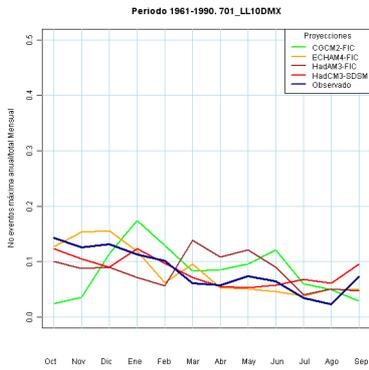
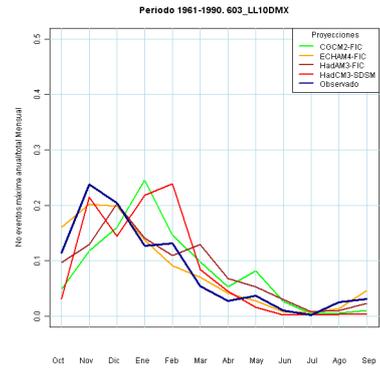
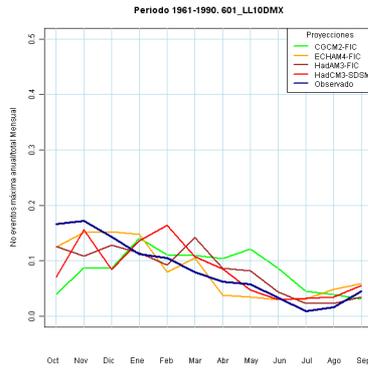
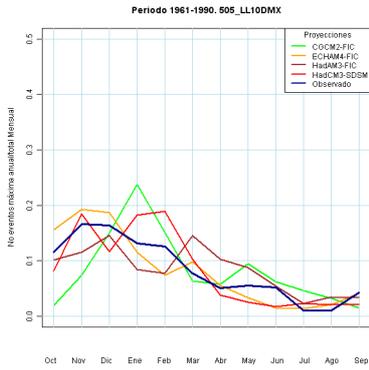
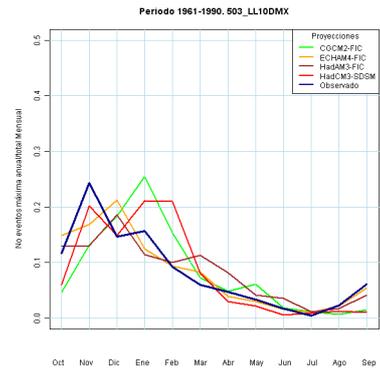
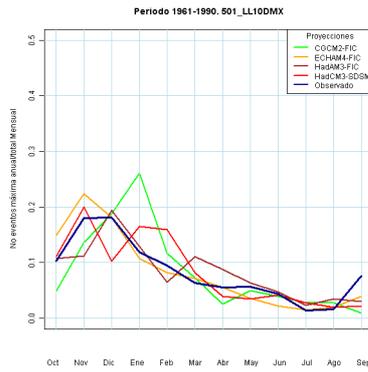
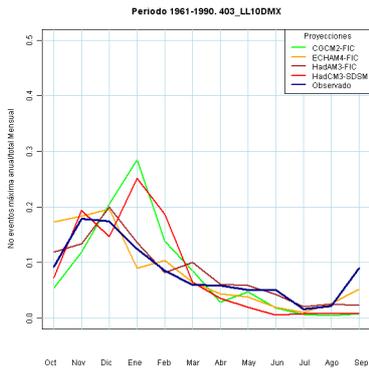


Figura 33. Ciclos estacionales de PMX observados y proyectados. Periodo 1961-1990

Otro indicador estacional de PMX es el número de veces que en cada mes se ha registrado el evento máximo anual. Este índice se ha obtenido de los datos observados y de cada una de las proyecciones para el periodo de control (1961-90). El índice se estandariza considerando el número de estaciones y de años de cada periodo. Se observa que en la mayoría de las regiones hay un apreciable cambio en la concentración estacional de máximos.





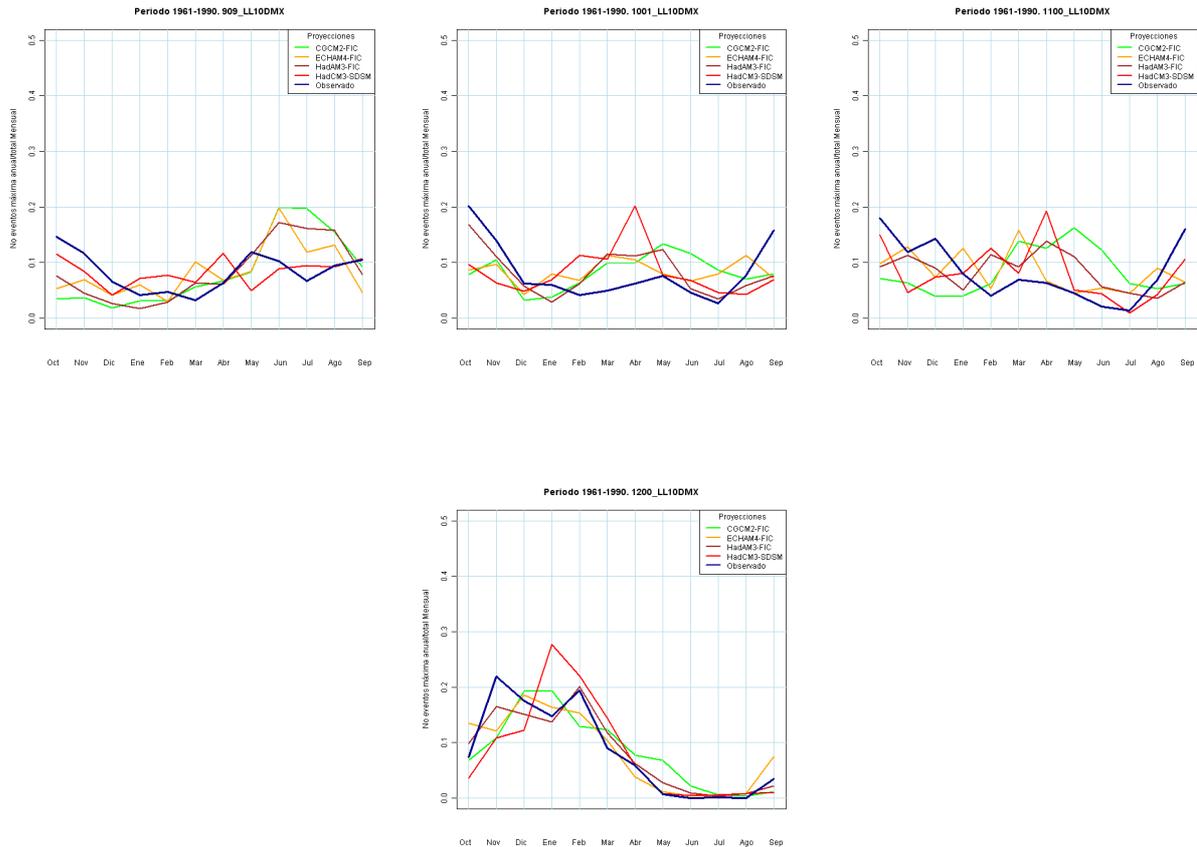


Figura 34. Ciclos estacionales de PMX observados y proyectados. Periodo 1961-1990

## 4.2 Análisis de tendencia de las proyecciones en el siglo XXI

En los siguientes apartados se exponen las características de los cambios en las series regionalizadas FIC y SDSM de PRE y TEM. Los estadísticos de referencia se toman del periodo de control 1961-1990 de cada proyección y se valora el cambio durante el s. XXI. Vuelve a hacerse uso de estadísticos y test de contrastes de hipótesis para valorar la fiabilidad de los cambios de media, variabilidad o tendencia. La consideración de los datos de todas las estaciones (5.579 de PRE en las proyecciones FIC y 2.320 en las SDSM; 1.854 de TEM en proyecciones FIC y 369 en las SDSM) hace que los estadísticos varíen respecto a los obtenidos en el apartado de contraste en el que se manejaban un menor número de estaciones.

La siguiente gráfica se ha elaborado con los datos de PRE de las proyecciones de cada conjunto de estaciones. Con objeto de ofrecer una primera imagen del cambio, se ha añadido a su vez la media de las proyecciones en los escenarios de emisiones A2 y B2 para representar la evolución en esos escenarios. Se comprueba que las PRE en A2 son inferiores a las del B2 en el último periodo del siglo XXI. Las diferencias no son importantes en los otros dos periodos, 2011-2040 y 2041-2070. La misma gráfica, pero respecto a las TEM se muestra a continuación. Destaca el gradiente ascendente que dan las proyecciones. En promedio, suponen ascensos de varios °C a finales del s. XXI.

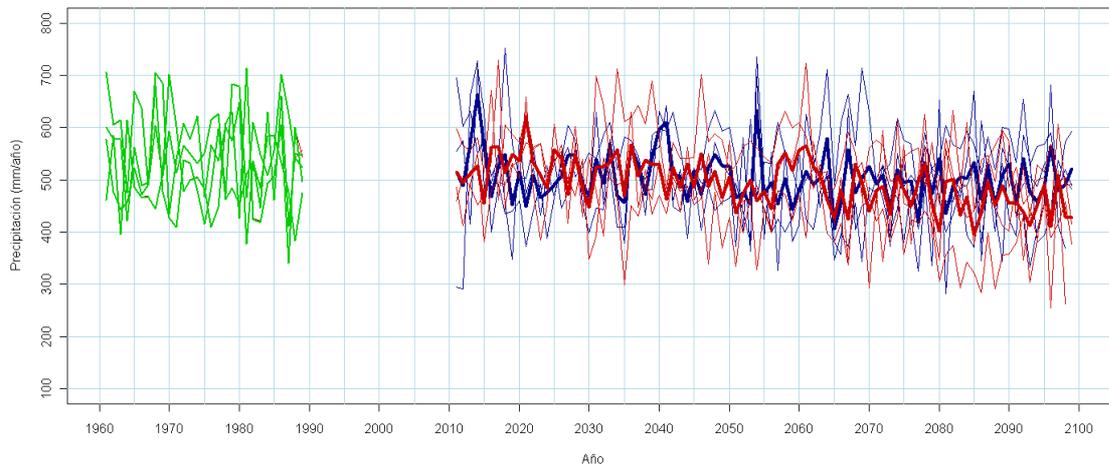


Figura 35. Series de PRE anual (mm) en España. Periodo de control (verde). Escenario de emisiones A2 (rojo) y B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

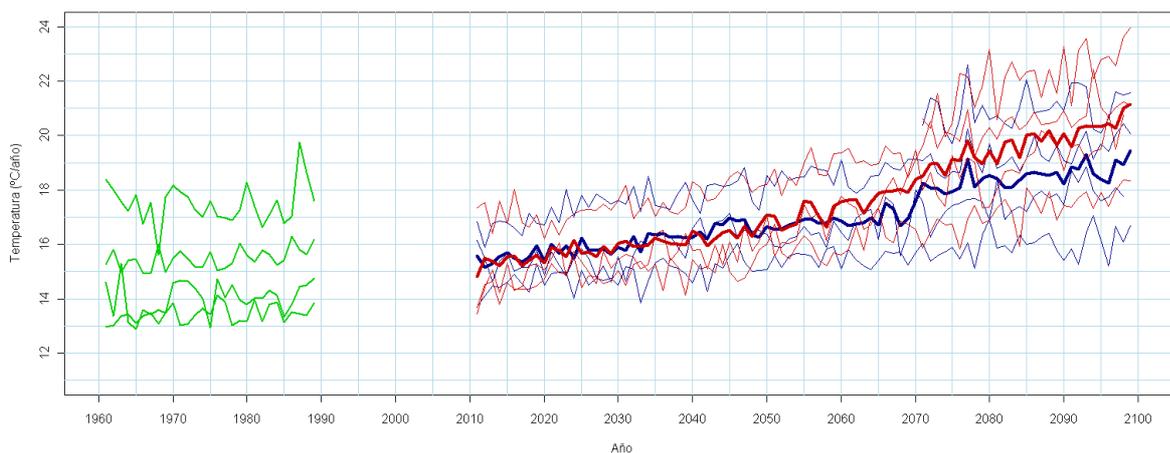


Figura 36. Series de TEM anual (°C) en España. Periodo de control (verde). Escenario de emisiones A2 (rojo) y B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

## 4.2.1 Precipitación

### 4.2.1.1 Tendencia global

En la gráfica siguiente se representan las series anuales de PRE observadas y proyectadas en las estaciones comunes durante el periodo 1961-1990 y 2011-2100 y en cada una de las proyecciones. Se incluye una tabla de las pendientes en mm/año y los p-valores de aplicar el test de Mann Kendall a las series promediadas con 5.579 estaciones en el caso de las proyecciones FIC y con 2.320 estaciones a las series SDSM.

El conjunto de las proyecciones con 90 años de datos del escenario A2 marca una tendencia decreciente para el s. XXI, significativa según los resultados de la aplicación del test de Mann Kendall. Este decrecimiento se ve acentuado por la disminución en media de PRE del último periodo del s. XXI. HadAM3-FIC solamente cuenta con datos desde 2070 y su tendencia es, en cambio estacionaria. Con treinta años, las pendientes y los p-valores obtenidos no son comparables a los del resto de proyecciones con 90 años de datos.

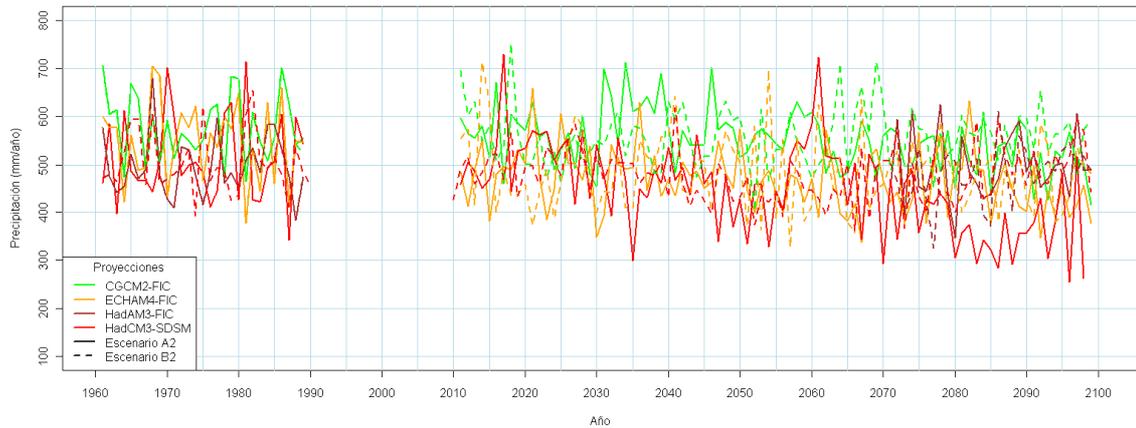


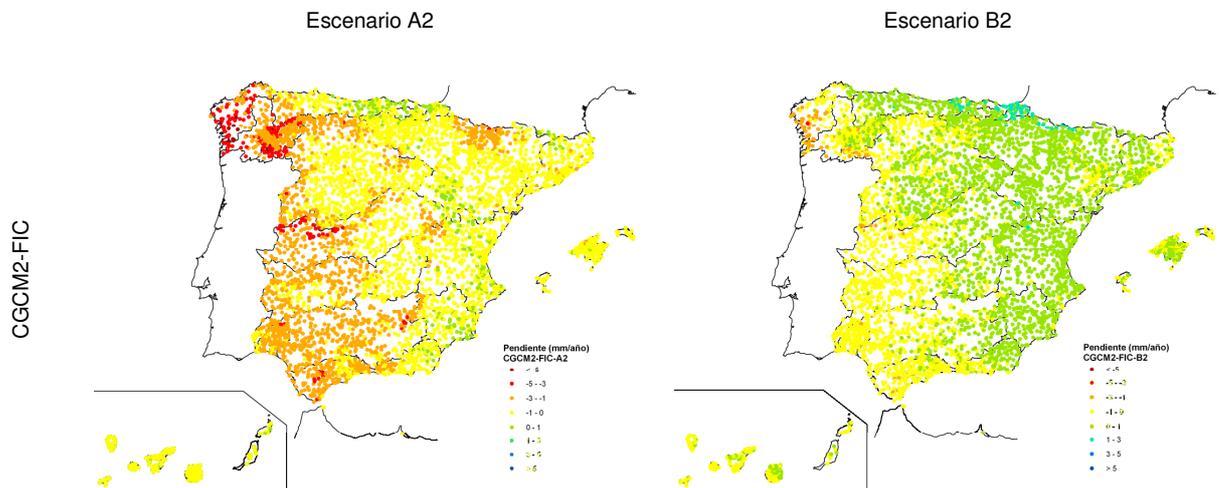
Figura 37. Series de PRE anual (mm) en España promediada con datos en estaciones

A2	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	Media
Pendiente (mm/año)	-0,94	-0,70	0,50	-1,99	-0,88
p-valor	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00

B2	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	Media
Pendiente (mm/año)	0,06	-0,35	2,39	-0,10	-0,18
p-valor	0,52	0,42	0,10	0,51	0,76

Tabla 10. Tendencias (mm/año y p-valor) de las series de PRE en España promediada

Todas las pendientes del escenario B2 son superiores a las correspondientes al A2 y, aunque oscilan entre valores positivos y negativos, dejan de ser estadísticamente significativas. Las tendencias (mm/año) de cada serie se muestran en los siguientes mapas.



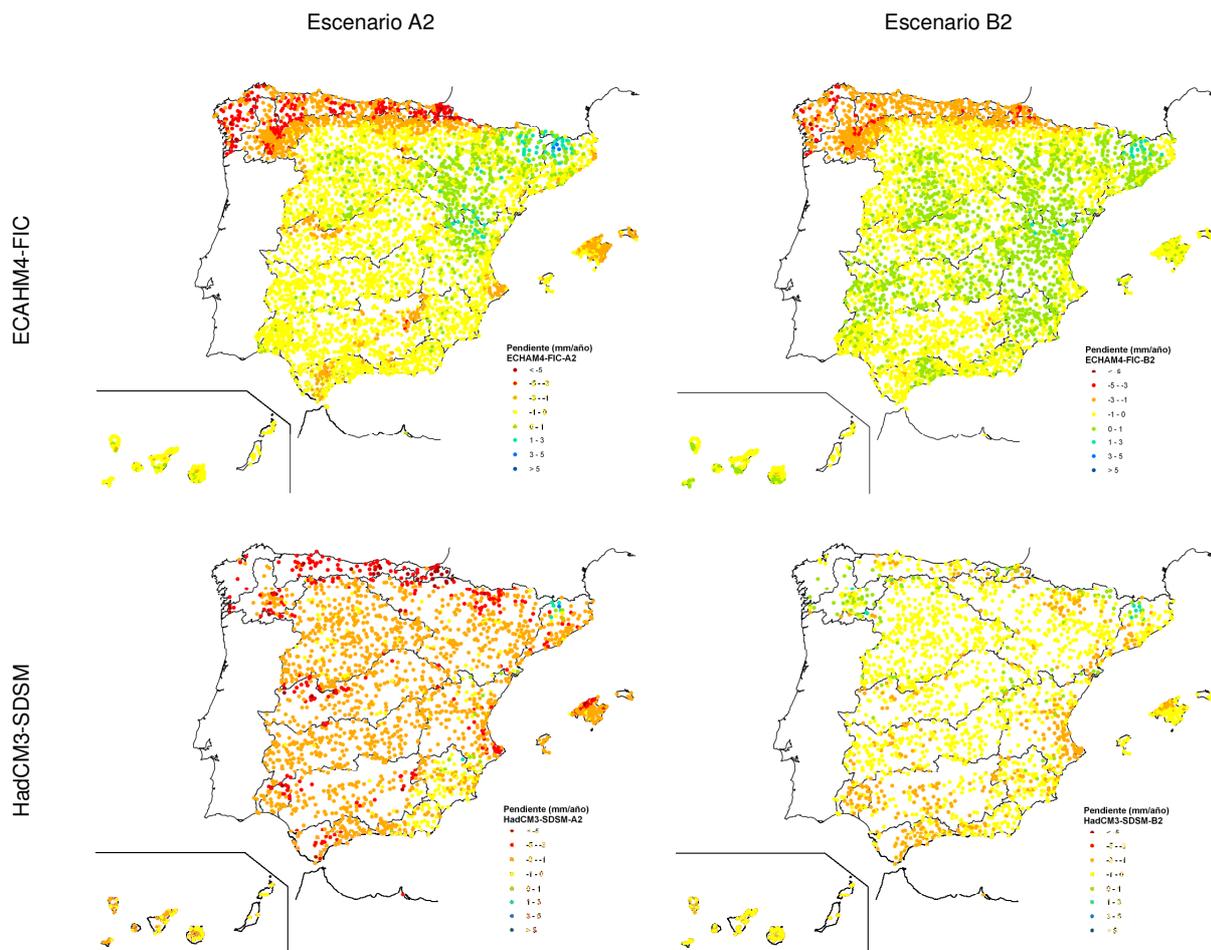


Figura 38. Tendencias (mm/año) de las series PRE en España

Predominan las tendencias decrecientes, siendo más acusadas en el norte y en el escenario A2. Se han representado mapas correspondientes a proyecciones con 90 años de PRE durante el s. XXI. Desde el punto de vista de la reducción de los recursos, HadCM3-SDSM-A2 es la proyección pésima, tal como ya aparecía en la serie promediada de España. Los siguientes mapas representan resultados de la aplicación del test de Mann Kendall a series proyectadas en estaciones. Hay diferencias entre los patrones de cambio de cada proyección, pero en cualquiera de los tres casos las proyecciones del escenario B2 son más optimistas respecto al resultado del escenario A2.

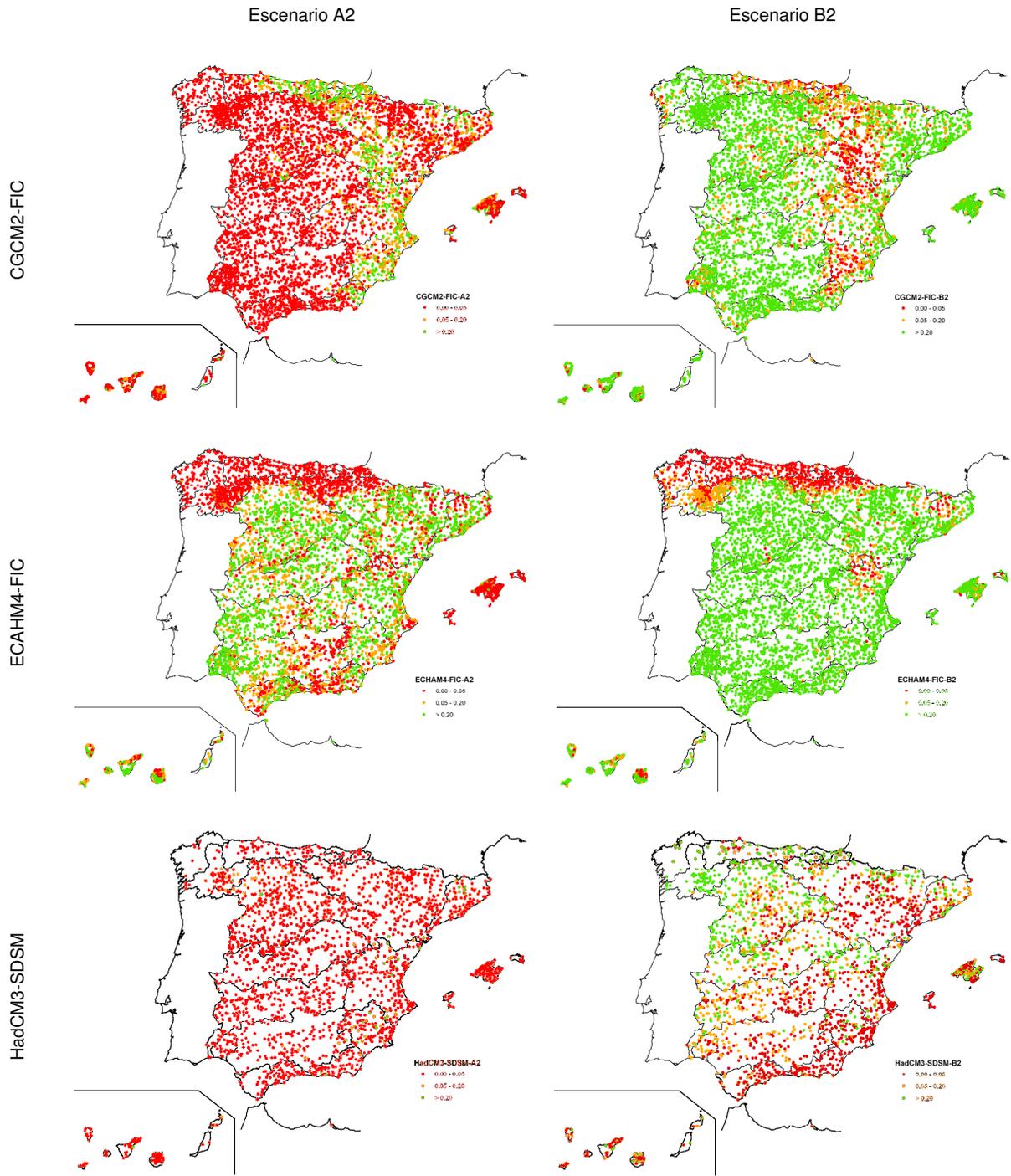


Figura 39. Test de Mann Kendall: p-valor de las series PRE en España

#### 4.2.1.2 Consideración de los periodos de treinta años

La intensidad del descenso de PRE no aparece homogénea en las proyecciones que abarcan el s. XXI. La siguiente imagen muestra las series promediadas con los datos disponibles en España para los escenarios A2 y B2. Se les superpone una serie media móvil de 11 años de paso para destacar la evolución plurianual. CGCM2-FIC-A2 muestra un ciclo de ascenso de PRE en la década de los años 30 del s. XXI para posteriormente marcar una tendencia suave decreciente hasta final de siglo. CGCM2-FIC-B2 mantiene, sin embargo, un carácter más estable. La tendencia también es suavemente decreciente en ECHAM4-FIC, escenarios A2 y B2, durante todo el s. XXI. HadCM3-SDSM marca las tendencias decrecientes más pronunciadas, especialmente a partir del último tercio del s. XXI, momento a partir del cual las diferencias entre los escenarios A2 y B2 son más notables.

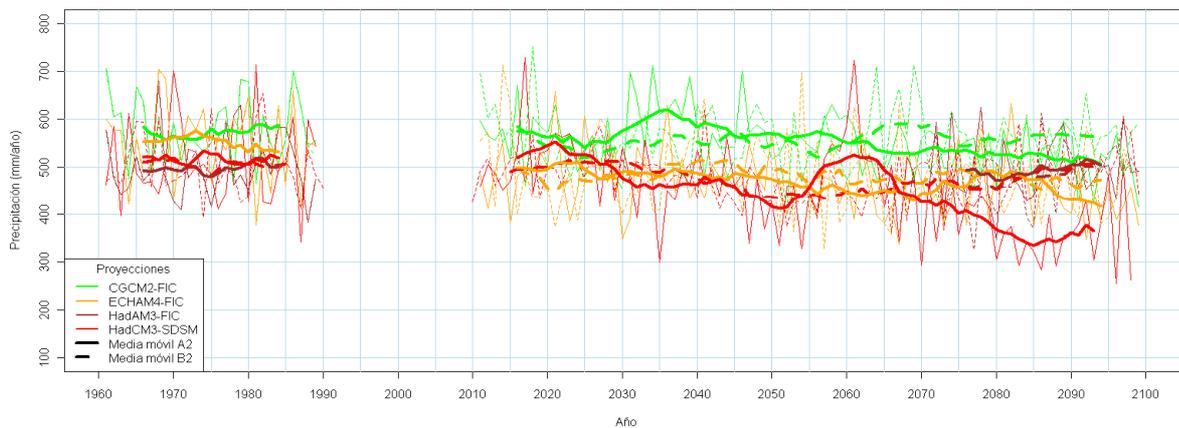


Figura 40. Medias móviles de PRE (mm) en España promediada con datos en estaciones

En el presente apartado se describen cambios detectados en las series utilizando 3 periodos de 30 años que abarcan los 90 comprendidos entre 2011 y 2100. La siguiente tabla resume los estadísticos de las estaciones disponibles en cada proyección por periodo y proyección. La desviación típica que aparece en la tabla es promedio de las desviaciones típicas de las estaciones disponibles.

		1961-1990	2011-2040		2041-2070		2071-2100		2011-2100	
			A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
CGCM2-FIC	Media	579	581	556	555	567	521	560	552	560
ECHAM4-FIC		549	490	492	463	486	451	477	468	485
HadAM3-FIC		498	-	-	-	-	496	481	-	-
HadCM3-SDSM		513	500	501	469	465	373	463	449	475
CGCM2-FIC	Desviación típica	102	100	97	85	103	89	82	96	95
ECHAM4-FIC		124	111	113	91	124	99	102	104	114
HadAM3-FIC		97					102	95		
HadCM3-SDSM		120	109	125	115	108	97	122	120	120

Tabla 11. Estadísticos de PRE en España con datos en estaciones. Escenarios A2 y B2

Los siguientes mapas muestran los p-valores obtenidos de la aplicación del test de Wilcoxon a las series proyectadas. El test aplicado es unilateral sobre reducciones significativas de PRE.

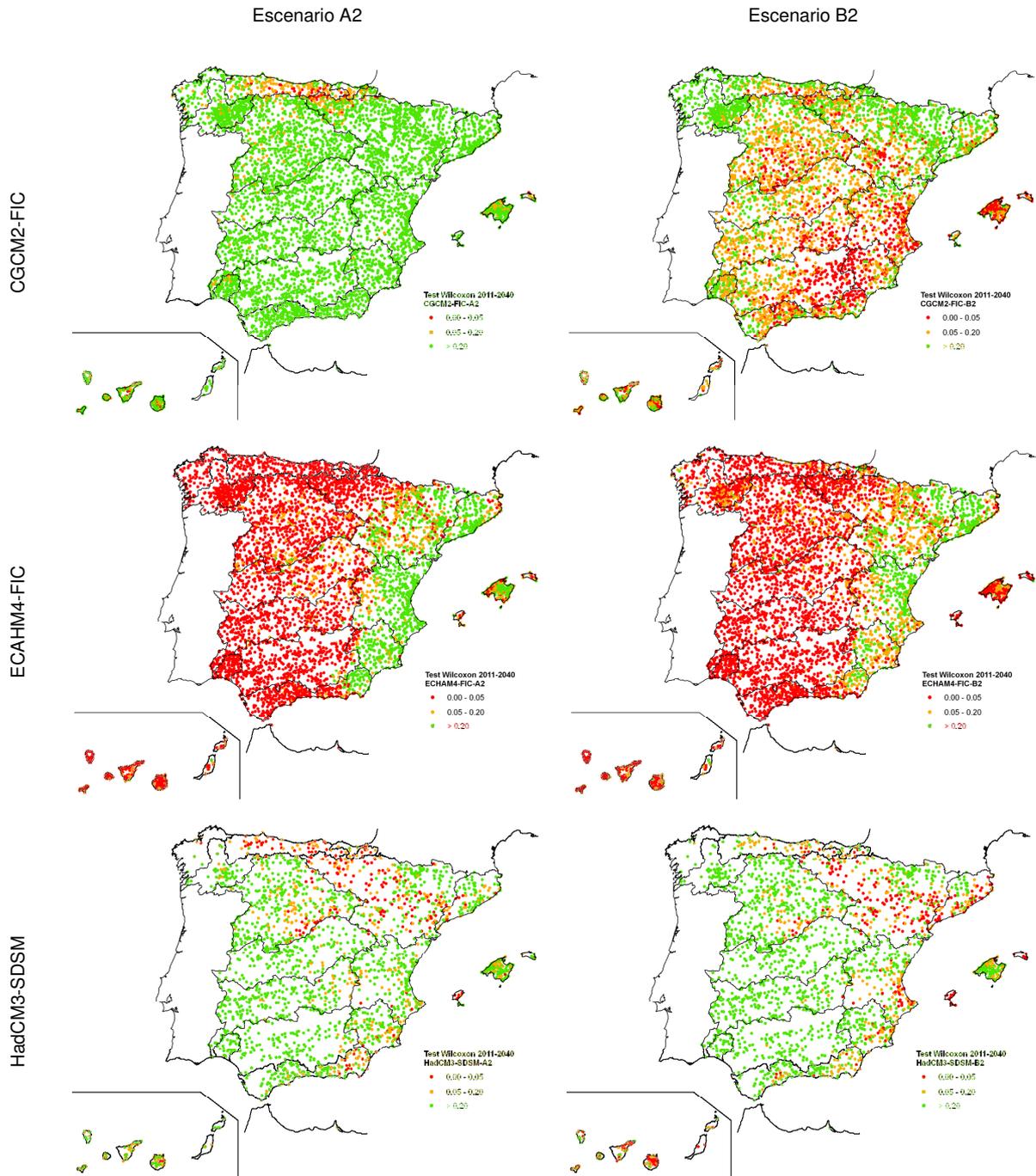


Figura 41. Test Wilcoxon: p-valor de PRE en España en estaciones 2011-2040

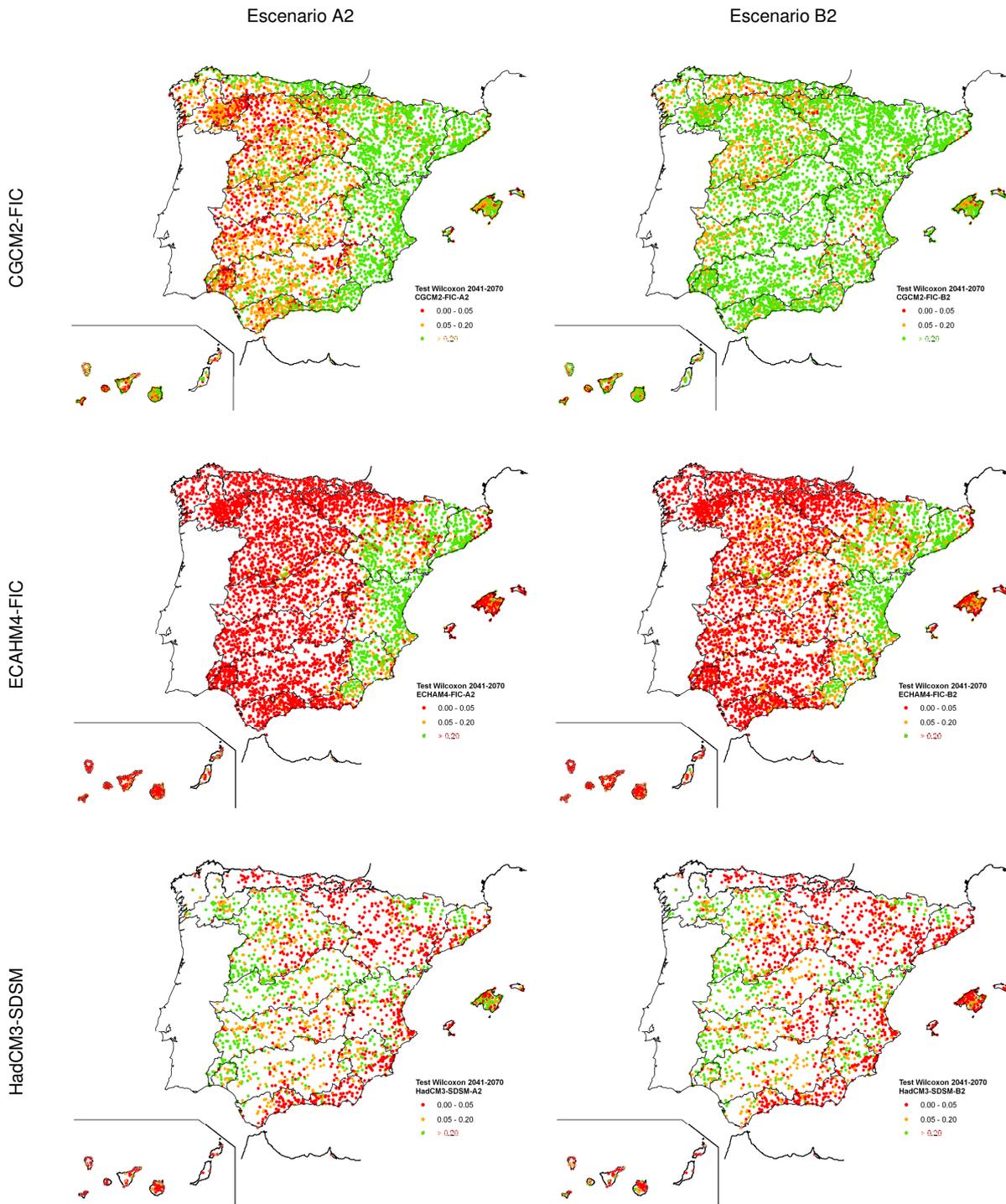
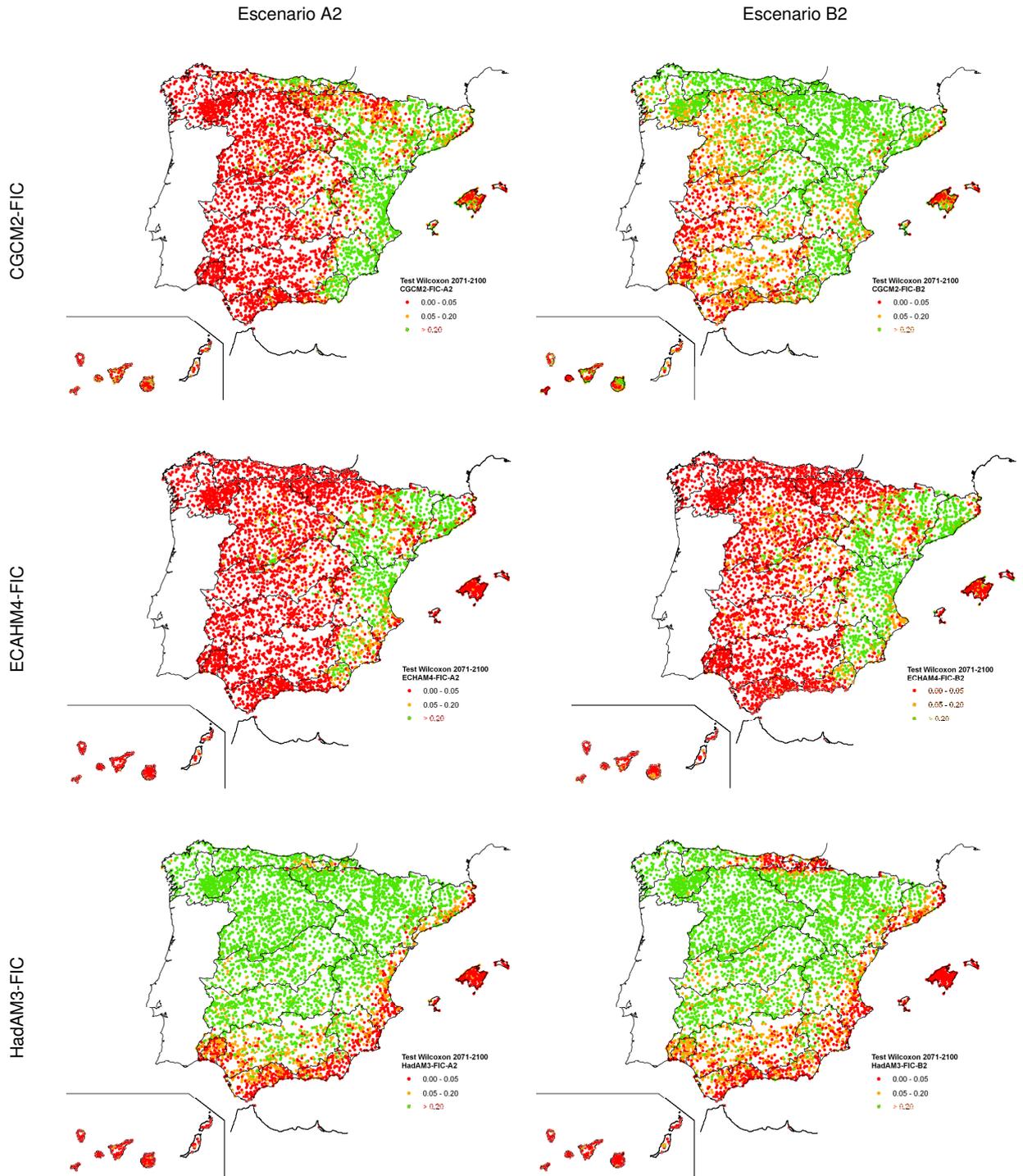


Figura 42 Test Wilcoxon: p-valor de PRE en España en estaciones 2041-2070



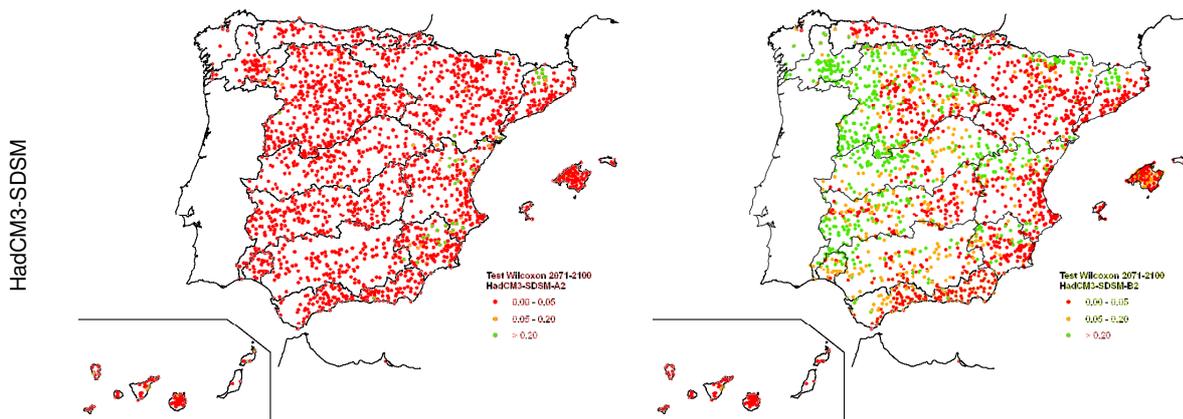
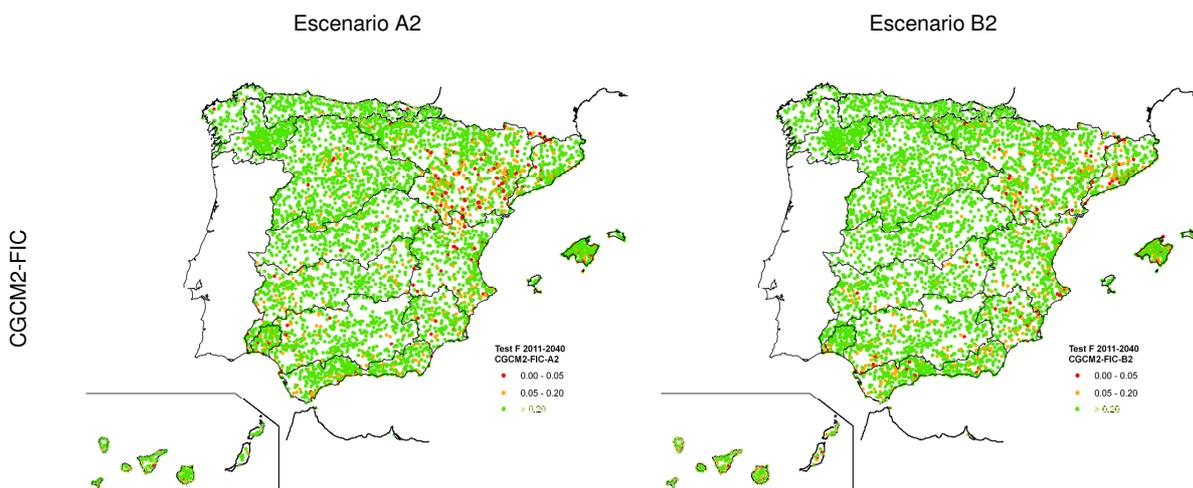


Figura 43. Test Wilcoxon: p-valor de PRE en España en estaciones 2071-2100

Las figuras anteriores muestran la diversidad regional de los impactos. Los modelos CGCM2 y ECHAM4 destacan descensos de PRE sobre la fachada atlántica, mientras que la proyección derivada del HadAM3 distingue entre costa e interior, con mayores descensos en la primera. Las proyecciones HadCM3-SDSM dan descensos significativos en la fachada mediterránea, cuenca del Ebro y noreste peninsular.

Un segundo parámetro característico en las series hidrológicas es la variabilidad. Los siguientes mapas ofrecen una perspectiva regional del cambio significativo en variabilidad en función del p-valor alcanzado al aplicar el test de la F de Snedecor. El contraste de varianzas destaca cambios en la fachada atlántica y archipiélagos, principalmente CGCM2 y ECHAM4, para algunos periodos. Aparentemente, el 2º periodo del s. XXI supone un mínimo en la varianza de CGCM2-FIC y ECHAM4-FIC, mientras que HadCM3-SDSM alcanza el mínimo durante el último periodo. En general, las proyecciones en el escenario B2 tienen carácter estacionario respecto al periodo de control, con menor señal de impacto a lo largo del s. XXI, al menos hasta el último periodo del s. XXI.



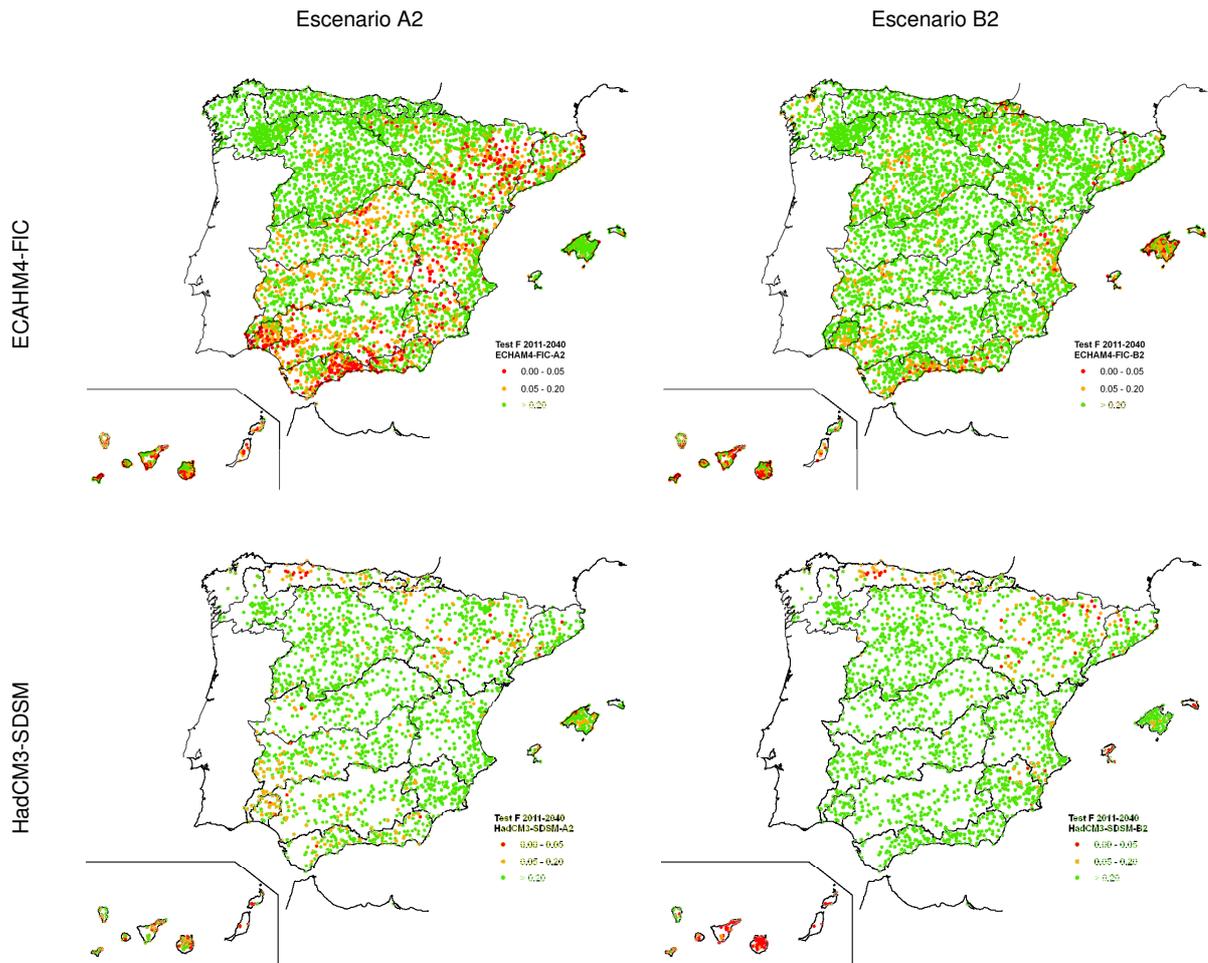
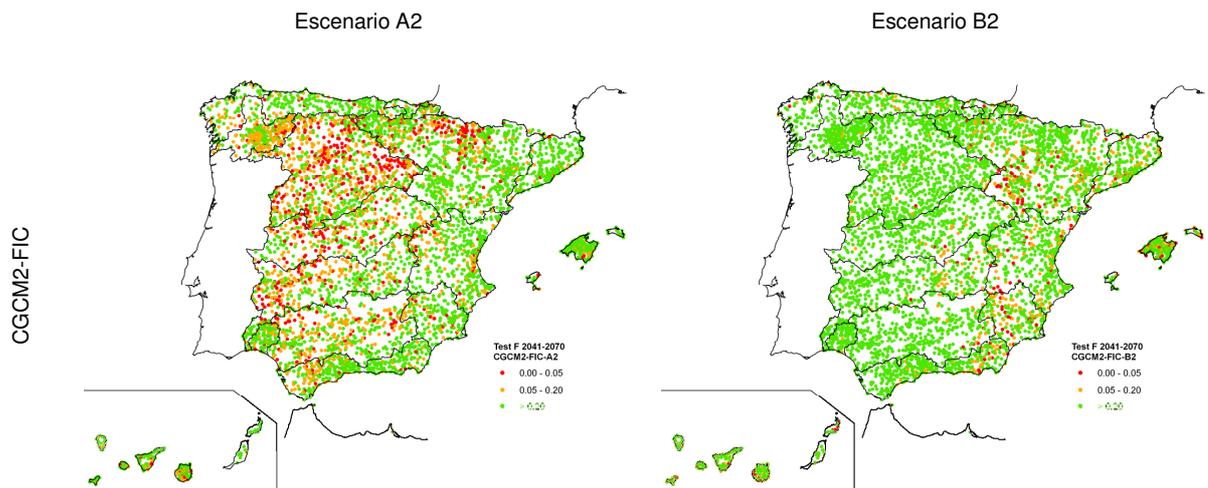


Figura 44. Test F-Snedecor: p-valor de PRE en España en estaciones 2011-2040



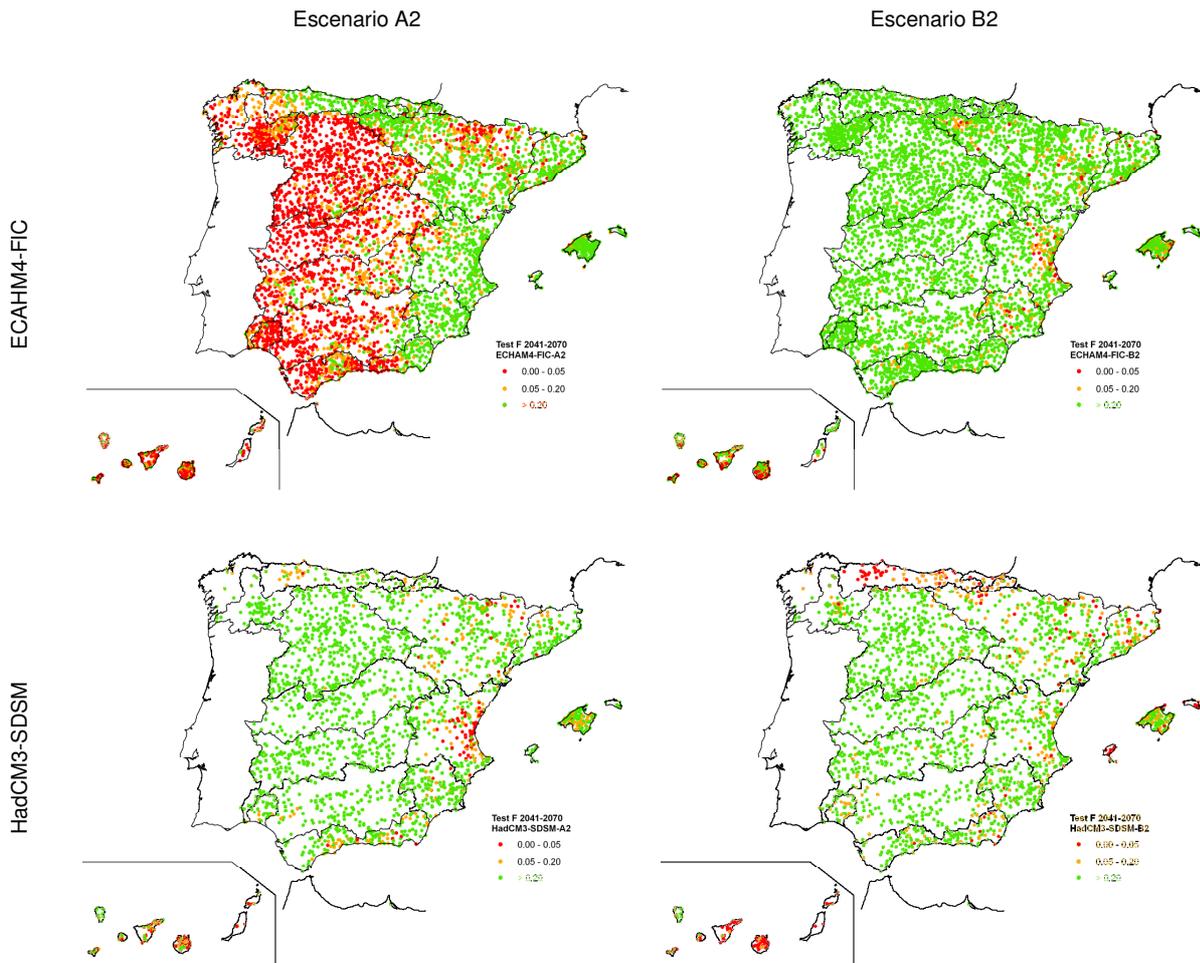
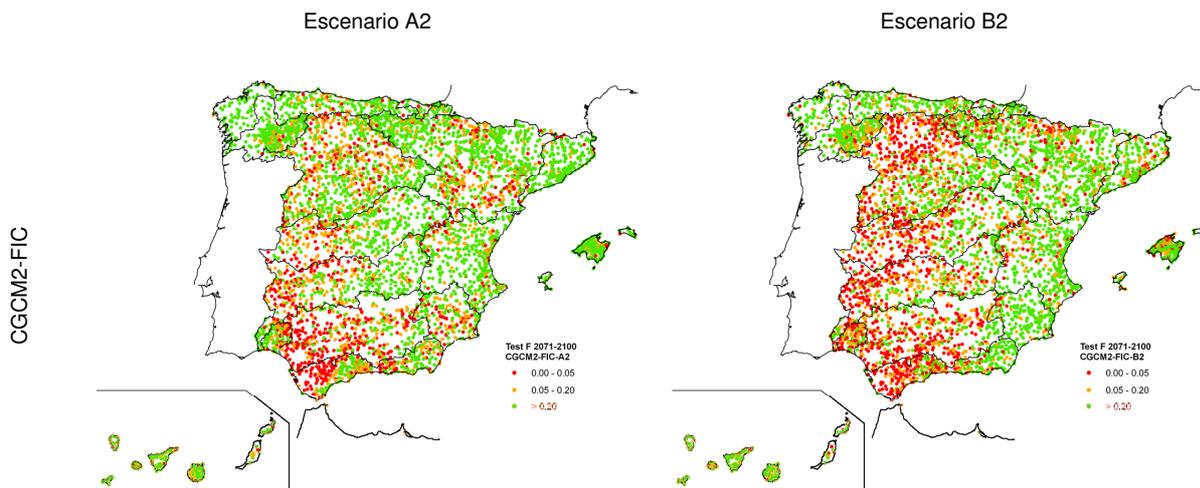


Figura 45. Test F-Snedecor: p-valor de PRE en España en estaciones 2041-2070



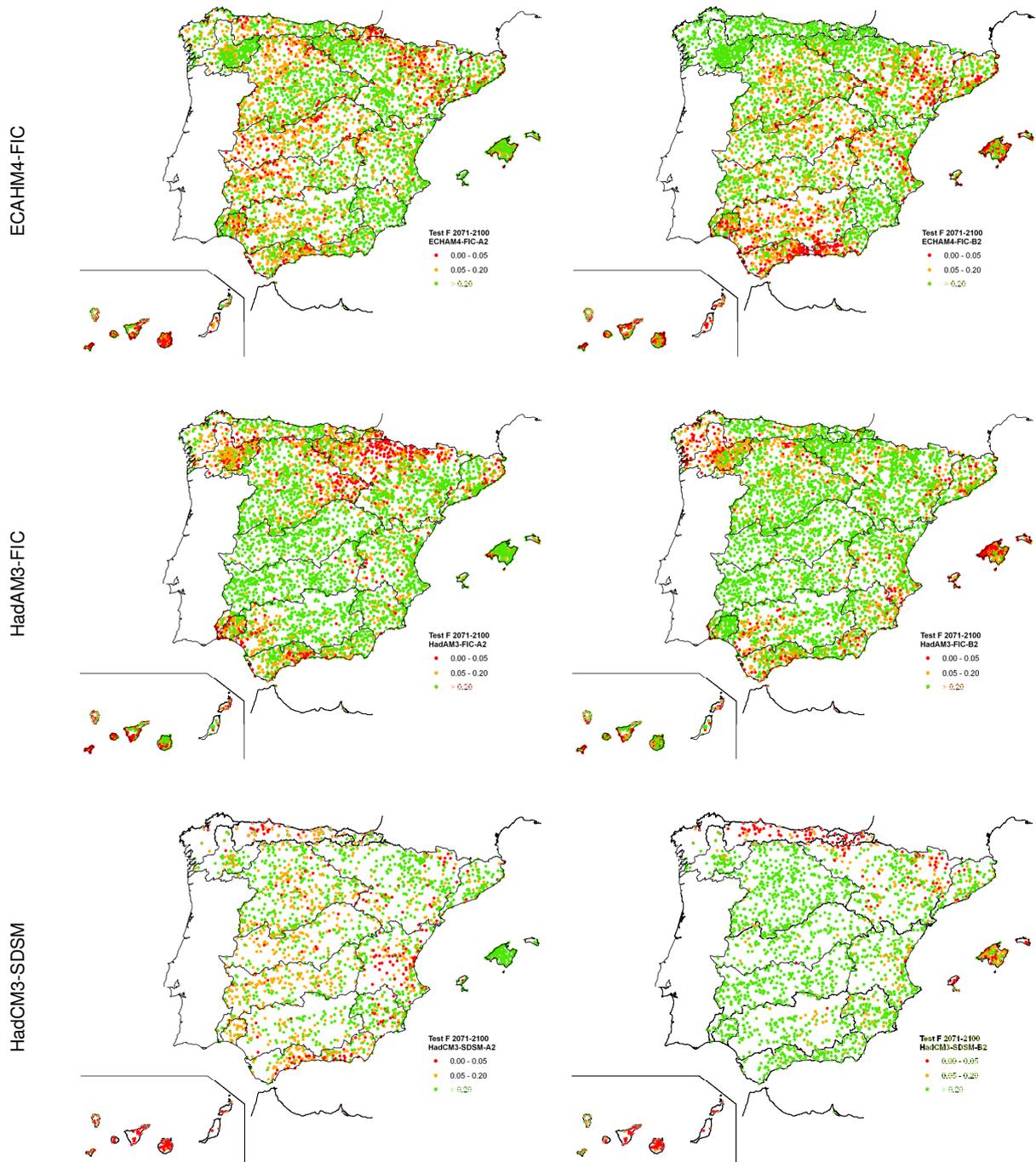


Figura 46. Test F-Snedecor: p-valor de PRE en España en estaciones 2071-2100

#### 4.2.1.3 Cambios en la estacionalidad

Las siguientes figuras muestran los datos medios mensuales de PRE del conjunto completo disponible de estaciones de cada proyección. En cada gráfica se representan los datos medios mensuales de cada periodo de treinta años y de cada escenario, A2 y B2, con el objetivo de valorar las diferencias en la evolución proyectada o de la influencia del escenario de emisiones.

Las proyecciones representan dos tipos básicos de evolución estacional. HadCM3-SDSM y CGCM2-FIC mantienen años hidrológicos unimodales con PMX en invierno y mínimas en verano; ECHAM4-FIC y HadAM3-FIC son bimodales con picos en otoño y primavera. Este carácter se mantiene en las proyecciones de los periodos del s. XXI, que mantienen la misma evolución estacional respecto a los periodos de control, sin apreciarse ningún cambio destacable. Entre los escenarios de emisiones A2 y B2 tampoco hay diferencias apreciables, aunque cabría mencionar que en CGCM2-FIC la recuperación de PRE del último periodo del s. XXI se produce predominantemente por incremento de PRE entre otoño e invierno, mientras que ECHAM4-FIC parece indicar cierta recuperación entre invierno y primavera. En HadCM3-SDSM la recuperación es generalizada en todo el año, aunque con menor incidencia en invierno lo que indicaría una posible tendencia a un ciclo bimodal.

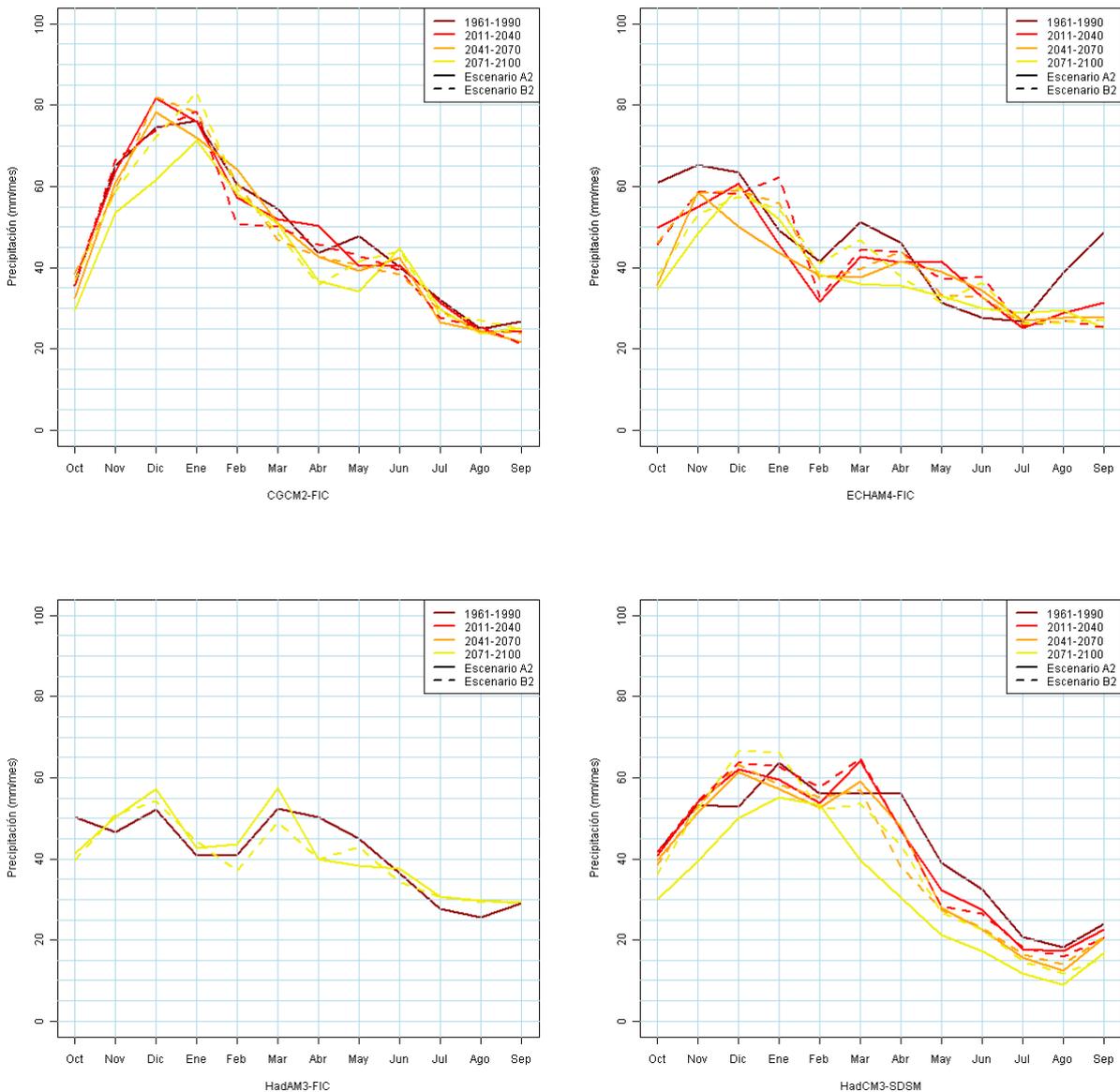


Figura 47. Ciclo estacional de PRE hasta finales s. XXI. Series promediadas con datos en estaciones

## 4.2.2 Temperatura

### 4.2.2.1 Tendencia global

La TEM es una variable con mayor continuidad espacial que la PRE. Los resultados del contraste con datos observados expuesta en el apartado 4.1.2 mejoran respecto a la PRE. La TEM está mejor representada en los modelos climáticos de circulación global y para su estudio no es necesario un número elevado de estaciones. Como ya se expuso anteriormente, el conjunto completo de series disponibles en la regionalización estadística, FIC y SDSM es de aproximadamente unas 1.854 y 369 series, respectivamente. Todas abarcan el periodo de control, además de los 90 años del s. XXI, a excepción de HadAM3-FIC que solamente dispone de información desde el año 2071 al 2100.

La siguiente figura muestra las evoluciones previstas de TEM anual en España distinguiendo proyecciones y escenarios. Como ya se destacó en el capítulo de contraste, son llamativas las pendientes ascendentes a lo largo del s. XXI, suavizándose en el escenario B2 y acentuándose en el A2 a partir de mediados de siglo. La siguiente tabla muestra los gradientes en términos de incremento de TEM anual.

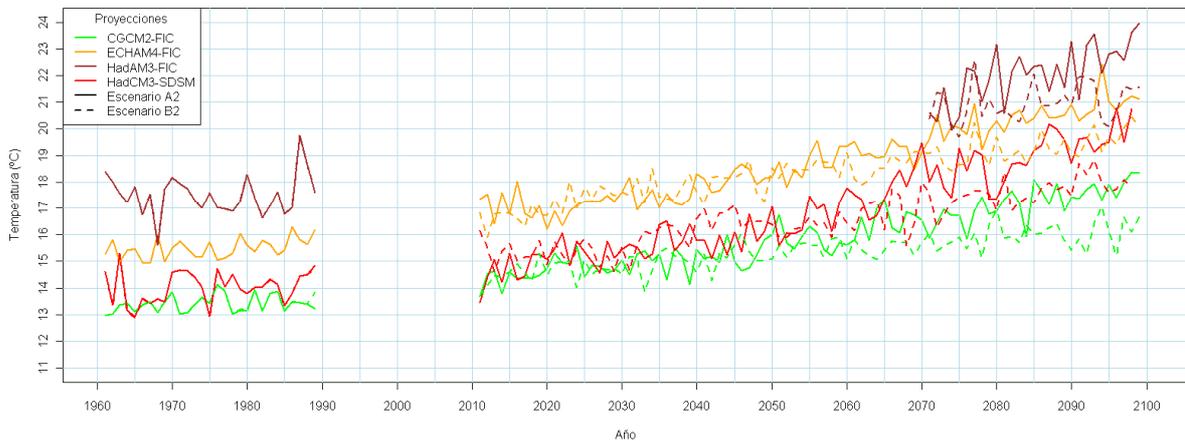


Figura 48. Series de TEM anual en España promediada con datos en estaciones

A2	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	Media
Pendiente (°C/año)	0,043	0,053	0,089	0,065	0,065
B2	CGCM2-FIC	ECHAM4-FIC	HadAM3-FIC	HadCM3-SDSM	Media
Pendiente (°C/año)	0,021	0,034	0,022	0,035	0,048

Tabla 12. Gradiente (°C/año) de TEM anual en España promediada con datos en estaciones

La distribución espacial de las tendencias de la TEM anual durante el s. XXI se muestra en la siguiente figura. Solamente ofrece información de las proyecciones con datos desde el año 2011 hasta final del s. XXI. Del conjunto de mapas se aprecia la diferencia entre las regiones de costa, siempre con tendencia ascendente más suavizados respecto a las zonas del interior. Entre estas proyecciones, la HadCM3-SDSM es la que plantea un escenario más pesimista con ascensos más pronunciados, aunque ECHAM4-FIC alcanza las mayores TEM absolutas.

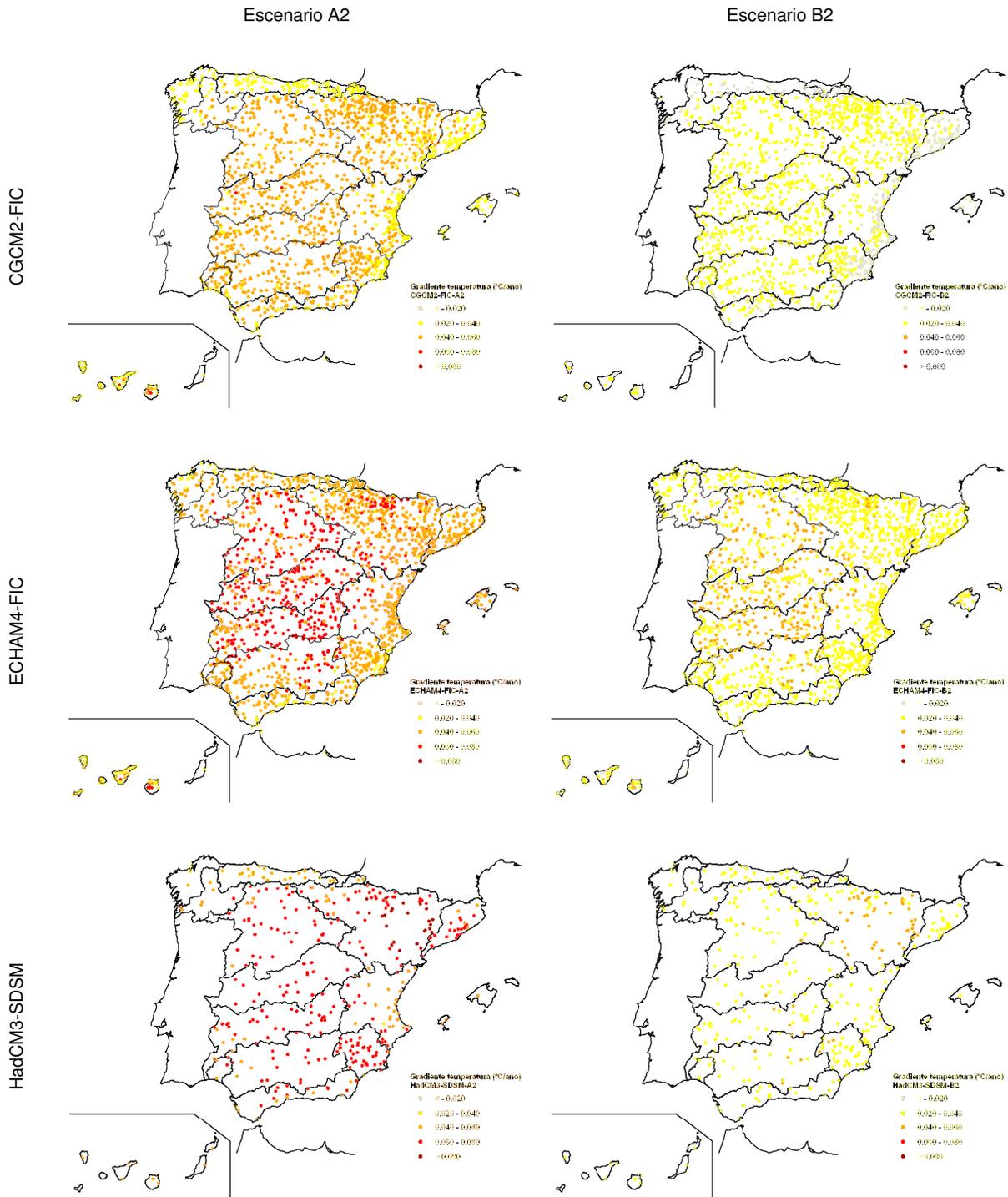


Figura 49. Gradiente (°C/año) de TEM en España en estaciones

#### 4.2.2.2 Consideración de los periodos de treinta años

Como en el caso de las PRE, se comparan los estadísticos de las proyecciones considerando periodos de treinta años del s. XXI. Se representan las series promediadas junto con la media móvil. Se aprecia en las proyecciones del escenario A2 el ligero aumento del gradiente de TEM conforme avanza el s. XXI. El mayor gradiente se encuentra en HadCM3-SDSM-A2 durante el periodo 2041-2070.

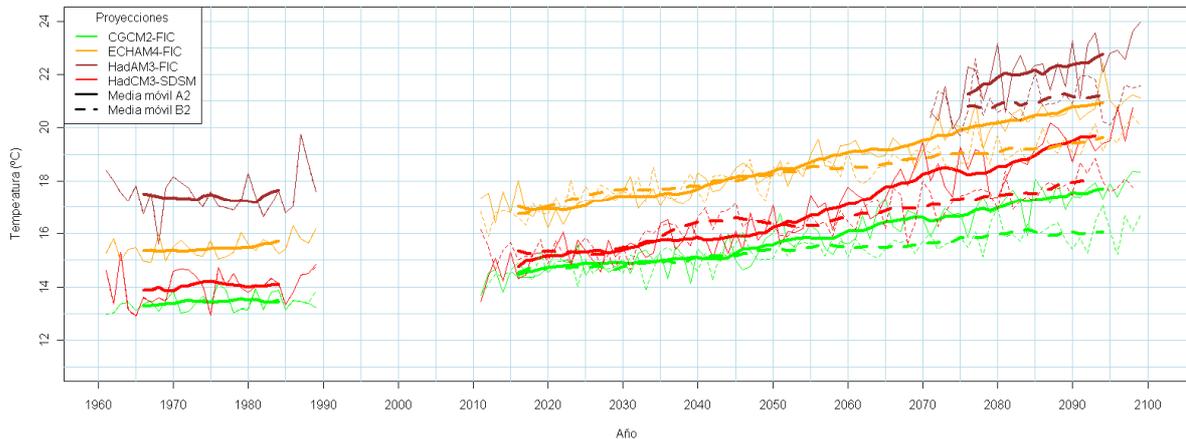


Figura 50. Series de TEM anual (°C) en España promediadas con datos en estaciones

	1961-1990	2011-2040		2041-2070		2071-2100		2011-2100	
		A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
CGCM2-FIC	13,4	14,7	14,7	15,8	15,4	17,2	16,0	15,9	15,4
ECHAM4-FIC	15,5	17,2	17,3	18,7	18,4	20,4	19,3	18,8	18,3
HadAM3-FIC	17,5					22,1	21,0		
HadCM3-SDSM	14,0	15,3	15,5	16,8	16,6	19,0	17,6	17,0	16,6
CGCM2-FIC	0,010	0,029	0,023	0,054	0,018	0,059	0,019	0,043	0,021
ECHAM4-FIC	0,020	0,020	0,050	0,047	0,034	0,055	0,035	0,053	0,034
HadAM3-FIC	0,007					0,089	0,022		
HadCM3-SDSM	0,015	0,055	0,027	0,099	0,014	0,070	0,033	0,065	0,035

Tabla 13. Estadísticos de las series de TEM anual en España con datos en estaciones

#### 4.2.2.3 Cambios en la estacionalidad

La secuencia estacional de TEM se mantiene constante en cada una de las proyecciones, en cada periodo y para cualquiera de los escenarios considerados, A2 y B2. Se detectan cambios en sintonía con el ascenso de TEM anual, repartidos prácticamente de manera uniforme a lo largo del ciclo anual medio. La única nota singular se da en ECHAM4-FIC en la que el ciclo medio del periodo de control registra un adelanto de un mes respecto al del resto de las proyecciones. Este adelanto no aparece en el resto de periodos del siglo XXI de la misma ECHAM4-FIC.

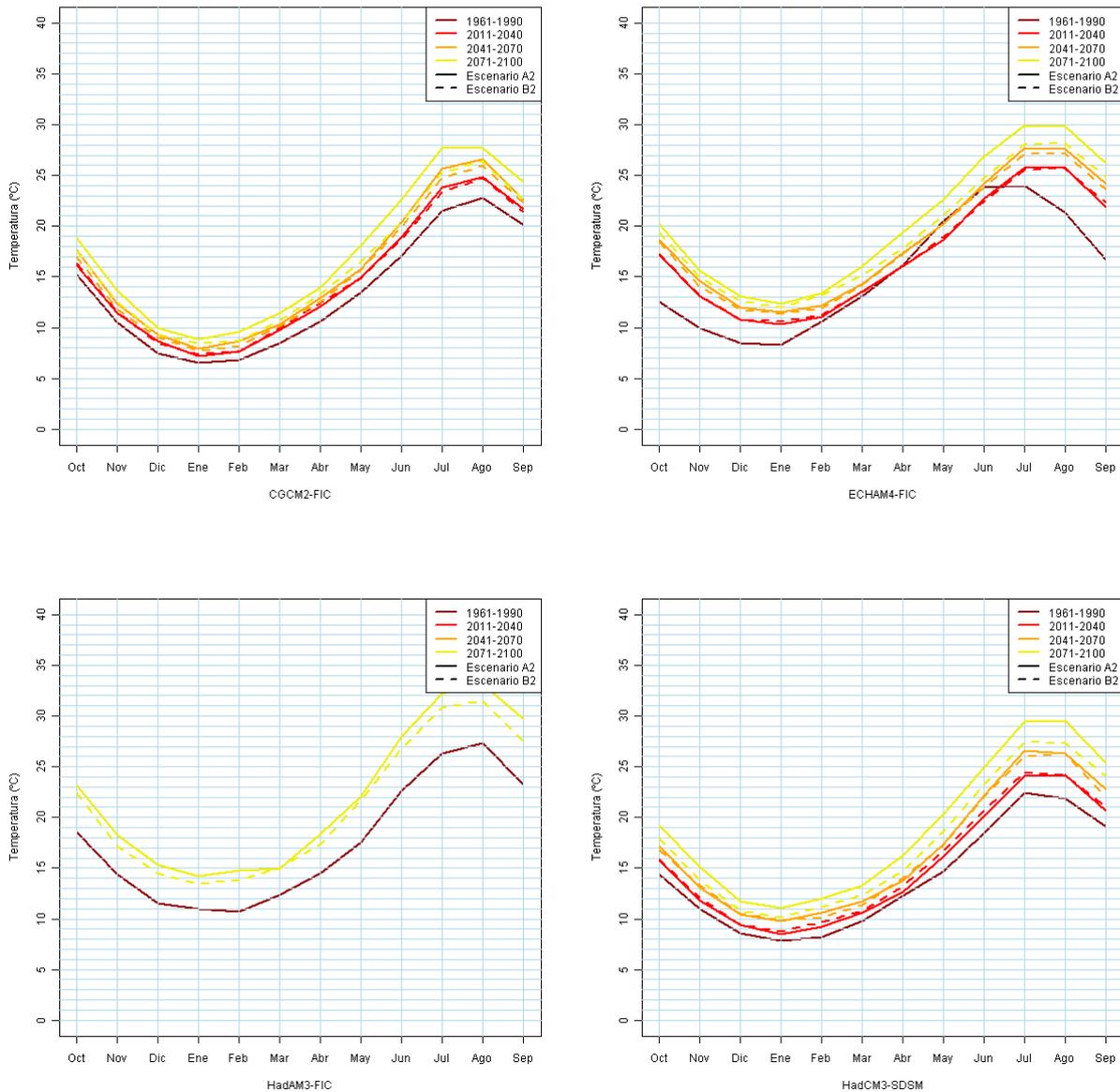


Figura 51. Ciclo estacional de TEM (°C) hasta finales s. XXI. Series promediadas con datos en estaciones

#### 4.2.3 Precipitaciones máximas

Las series de precipitación diaria permiten seleccionar las máximas diarias anuales, PMX, y analizar el cambio de propiedades estadísticas, distribuciones de frecuencia y estadísticos de localización, variabilidad y asimetría de la distribución. Se ha analizado la variación de la distribución estacional media de la PMX y el número de veces que en cada mes se produce el máximo diario anual. Otros indicadores a tener en cuenta para el análisis de extremos están descritos en la bibliografía (Frích et al, 2002; Zurita, 2006). Estos dos autores destacan los siguientes índices climáticos:

- R10: número de días con PRE mayor que 10 mm/día. Se trata de un índice que selecciona el número de días lluviosos, entendiendo por tales los que superan un umbral, 10 mm. Mediante este índice se deducen características climáticas y

estacionales de la PRE. De acuerdo a las predicciones del IPCC cabría esperar un aumento de estos días con PRE altas.

- R5d: valor máximo anual de la PRE total acumulada en 5 días. El índice se elabora mediante medias móviles de 5 días y selección del máximo. Mediante la ventana de 5 días se obtiene un indicador de intensidad de PRE que tendría relación con un mecanismo de generación de inundaciones con altos estados de HMS antecedente.
- SDII: índice de intensidad diaria simple, obtenido mediante el ratio de PRE anual entre el número de días con PRE diaria. Cabría esperar el aumento de intensidad conforme a las predicciones del IPCC.
- R95T: fracción de la PRE superior a la del percentil 95% de los datos diarios desde 1961 hasta 1990 respecto a la PRE total anual. Este índice selecciona y pondera el papel de las PRE extremas en la PRE anual. Igual que en los casos anteriores cabría esperar un aumento de este índice según las previsiones del IPCC.

Frich et al (2002) aplican estos índices a series climáticas registradas en Europa, Asia, Australia, África del Sur y Norteamérica. Las series han superado varios controles de calidad y disponen de un número variable de datos. De acuerdo con los resultados alcanzados por los autores anteriores en España durante el s. XX, la evolución de los índices R10, R5d y SDII da tendencias positivas en el interior de la Península Ibérica y negativas en la costa mediterránea y en la costa atlántica portuguesa; los resultados del ratio R95T da tendencias decrecientes en la costa mediterránea y mitad sur de la Península y positivas en el norte, alrededor del Golfo de Vizcaya. En ningún caso, estos índices dan resultados significativos en España al 95% de nivel de confianza. Por otra parte, estos índices se supone que permitirían obtener conclusiones en cuanto a la torrencialidad del clima utilizando series de datos diarios, pero en realidad no describen cambios en intensidades de PRE menores a 24 horas que son clave en el mecanismo generador de inundaciones en gran parte de España.

En los apartados siguientes se comparan los datos observados con los proporcionados por las proyecciones procedentes de los MCGAO y la aplicación de técnicas de regionalización estadísticas, FIC y SDSM (AEMET, 2008). El impacto del cambio climático se analiza considerando la tendencia general durante el s. XXI, los cambios de propiedades estadísticas en tres periodos de treinta años y, por último, en la escala estacional.

#### 4.2.3.1 Tendencia global

Este apartado se dedica al análisis de tendencias globales de la PMX durante el s. XXI utilizando diversas aproximaciones. En primer lugar, se explora la existencia de una componente creciente por medio de series de máximos absolutos regionales. En cada región y año se selecciona el máximo anual del conjunto de estaciones para componer una serie temporal de la que estudiar sus propiedades. Se asumiría entonces que los valores del conjunto de estaciones de cada región es equiprobable, lo que en realidad depende del tipo de lluvia y de los factores fisiográficos que la pueden acrecentar o suavizar. Sin embargo, se considera que es una condición suficientemente desfavorable y útil para la evaluación del carácter estacionario o no de las lluvias máximas. Las regiones utilizadas son las definidas para el cálculo de cuantiles de diseño de lluvias máximas en la España Peninsular (Ardiles y Ferrer, 1994).

La figura siguiente muestra un total de 8 series de lluvia máxima absoluta obtenidas de cada una de las 4 proyecciones y 2 escenarios en España. Se comprueba que la evolución de la PMX absoluta no experimenta un incremento considerable a lo largo del s. XXI respecto al periodo de control, 1961-1990. Al contrario, la tendencia que se aprecia en la figura es ligeramente decreciente, aunque no supone suficiente evidencia en contra de la estacionariedad, tal como se concluye al aplicar el test de Mann Kendall. Los máximos

superiores a los 500 mm/día proceden de HadCM3-SDSM. Se destaca que se está aplicando una condición de equiprobabilidad a la totalidad del territorio de España, por lo que el resultado anterior no debe ser considerado concluyente.

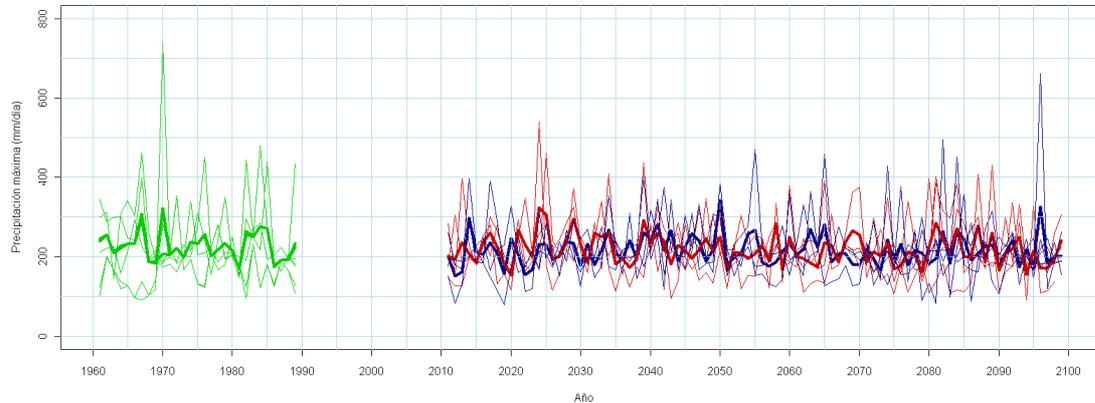


Figura 52. Series de PMX absoluta en España. Periodo de control (verde); escenario A2 (rojo); escenario B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

A una escala mayor, en regiones de dimensiones menores, se considera que las garantías de cumplimiento de la hipótesis de equiprobabilidad para la selección de máximos aumentan. Las siguientes figuras muestran series de máximos absolutos de las regiones noroccidental atlántica (0101), Levante (0801), centro (0303) y suroeste (0603). Estas series siguen mostrando la presencia de pendientes ligeramente negativas, es decir, decrementos de la PMX. Con carácter general también se puede señalar que se encuentra mayor variabilidad en las series de PMX absolutas de regiones costeras que en las interiores y, de éstas, es mayor la variabilidad de la región mediterránea.

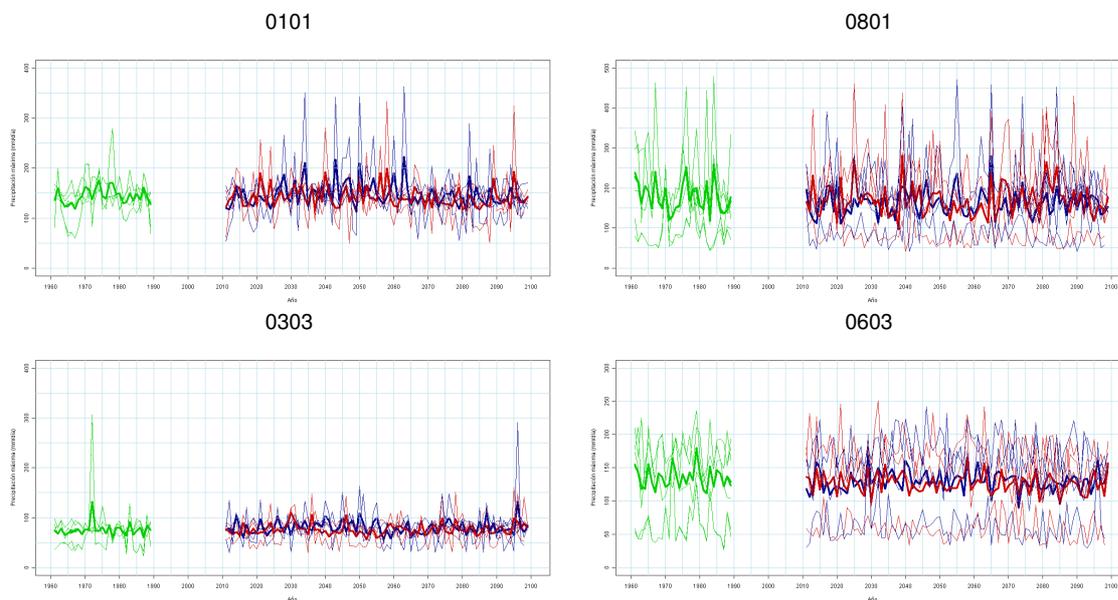
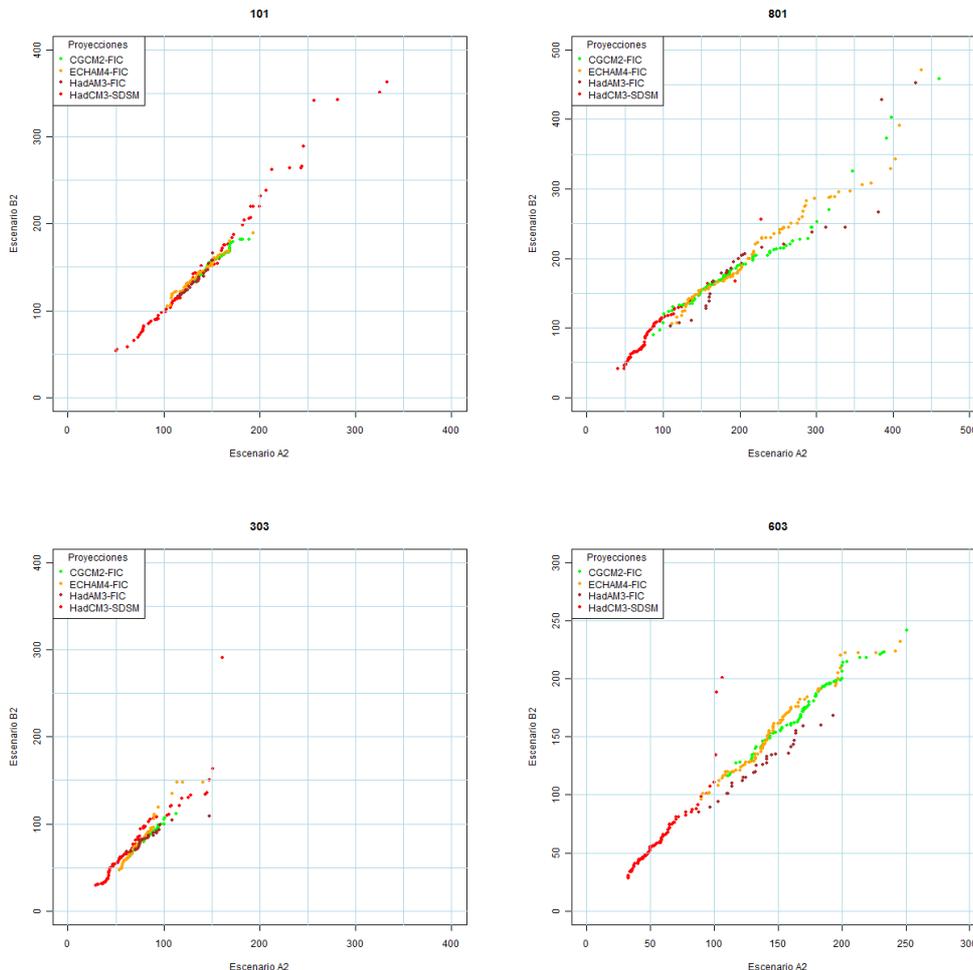


Figura 53. Series de PMX (mm) en el noroeste, sureste y Levante, centro y suroeste. Periodo de control (verde), escenario A2 (rojo); escenario B2 (azul)

Un aspecto a destacar es que la serie de PMX de HadAM3-SDSM muestra un carácter singular por su localización y variabilidad. La media de PMX absolutos es inferior a la del resto de proyecciones, pero algunos valores superan los máximos del conjunto.

Tampoco aparecen claras las diferencias entre escenarios de emisiones, A2 y B2. La siguiente figura está compuesta por diagramas QQ de valores con la misma frecuencia de ocurrencia para series de PMX absolutas regionales. Se comparan las frecuencias del escenario A2 (abscisas) y las del B2 (ordenadas). El ajuste sobre la diagonal de 45° indicaría similitud de cuantiles para la misma frecuencia de ocurrencia. Una deriva sobre la parte derecha de la gráfica, indicaría que para una misma frecuencia, los cuantiles de la proyección A2 son mayores que los de la B2; al contrario, la deriva sobre la izquierda, indicaría que los cuantiles del escenario B2 son más altos que los del A2.

De acuerdo a lo anterior se encuentra que en la región de Levante (región 0801) para valores bajos hay similitud de resultados entre las series A2 y B2. Alrededor de los 200 mm/día ya hay diferencias entre los resultados de ambos escenarios, siendo las más importantes las de CGCM2-FIC (percentil del 80% aproximadamente) y HadAM3-FIC (percentil del 75% aproximadamente). ECHAM4-FIC se mantiene sobre la recta de 45° hasta aproximadamente los 300 mm/día o percentil 90%. Los valores más altos vuelven a situarse sobre la línea de 45° en las PMX de la región 0801. En regiones como la del centro peninsular (0303) y suroeste atlántica (0603) únicamente los cuantiles más altos de HadCM3-SDSM se apartan de la diagonal hacia la izquierda.



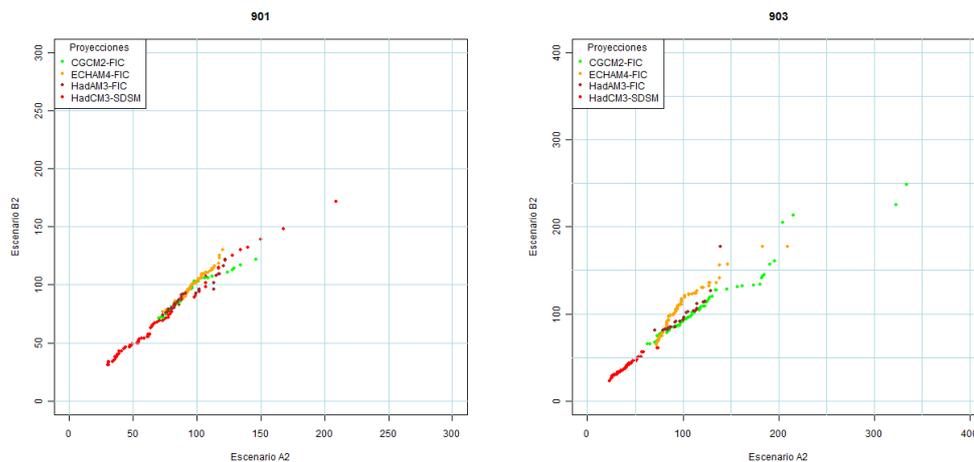


Figura 54. Diagramas QQ entre escenarios A2 y B2 de la PMX absoluta (mm)

Una segunda opción para detectar pautas de crecimiento consiste en analizar los valores de PMX proyectados en cada estación, comprobar su tendencia y estimar si se puede o no derivar alguna conclusión de carácter regional. En la práctica, esto se ha traducido en aplicar el test de Mann Kendall a cada una de las series de PMX de cada estación y posteriormente el test binomial para el conteo regional de la evidencia de cambio. El contraste se establece en términos de conocer si hay un número suficiente de estaciones que no cumplen la hipótesis de homogeneidad y por las que se deba descartar regionalmente la hipótesis nula. Los p-valores para descartar la hipótesis nula en la estación y regionalmente, nivel de significación, se fijan en el 5%. Desde el punto de vista regional se considera que la distribución del número de estaciones con fallo o acierto es una binomial. El número de estaciones con fallo, superado el cual se descarta la hipótesis de homogeneidad en la región, se calcula suponiendo que la binomial se parametriza con el número total de estaciones y la probabilidad de fallo del 5%, tomado del nivel de significación considerado. Se aplica una binomial como distribución de referencia a pesar de que en una región climática las series registradas no cumplirían la hipótesis de independencia. De ese modo, el test se ha aplicado para distinguir entre tendencia estacionaria (hipótesis nula) y no estacionaria, para, en este último caso, diferenciar además entre tendencia significativamente creciente o decreciente mediante la aplicación del test binomial. La aplicación de éste en un doble paso implica que en una región pueda ser significativo simultáneamente el número de estaciones con tendencia creciente y decreciente.

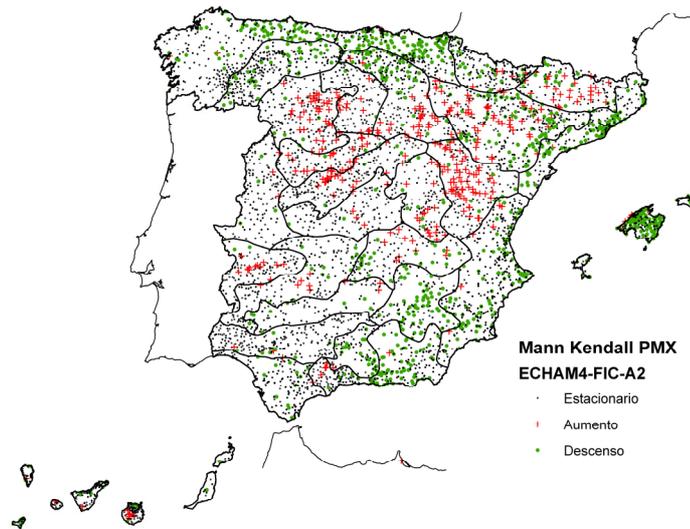
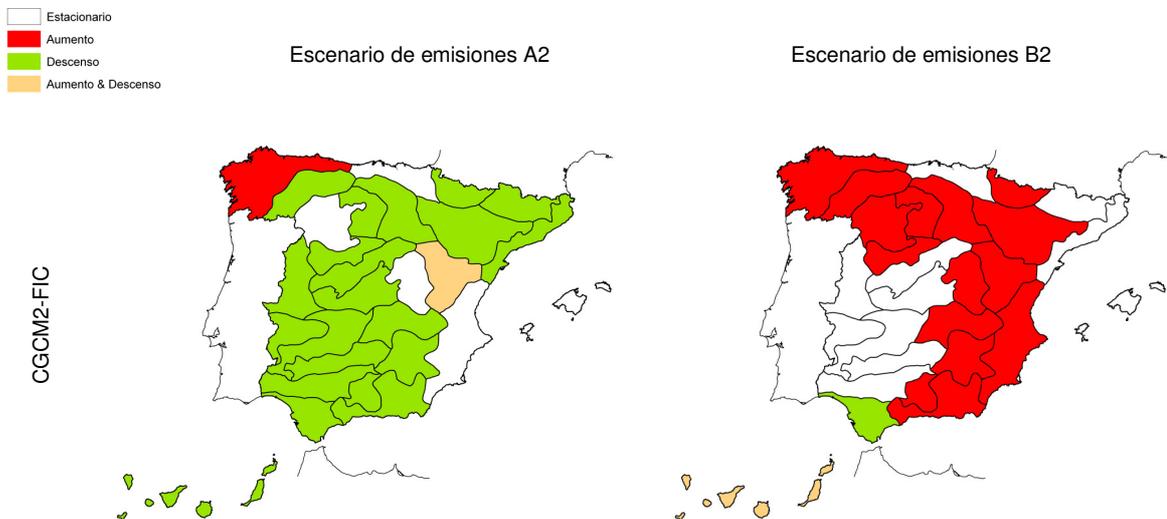


Figura 55. Test de Mann Kendall en series PMX de estaciones meteorológicas (ECHAM4-FIC-A2)

El resultado del test revela una destacable discrepancia entre los resultados de las proyecciones, no evidenciándose un claro patrón global de incremento de PMX. De hecho, en muchas regiones, se concluyen patentes tendencias negativas en la evolución de PMX. Además, otro factor destacado es que los resultados del escenario A2 no indican tendencias positivas más extendidas que las correspondientes al B2 que es lo que cabría esperar entre escenarios de emisiones sin y con medidas correctoras. CGCM2-FIC-B2 es la muestra mayor número de regiones con tendencia creciente de PMX.

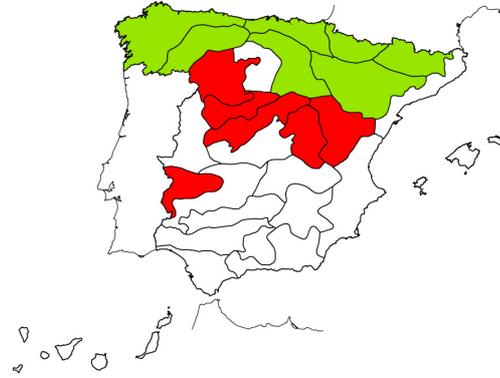
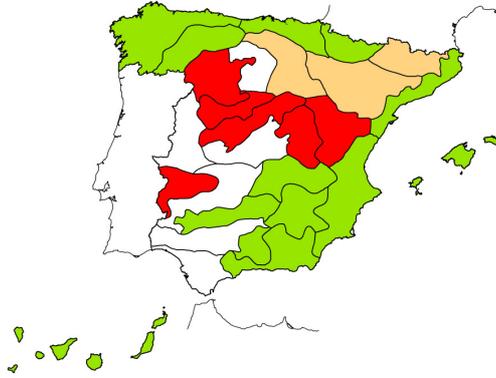




Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

ECHAM4-FIC



HadCM3-SDSM

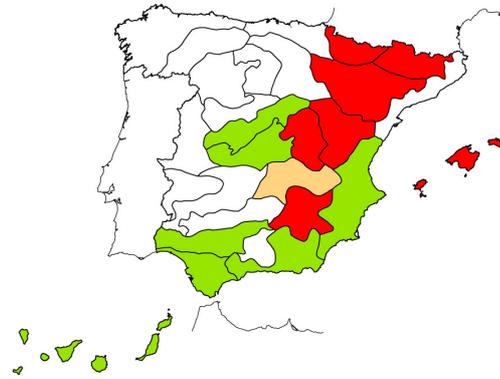
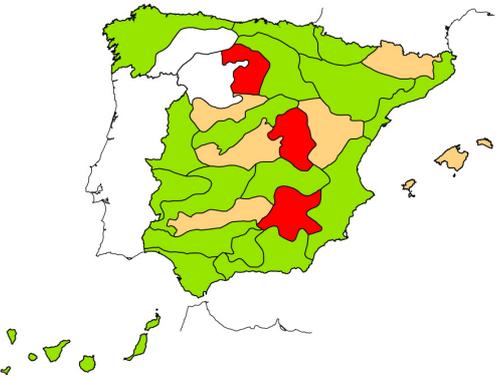


Figura 56. Regionalización del test de Mann Kendall en series PMX de estaciones meteorológicas

El índice R95T es el cociente entre las precipitaciones diarias superiores al percentil 95% y la PRE anual. Refleja el peso de las precipitaciones extremas en la total anual y estaría relacionado con la torrencialidad del clima por lo que serían de esperar eventos de lluvia más intensos conforme aumenta esta relación de lluvias extremas sobre el total. De la misma manera que en el caso de las PMX, se ha aplicado el test de Mann Kendall a la serie de R95T de cada estación y proyección. El test se aplica dos veces unilateralmente para probar si los aumentos o descensos de intensidad de lluvia a lo largo del siglo XXI son significativos. La mayoría de las proyecciones estiman incrementos del índice R95T en el centro-norte de España. Considerando la composición de este índice, predominantemente es la disminución de la PRE anual la que condiciona el aumento del índice R95T. La falta de homogeneidad en algunas regiones podría justificar que aparezca un resultado doble.

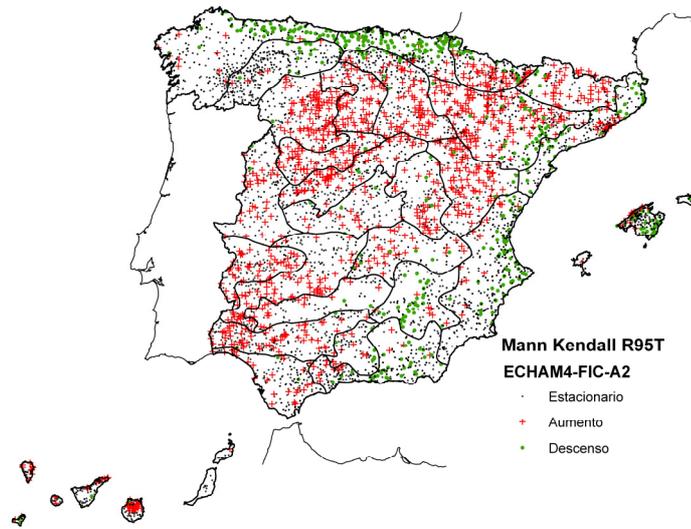


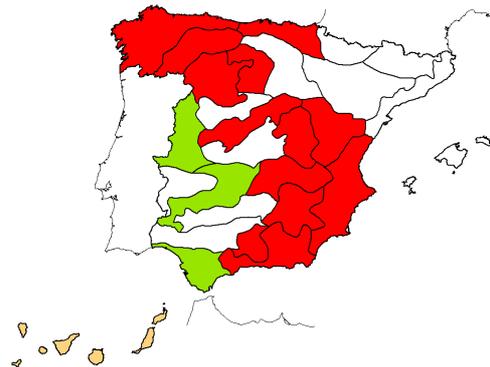
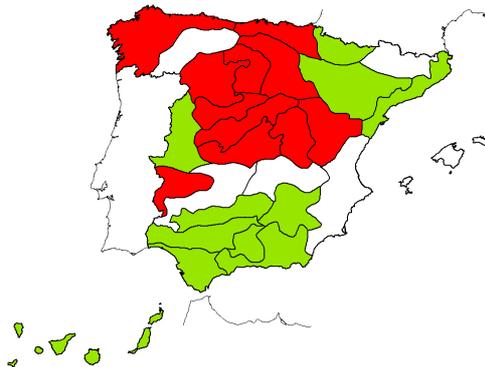
Figura 57. Test de Mann Kendall en series R95T de estaciones meteorológicas (ECHAM4-FIC-A2)



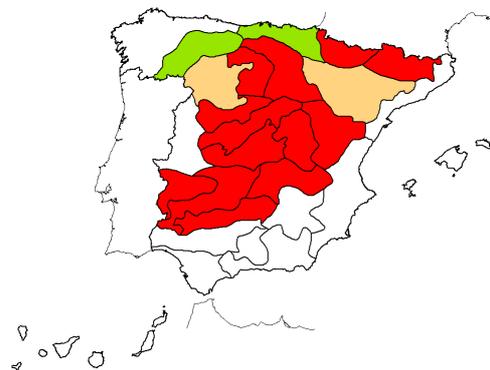
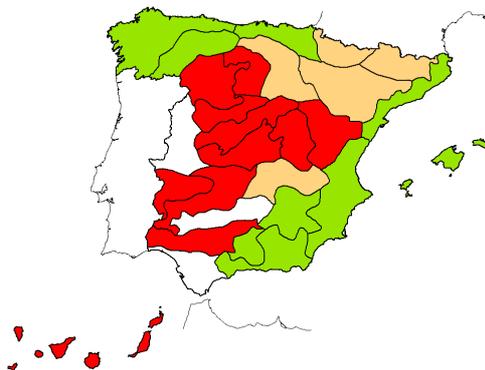
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

CGCM2-FIC



ECHAM4-FIC



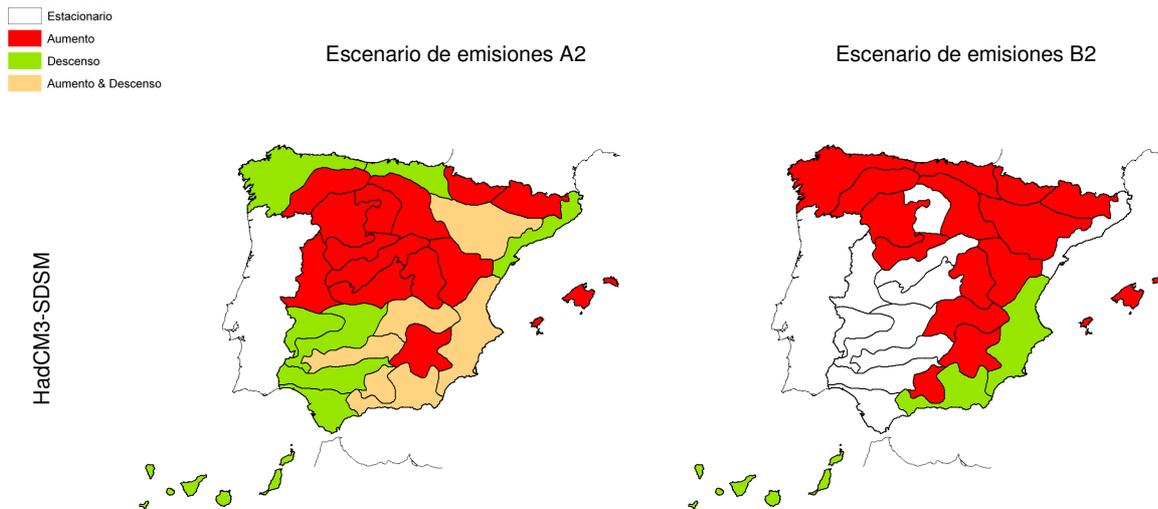


Figura 58. Regionalización del test de Mann Kendall en series R95T de estaciones meteorológicas

#### 4.2.3.2 Consideración de los periodos de treinta años

El apartado anterior se centra en el análisis del carácter ascendente de la PMX y del índice R95T en las series proyectadas durante el siglo XXI, abstrayendo cualquier particularidad relativa a periodos más cortos que los 90 años comprendidos entre 2011 y 2100. Se utilizaron dos series de máximos comprendidas entre esos mismos años. Por un lado las PMX absolutas regionales y, por otro lado, las series PMX y R95T de cada estación. Sin embargo, es habitual el uso de tres periodos de treinta años ya contemplados por las diferentes proyecciones y escenarios climáticos, 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. En este apartado se comparan las distribuciones de frecuencia de la PMX y del R95T con la del periodo 1961-1990. Se aplican test estadísticos no paramétricos de contraste de hipótesis para valorar los cambios en localización y variabilidad y permitieran explorar la posibilidad de incrementos de lluvias máximas o de intensidad. Los cambios con respecto a la mediana se estudian mediante el test de Wilcoxon (McCuen, 2003; Hipel y McLeod, 1994) y para analizar la variabilidad de las muestras se aplica el test de Fligner Killeen (Conover et al, 1981; Conover, 1971). A pesar de la hipótesis de equiprobabilidad de las proyecciones, se han obtenido mapas de medias y desviaciones típicas, interpolando las correspondientes medias y desviaciones promediadas del conjunto de proyecciones en cada estación.

Las figuras siguientes muestran diagramas QQ que comparan frecuencias y cuantiles de PMX absoluta de cada una de las regiones y periodos. En abscisas, los cuantiles de las series durante el periodo de control. En ordenadas, las del resto de periodos del s. XXI. Se representan los casos de la región cantábrica, 0103, el Levante, 0801 y la región noreste de la Península, 1001, todas en el escenario A2.

La singularidad de los resultados obtenidos en la región de Levante y CGCM2-A2 reside en que es la única situación que muestra un crecimiento de los cuantiles de PMX absoluta en los tres periodos del s. XXI. En esta misma región, pero para ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM se comprueba el patrón de comportamiento generalizado consistente en el comportamiento estacionario o en decrecimiento de los cuantiles. Otro aspecto que destaca en las gráficas siguientes es que los cuantiles del 1<sup>er</sup> periodo del s. XXI son superiores a los de 2041-2070 y 2071-2100, lo que explica la tendencia negativa obtenida del test de Mann Kendall a series 2011-2100.

103 (Cantábrica)

801 (Levante)

1001 (NE)

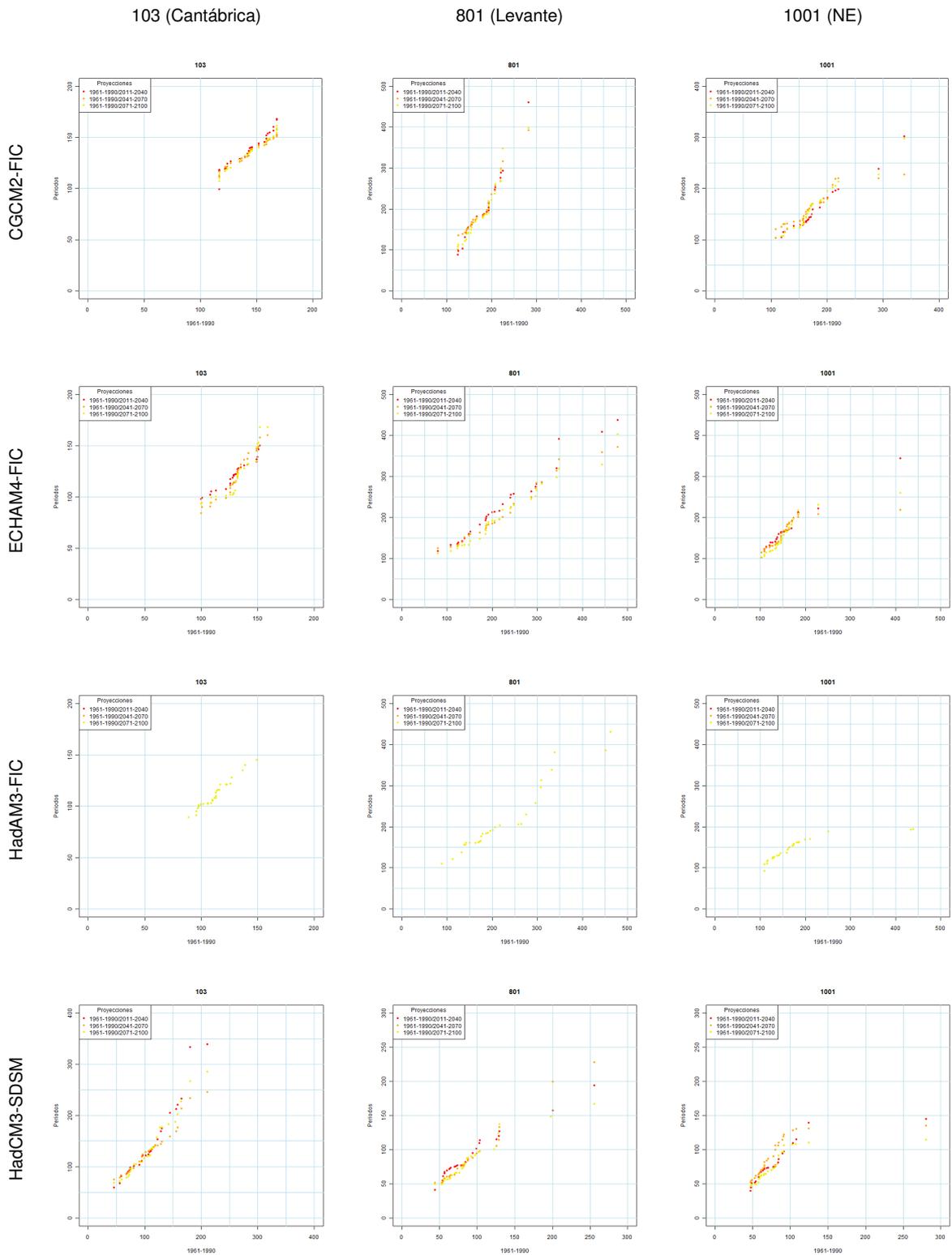
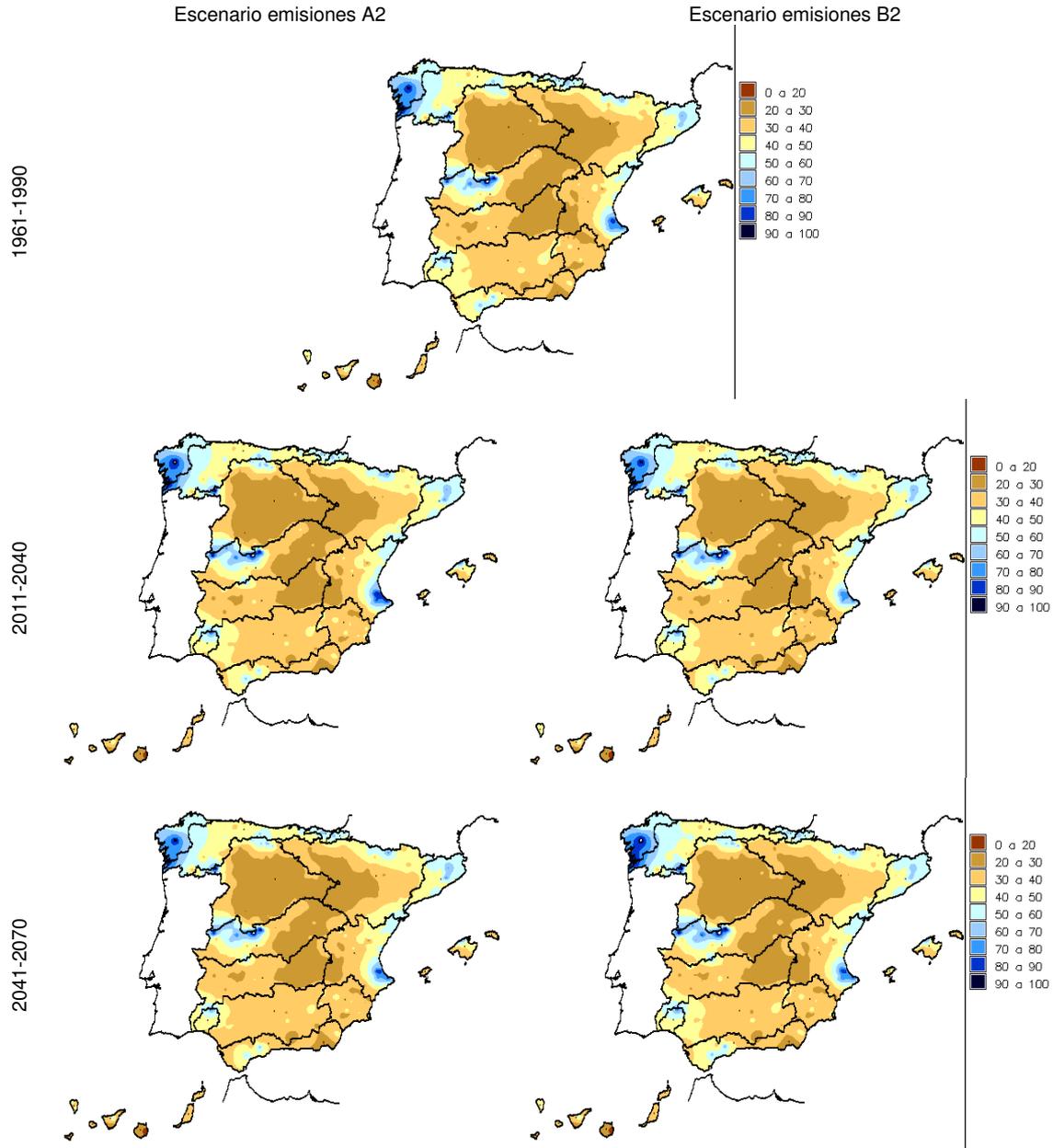


Figura 59. Diagrama QQ (mm) en regiones cantábrica, Levante y nororiental de la Península

Este resultado tendente a destacar la estacionariedad de las series PMX o, incluso su decrecimiento, vuelve a comprobarse en la escasa variación que dan los siguientes mapas. Se obtienen por interpolación de los promedios de medias y desviaciones típicas de PMX de las proyecciones en cada estación. Muestran, que en el caso de las medias, no se aprecian

variaciones importantes entre los distintos periodos. Solo se aprecia un ligero aumento en las medias de PMX en las cuencas centrales de la Península e islas Baleares y Canarias en el periodo 2071-2100 y, más concretamente, en las cabeceras del Tajo y Guadiana y en el Segura y Júcar. Estos aumentos en la media de las PMX no superan los 10-20 mm para un horizonte de 90 años.



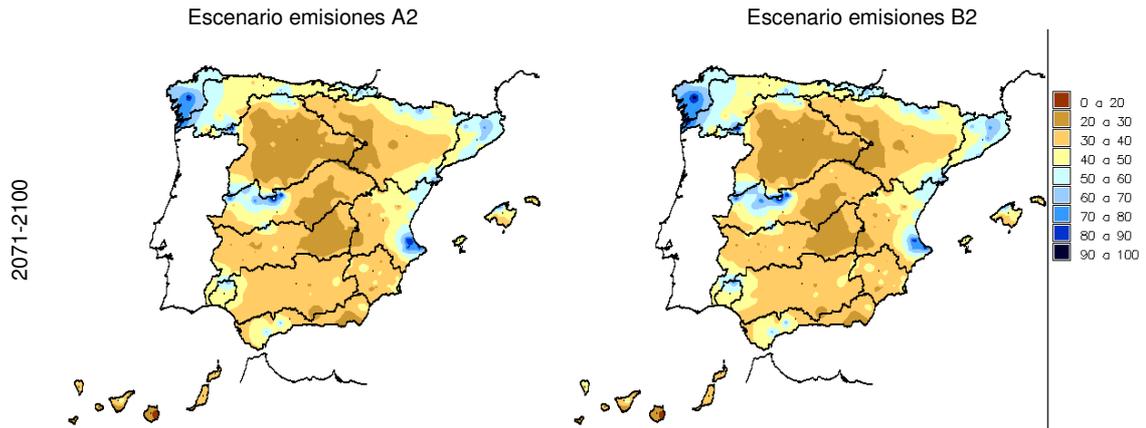
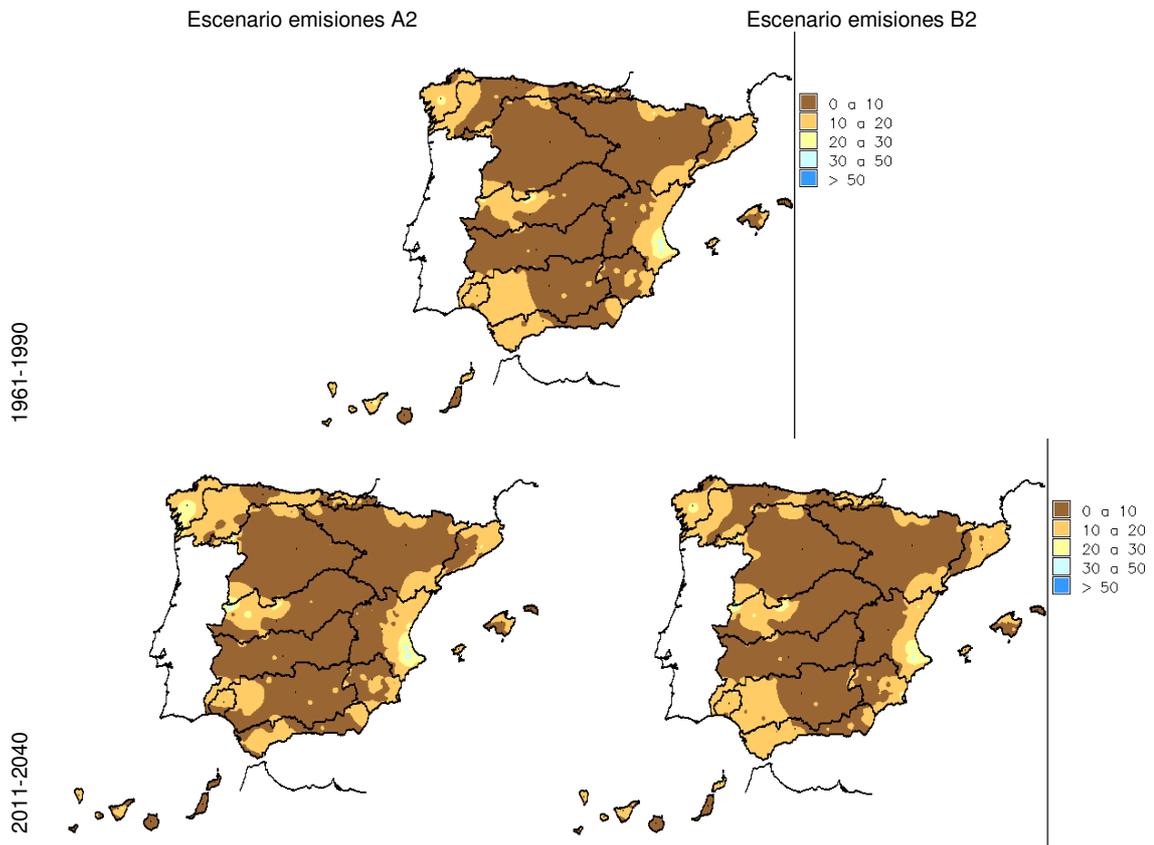


Figura 60. Mapa de medias de PMX promediadas del conjunto de proyecciones (mm)

Los promedios de las desviaciones típicas de las proyecciones de las PMX (figura siguiente), no presentan apenas cambios de uno a otro periodo. Solo aumentan ligeramente en Galicia y la zona de Gredos y muy ligeramente se aprecia también en el Levante Peninsular.



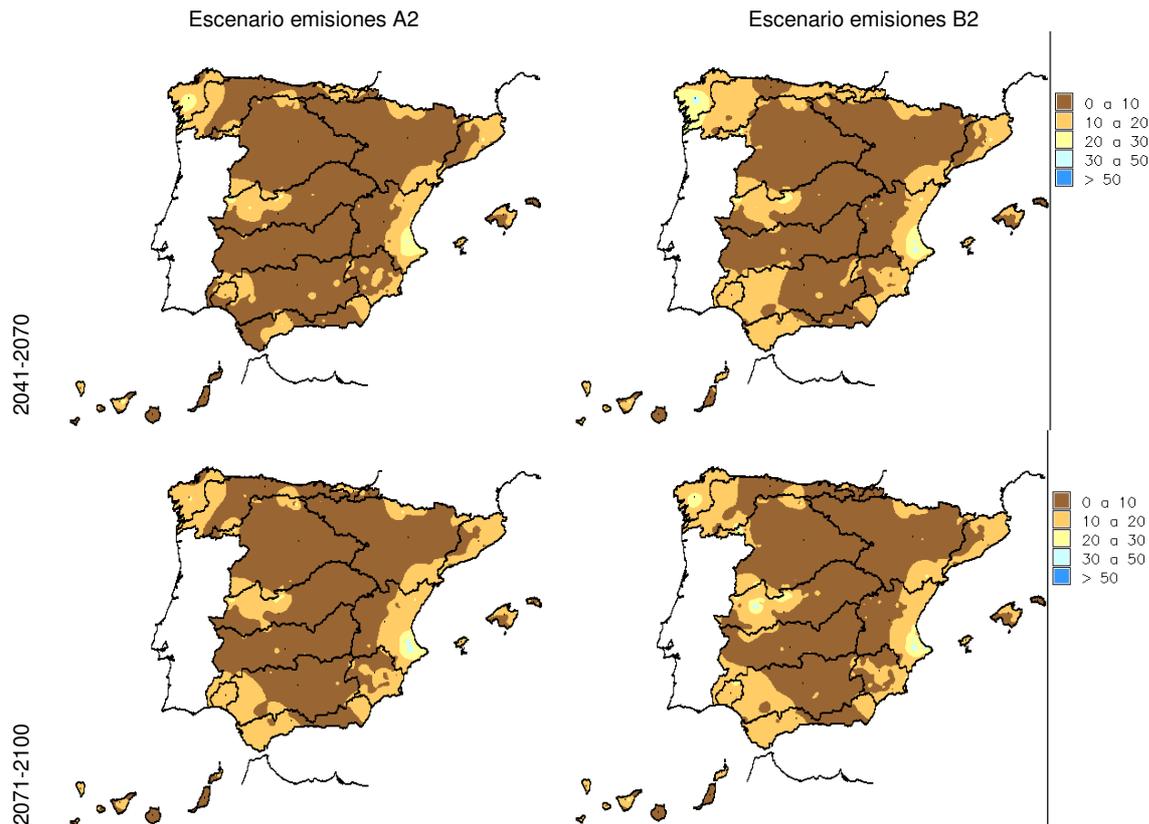


Figura 61. Mapa de desviación típica de PMX promediada de proyecciones (mm)

No se ha encontrado una evidencia clara de cambio analizando los parámetros media y desviación típica promediados, si bien se señala que las proyecciones son equiprobables y que los promedios de medias y desviaciones típicas se usan únicamente con el objetivo de valorar los términos que se están manejando. A continuación se muestran los resultados de aplicar los test de contraste de hipótesis Wilcoxon y Fligner Killeen a las estaciones, distinguiendo cada una de las proyecciones. Además de aplicar los test a cada una de las series de PMX, se ha contrastado su significación regional, utilizando el procedimiento basado en el conteo y la distribución binomial que se usó en el análisis de tendencias.

Los resultados de la aplicación del test de Wilcoxon a las series de PMX de la proyección, no muestran un patrón de cambio generalizado en la Península, Baleares y Canarias. Se ha contrastado el ascenso sobre un nivel de significación del 5% y la definición de un intervalo de razonable duda hasta el 20%. Considerando cada proyección,

- En CGCM2-FIC y escenario A2 hay mayor densidad de fallos en el sur, sureste de la Península y cabeceras de ríos en el Levante, con la peor situación dada durante el 1<sup>er</sup> periodo y escenario A2. Los resultados en el escenario B2 indican menor impacto durante el periodo 2011-2040 respecto a la incidencia en escenario A2; en el periodo 2071-2100 ocurre al contrario, son peores los resultados del escenario B2 con incidencia en las cabeceras de los ríos Júcar, Tajo, Guadiana y el noroeste de la Península
- ECHAM4-FIC acentúa el impacto en la fachada mediterránea, extendiéndose hacia la submeseta norte durante el último periodo del s. XXI. Los resultados en el escenario B2 muestran un impacto suavizado respecto a los A2
- En HadCM3-SDSM las áreas en las que aparece mayor densidad de estaciones con incrementos de PMX son la cuenca del Duero, sureste y algunas áreas del Pirineo y

cabeceras del Llobregat, Tajo, Guadiana, Segura y Júcar. Durante el último periodo la extensión del impacto se reduce y como singularidad queda la situación del escenario B2 durante el periodo 2041-2070, peor que la del A2

- En HadAM3-FIC y periodo 2071-2100 hay disimetría norte sur con cambios en la cuenca del Duero, Pirineo, margen derecha del Ebro, cabecera del Tajo, Júcar, Miño y Sil

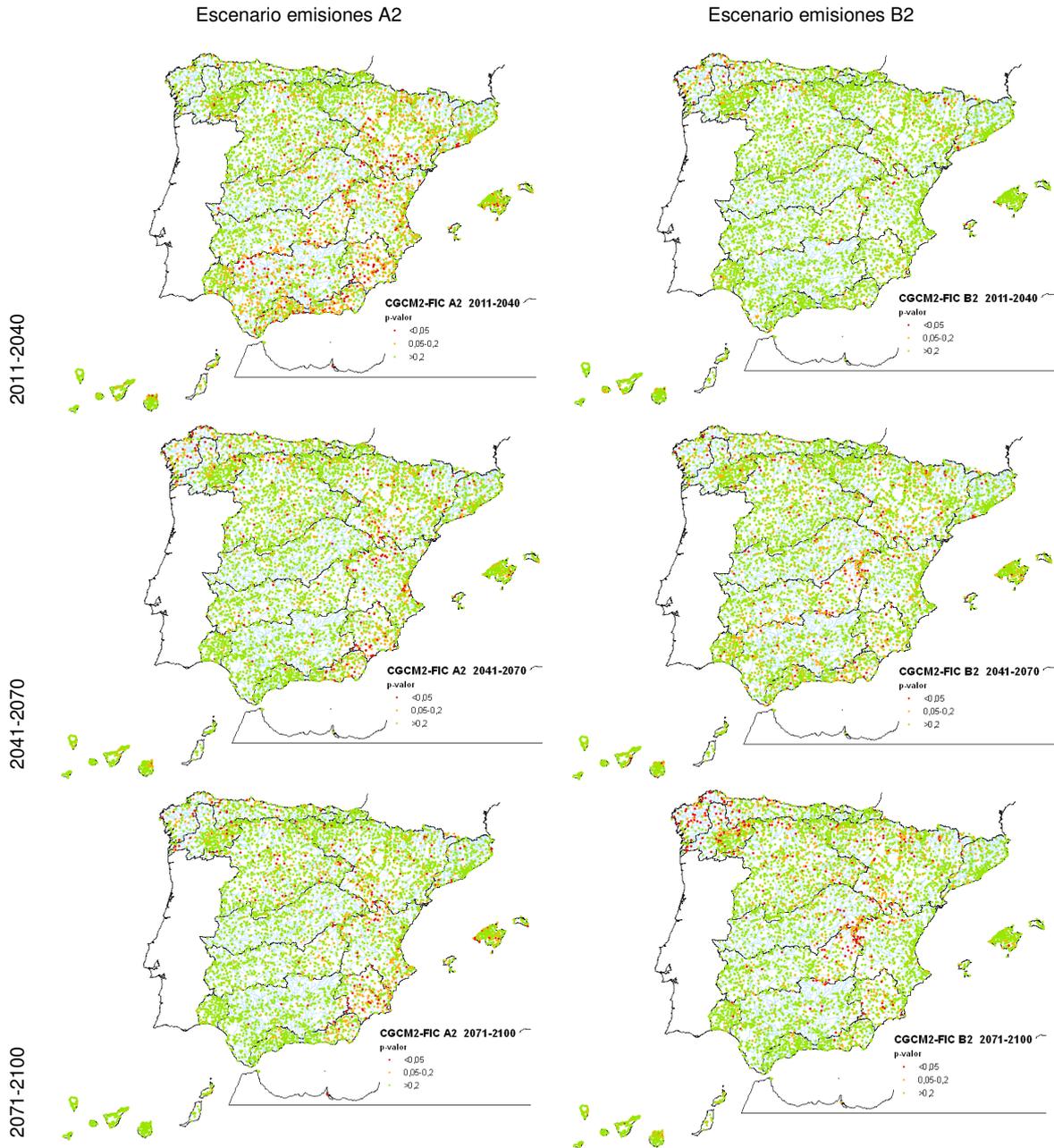


Figura 62. Test Wilcoxon: p-valor en CGCM2-FIC y periodos de estudio

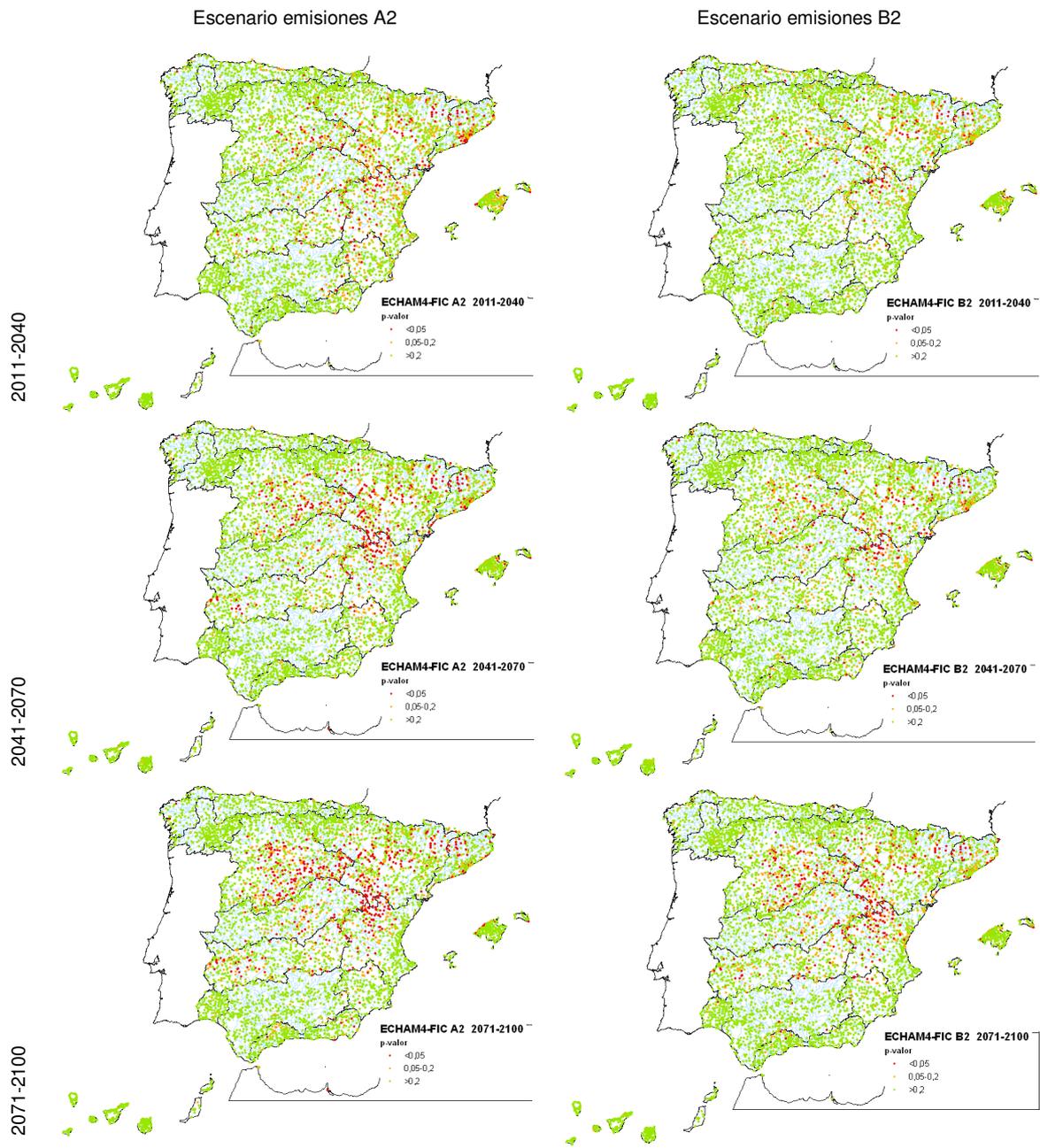


Figura 63. Test Wilcoxon: p-valor en ECHAM4-FIC y periodos de estudio

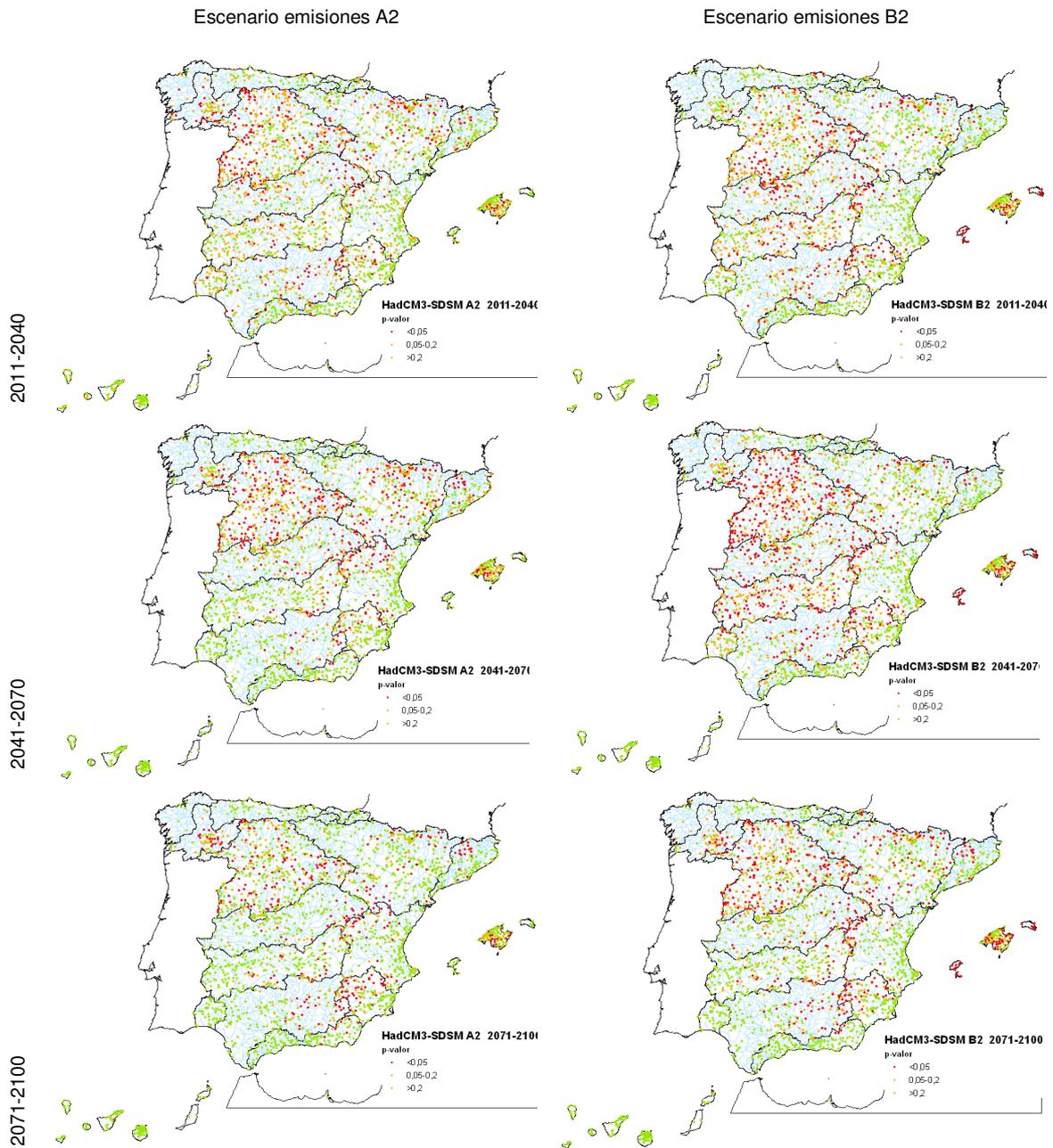


Figura 64. Test Wilcoxon: p-valor en HadCM3-SDSM y periodos de estudio

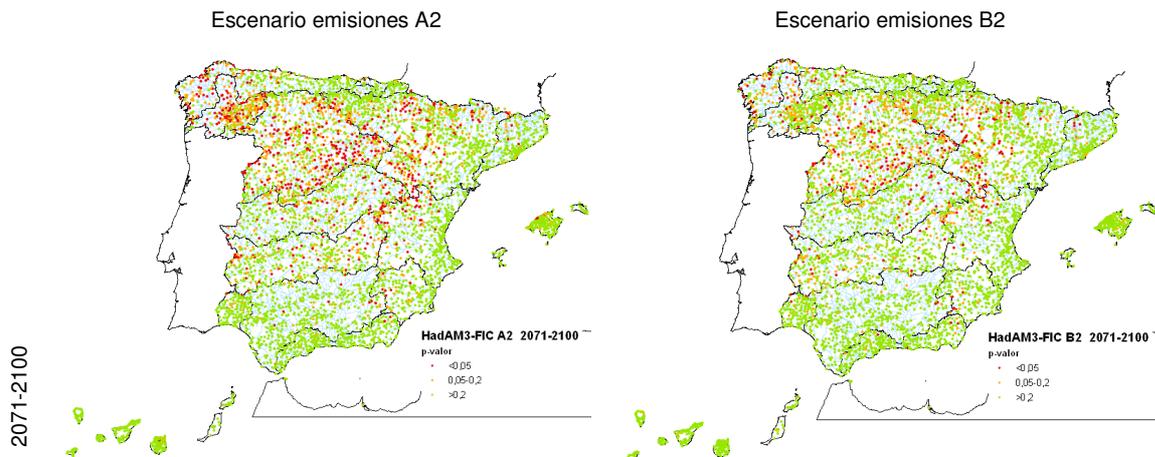


Figura 65. Test Wilcoxon: p-valor en HadAM3-FIC y periodo 2071-2100

Los mapas de aplicar el test binomial a las series PMX en estaciones sobre las regiones climáticas se muestran en las figuras siguientes. Distinguen entre descenso, ascensos o dobles resultados significativos al 5%. Entre proyecciones no se observa un patrón común de cambio. En particular,

- CGCM2-FIC-A2 2011-40 muestra evidencia de un incremento en el este y sureste de la Península. Esta proyección muestra un patrón predominantemente estacionario en 2041-70 y descendente en 2071-2100
- ECHAM4-FIC-A2 da incrementos de PMX en el noreste peninsular en todos los periodos y disminución o estacionariedad en el resto
- HadCM3-SDSM extiende el área de incremento de PMX a gran parte de la Península y Baleares
- Finalmente, HadAM3-FIC muestra un impacto de incremento de PMX hacia el norte de la Península

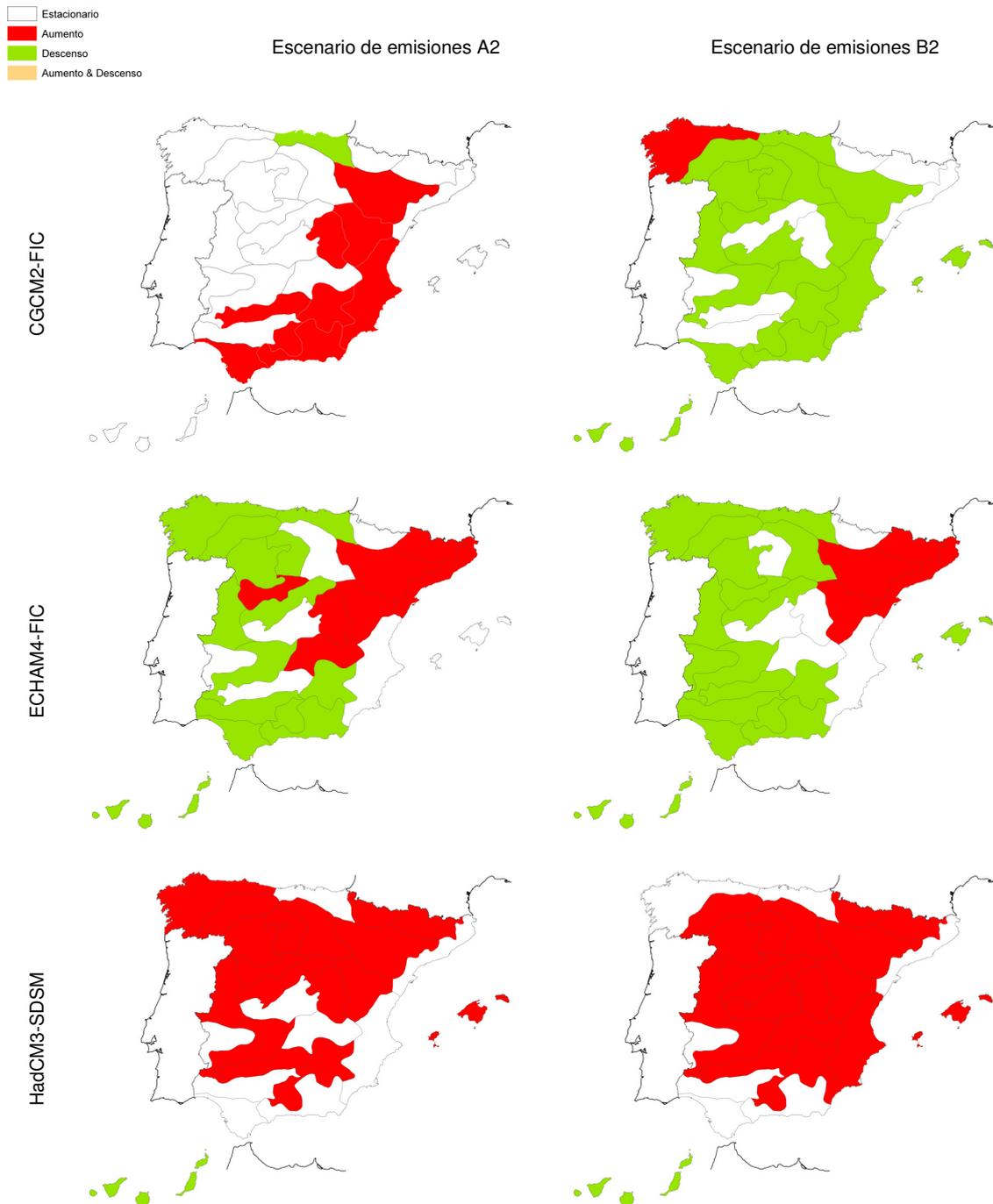


Figura 66. Regionalización del test de Wilcoxon en series PMX de estaciones meteorológicas. 2011-40 vs. 1961-90



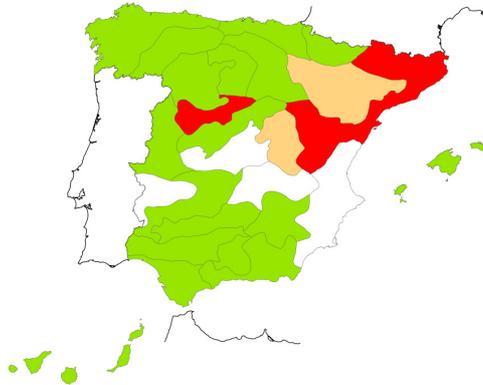
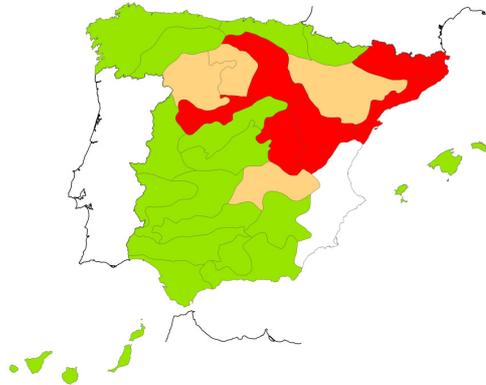
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

CGCM2-FIC



ECHAM4-FIC



HadCM3-SDSM



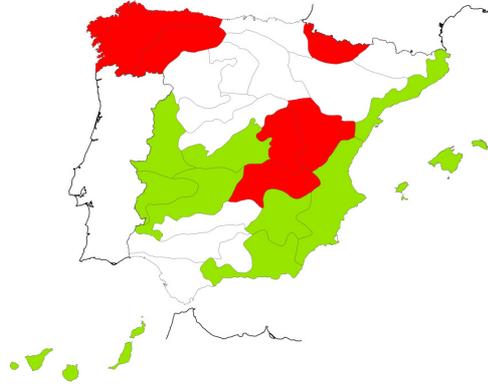
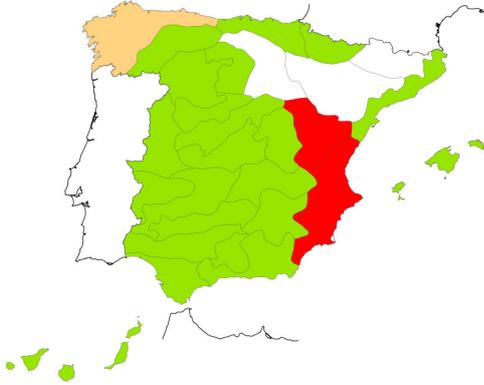
Figura 67. Regionalización del test de Wilcoxon de series PMX en estaciones meteorológicas. 2041-70 vs. 1961-90



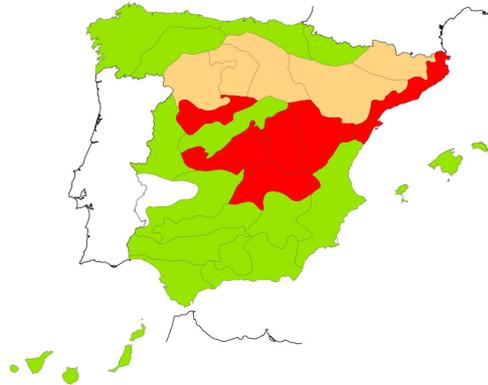
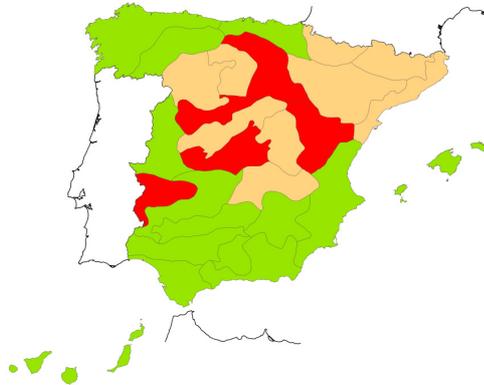
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

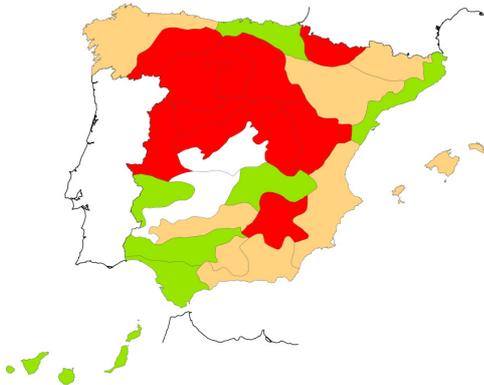
CGCM2-FIC



ECHAM4-FIC



HadCM3-SDSM



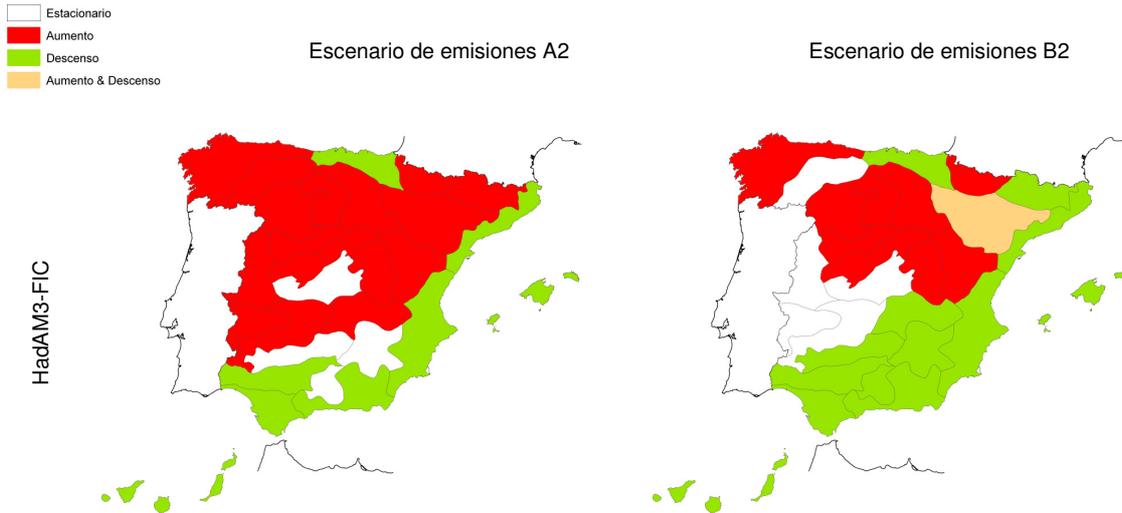
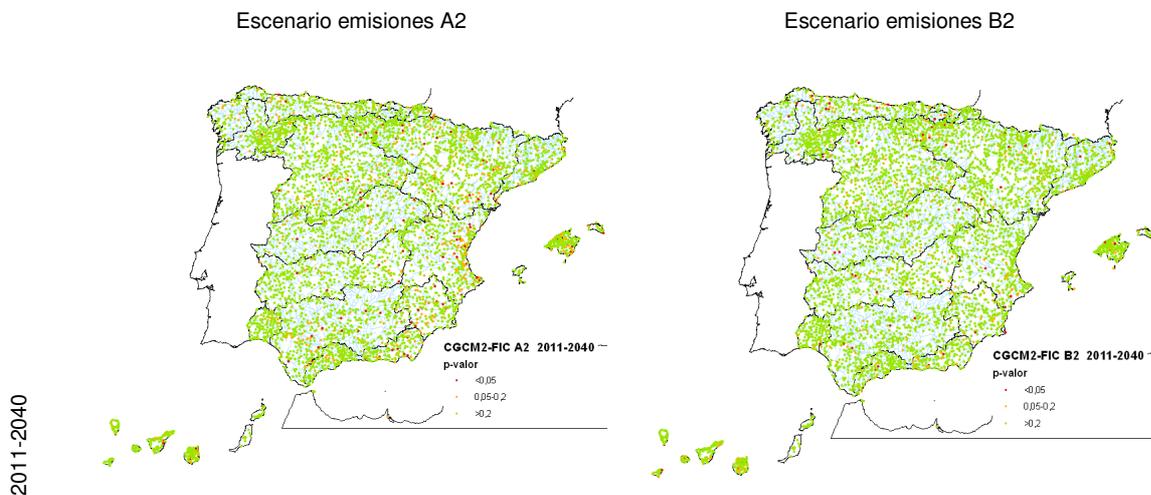


Figura 68. Regionalización del test de Wilcoxon de series PMX en estaciones meteorológicas. 2071-2100 vs. 1961-90

El test de Wilcoxon se ha aplicado también a las series anuales de R95T de cada estación y los resultados se han regionalizado aplicando una binomial como en el caso anterior. La comparación con la aplicación del test a PMX permite observar cómo los aumentos de PMX vienen acompañados del aumento de R95T, pero además hay más zonas con aumento de R95T que de PMX debido al descenso de PRE, lo cual ya fue destacado en el análisis de tendencias del s. XXI.

El test de Fligner Killeen se aplica como indicador de impacto del cambio climático en términos de aumento de la variabilidad de las series de PMX. Según Correa et al (2006), este test presenta suficiente robustez, como paso previo al análisis de cambios espaciales y temporales en los eventos extremos.

Se sigue el mismo esquema expuesto en los párrafos anteriores sobre el test de Wilcoxon, volviéndolo a aplicar a las series de PMX. Las siguientes figuras presentan una menor densidad de estaciones en las que hay un impacto significativo en términos de aumento de varianza. Se concluiría la ausencia de un cambio significativo. CGCM2-FIC muestra una ligera concentración de series con fallo en el sureste. ECHAM4-FIC muestra un ligero impacto en la fachada atlántica.



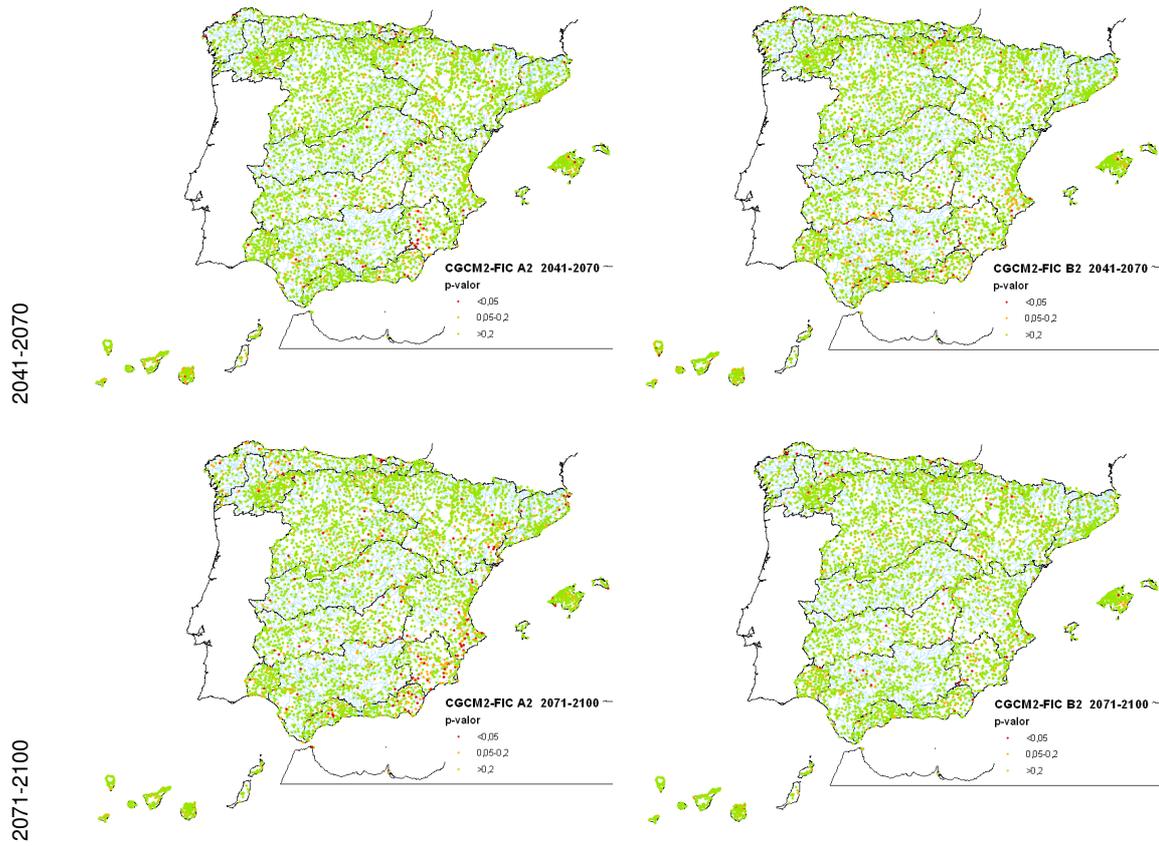
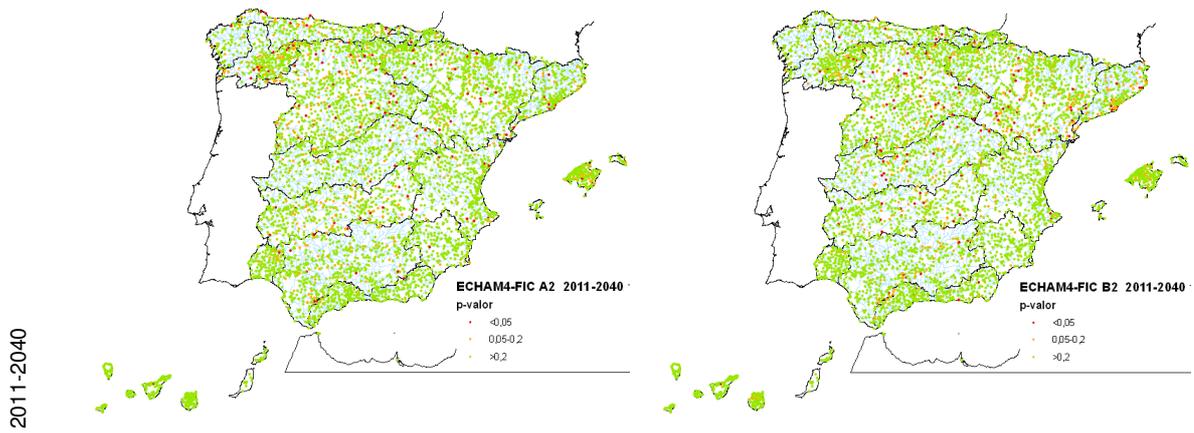


Figura 69. Test Fligner Killeen: p-valor en CGCM2-FIC y periodos de estudio

Escenario emisiones A2

Escenario emisiones B2



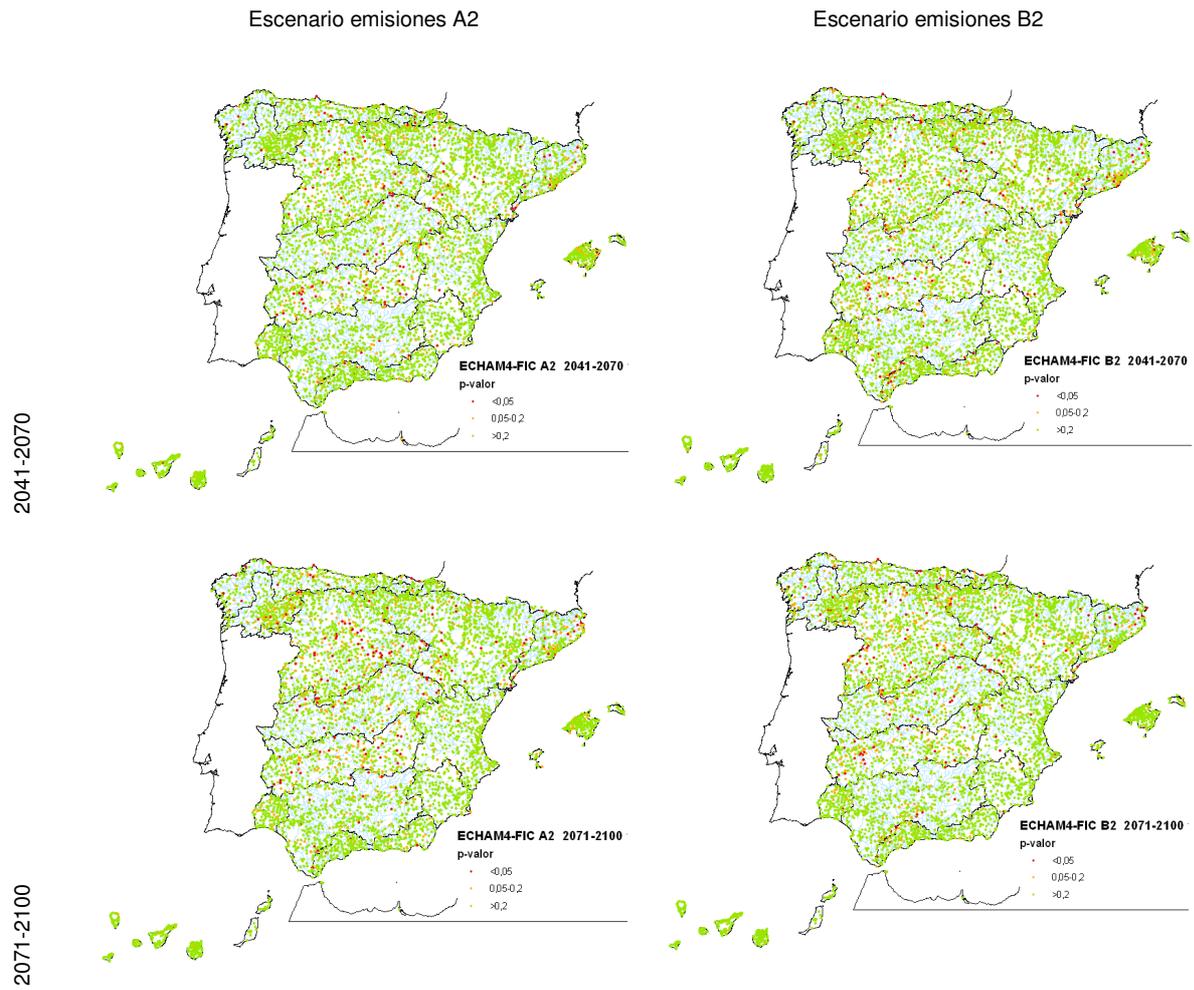
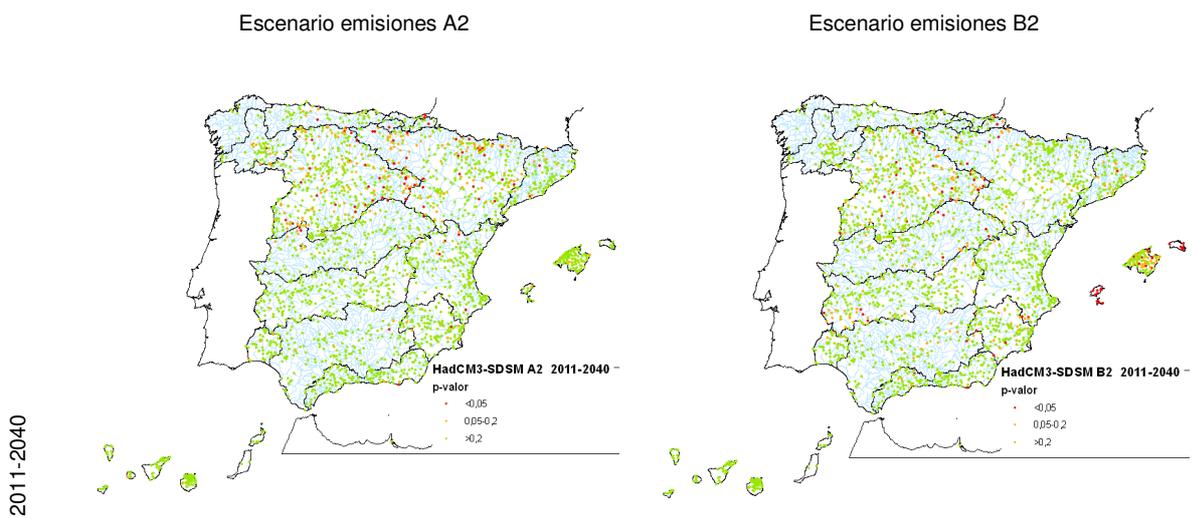


Figura 70. Test Fligner Killeen: p-valor en ECHAM4-FIC y periodos de estudio



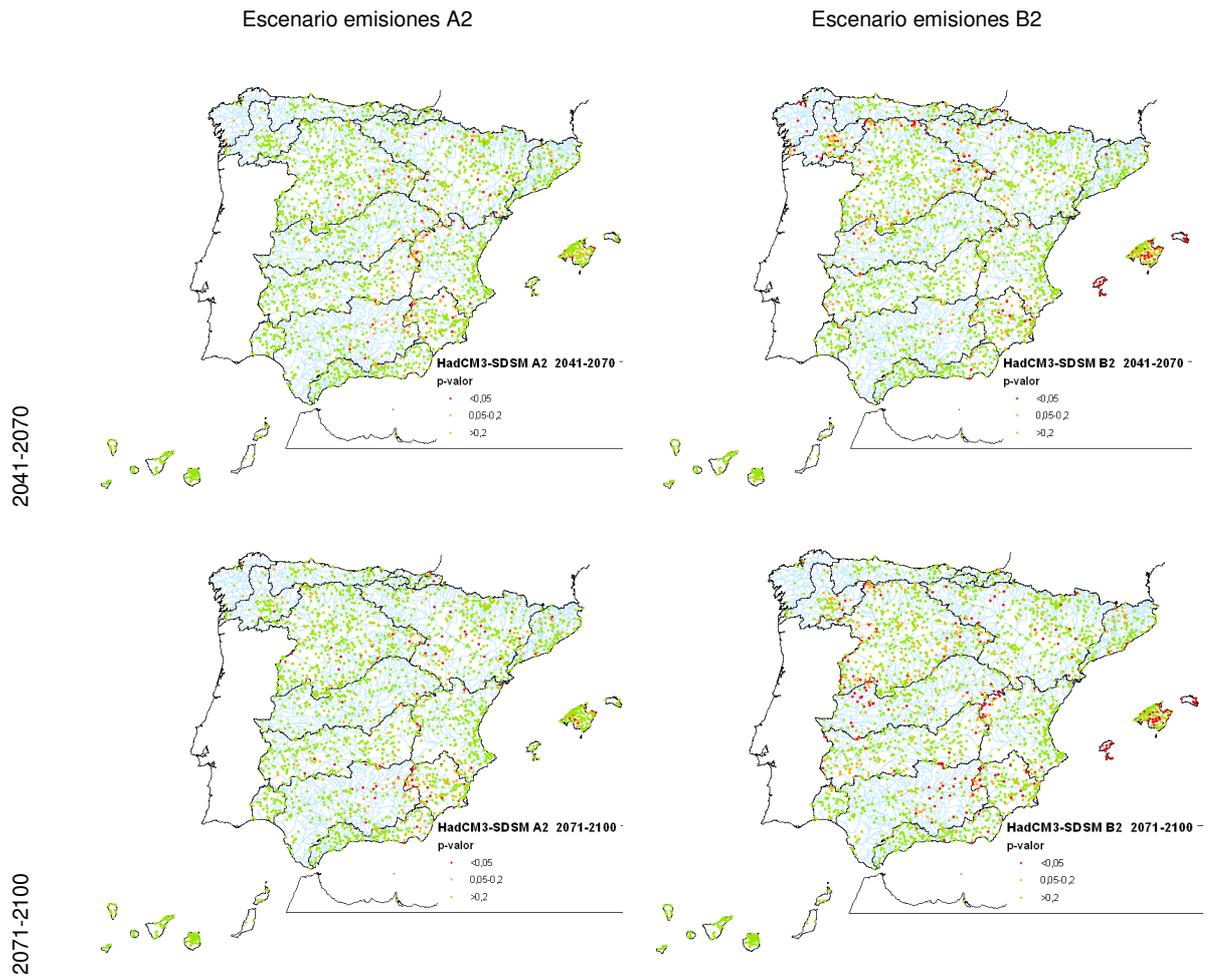


Figura 71. Test Fligner Killeen: p-valor en HadCM3-SDSM y periodos de estudio

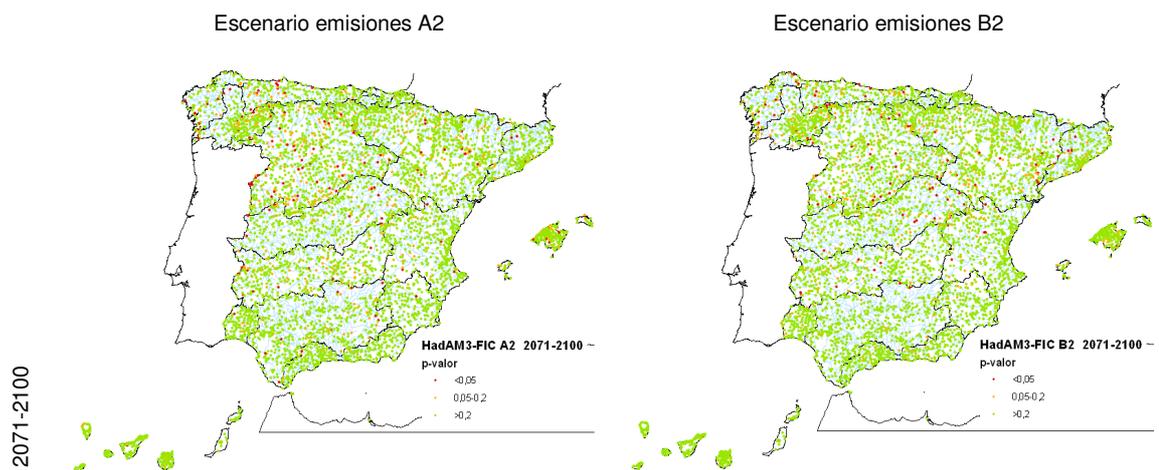


Figura 72. Test Fligner Killeen: p-valor en HadAM3-FIC y periodo 2071-2100

Los mapas de significación regional del test se muestran en las figuras siguientes donde, al igual que con el test de Wilcoxon, se ha distinguido entre cambio hacia un incremento y hacia un descenso de PMX. No hay un acuerdo entre las proyecciones y particularmente muestran resultados tendentes a la estacionariedad o a descensos de la variabilidad en distintas regiones y periodos. Deberían de esperarse similares patrones al compararlos con los resultados del test de Wilcoxon, ya que un incremento de mediana suele corresponderse con un incremento en la varianza, y viceversa. Sin embargo no ocurre de ese modo, lo que podría ser consecuencia del efecto de suavizado provocado por la simulación climática.

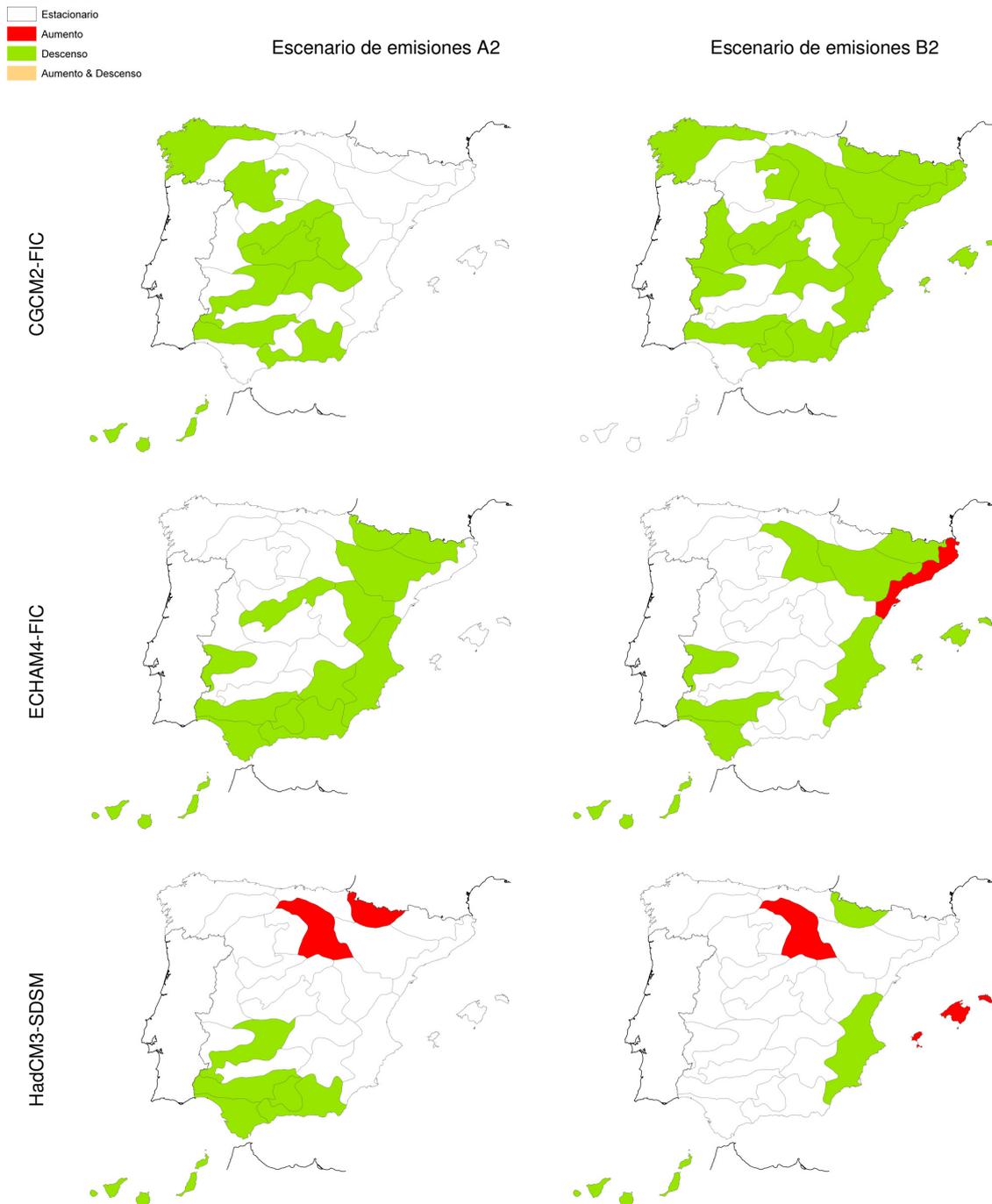


Figura 73. Regionalización del test de Fligner Killeen de series PMX en estaciones meteorológicas. 2011-40 vs. 1961-90



Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

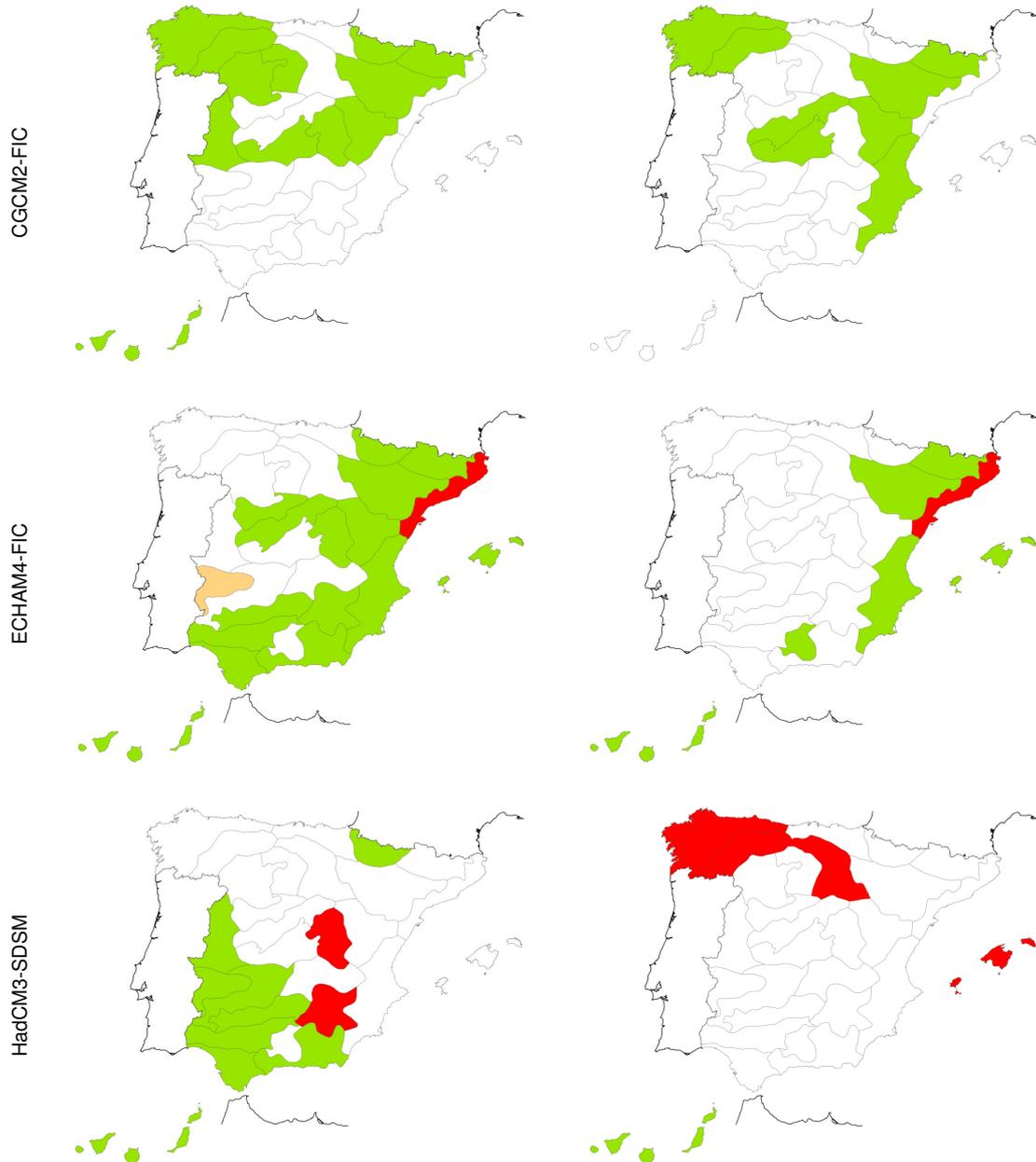


Figura 74. Regionalización del test de Fligner Killeen aplicado a las series PMX en estaciones meteorológicas, 2041-70 vs. 1961-90



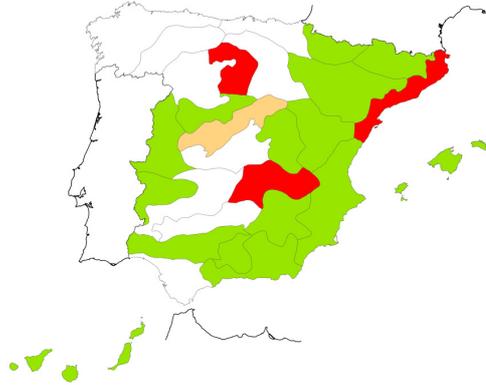
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

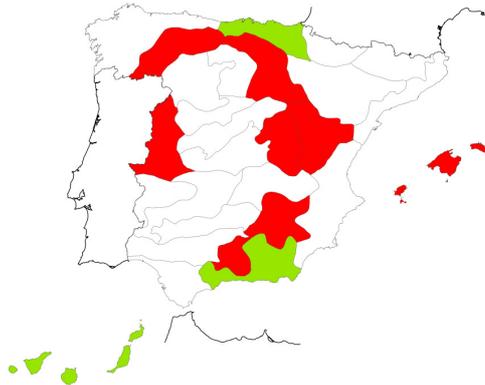
CGCM2-FIC



ECHAM4-FIC



HadCM3-SDSM



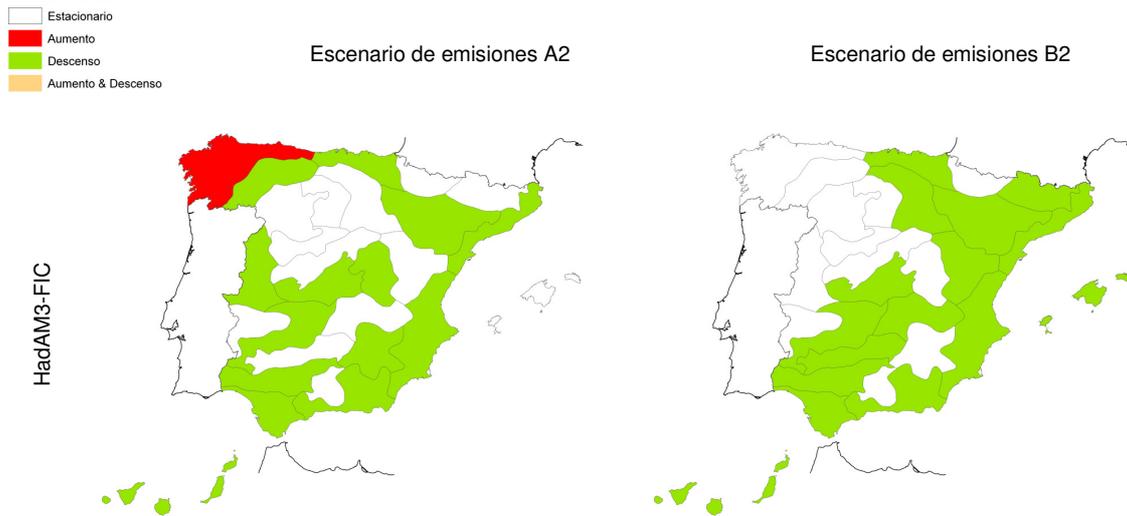


Figura 75. Regionalización del test de Fligner Killeen de series PMX en estaciones meteorológicas. 2071-2100 vs. 1961-90

La conclusión final de la aplicación de los test de homogeneidad sobre la localización y variabilidad de las PMX e índices de torrencialidad como el R95T destacaría en primer lugar la dificultad en encontrar patrones claros de cambio, sin acuerdo entre los resultados alcanzados entre proyecciones y periodos, a pesar de haber realizado tanteos con diferentes variables y criterios.

#### 4.2.3.3 Cambios en la estacionalidad

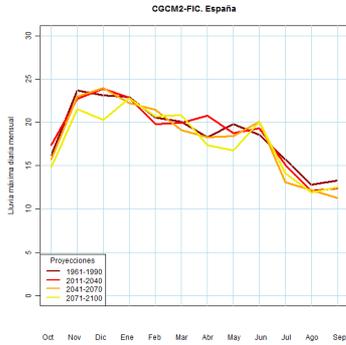
Analizados los cambios en tendencia y ciclos plurianuales, queda determinar qué consecuencias en términos estacionales suponen las diversas proyecciones derivadas de los MCG y regionalización posterior. El indicador estacional de PMX escogido es el número de veces que en cada mes se ha registrado el evento máximo anual. Este índice se ha obtenido para cada uno de los periodos de estudio (1961-90, 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100), de los datos observados y en cada una de las proyecciones y escenarios. El índice se estandariza considerando el número de estaciones y de años de cada periodo.

Las proyecciones futuras no indican que se prevea una variación estacional importante respecto a la estacionalidad del periodo 1961-1990 de cada proyección. Ni siquiera entre los escenarios A2 y B2 hay diferencias llamativas en la evolución mensual de PMX. En la siguiente figura se muestran las evoluciones de PRE máxima mensual en España y las regiones noroeste Peninsular y Levante, para cada una de las cuatro proyecciones. La secuencia de filas corresponde a escenarios A2 y B2.

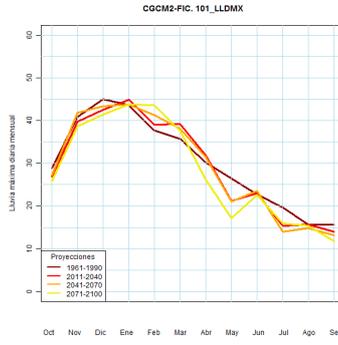
Según estas figuras, excepto en el caso de ECHAM4-FIC en el Levante, la variación estacional respecto a la estacionalidad de cada proyección en el periodo 1961-1990 es escasa y parece más importante la dispersión de resultados entre proyecciones y respecto a los valores observados.

Escenario A2

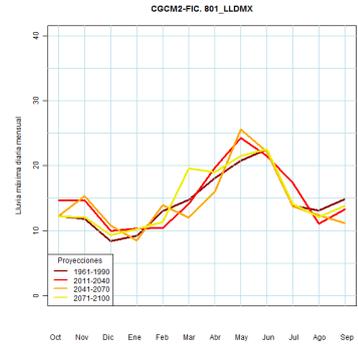
España



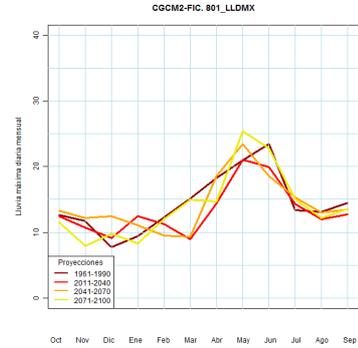
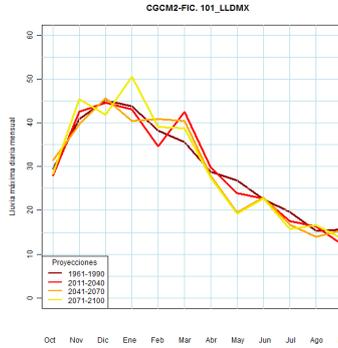
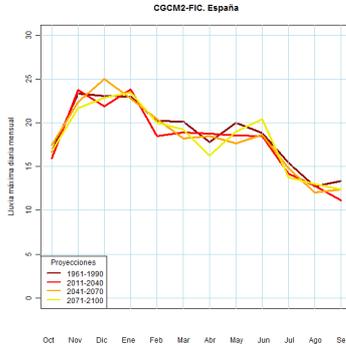
101 (NO)



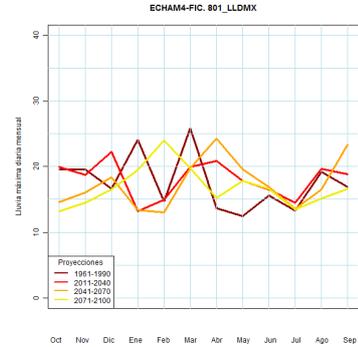
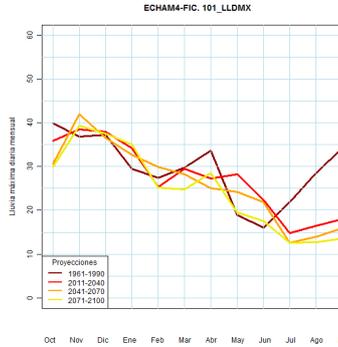
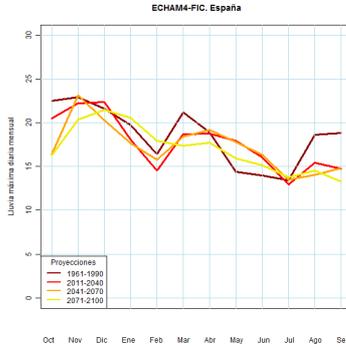
801 (Levante)



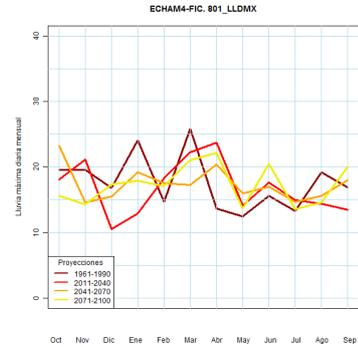
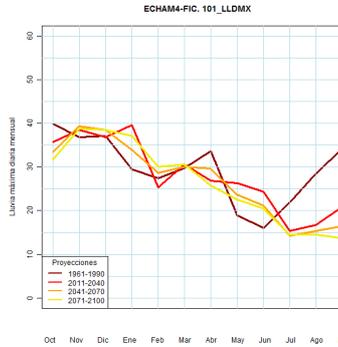
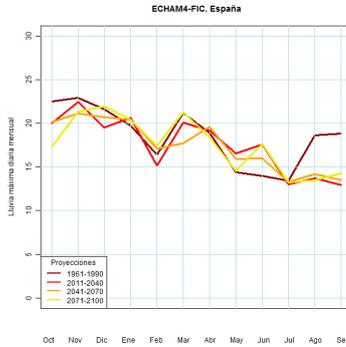
Escenario B2



Escenario A2



Escenario B2



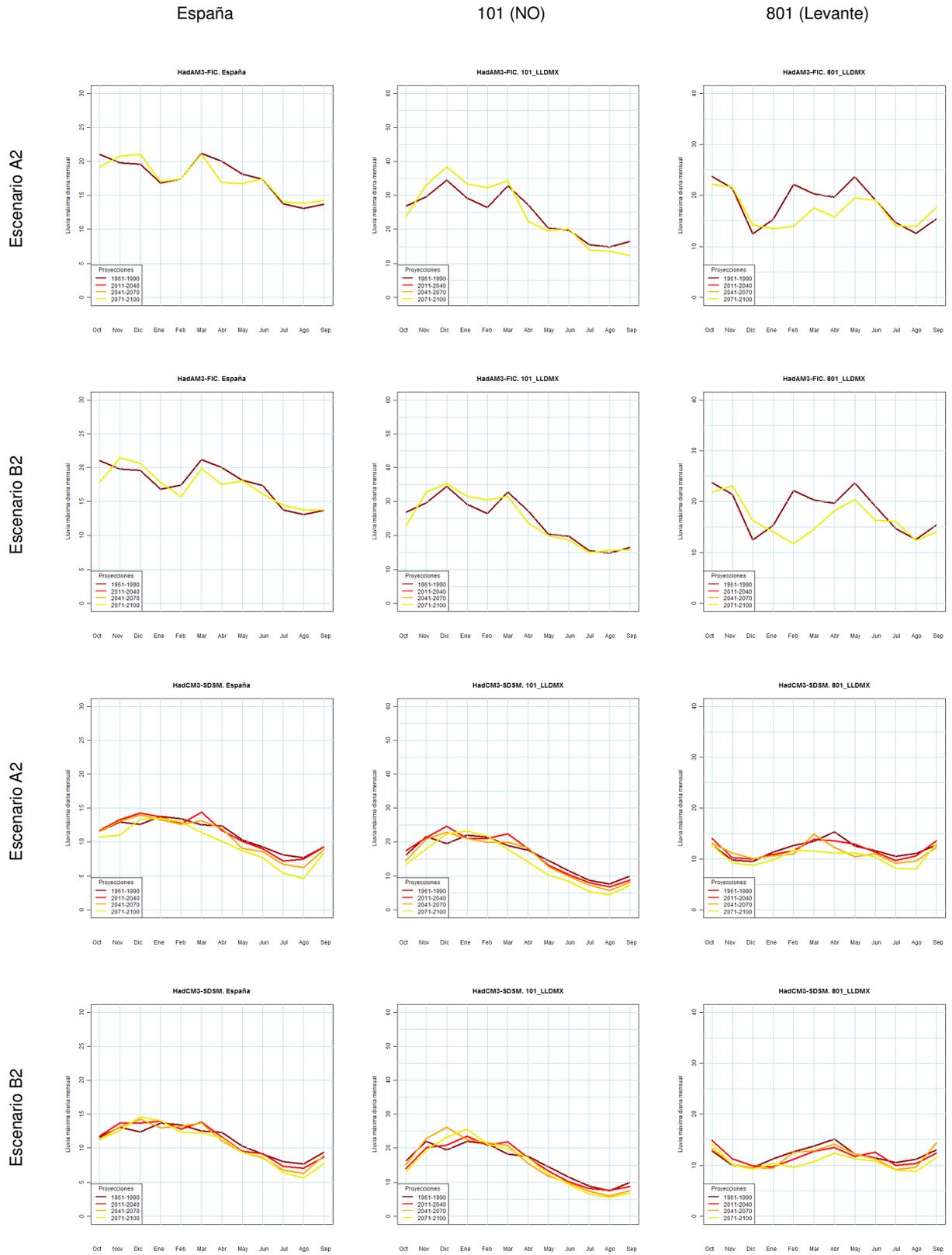


Figura 76. Ciclos estacionales de PMX en proyecciones a lo largo del s. XXI (mm)

## 5 FASE ATMOSFÉRICA

Los datos básicos de partida para el análisis del impacto en el ciclo hidrológico lo constituyen los datos climáticos del conjunto de proyecciones seleccionadas por AEMET (2008). Previamente a la implementación del modelo hidrológico, se ha examinado la similitud de las proyecciones de partida y de los datos observados durante el periodo común de información o periodo de control, 1961-1990. Las variables climáticas contrastadas son la PRE y la TEM, semisuma de las TMX y TMN. Ese contraste se ha realizado sólo con aquellas estaciones con datos en todas las proyecciones climáticas y con un número suficiente de años completos con registros en la base de datos HIDRO. El contraste se ha realizado directamente con datos simulados de las proyecciones FIC y SDSM en estaciones con la finalidad de no introducir ningún sesgo que pudiera originarse en el tratamiento posterior de las variables. Se han calculado las medias en España de las series registradas, así como de las correspondientes a las simulaciones y, finalmente, se han comparado los resultados y calculado la diferencia relativa en el caso de las PRE y las diferencias absolutas en el de las TEM. Además, se ha analizado la evolución temporal de los valores mensuales simulados, tanto en esa selección de estaciones como en el conjunto de estaciones con datos simulados.

Las series de mapas (desde enero de 1961 a diciembre de 1990 y desde enero de 2011 hasta diciembre de 2100) de PRE, TMX y TMN se han estimado por interpolación apoyada en mapas-patrón que representan la variabilidad espacial de la media y la desviación típica mensual, función de orografía, distancia a la costa y orientación del territorio. Inicialmente estos mapas-patrón se estimaron para la evaluación de recursos hídricos en España como parte de los trabajos de la *Encomienda de Gestión entre la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad (Dirección General Del Agua) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), del Ministerio de Fomento, para la Realización de Asistencia Técnica, Investigación y Desarrollo Tecnológico en la Obtención de Información para un Uso Sostenible del Agua*. Para este trabajo se han reescalado proporcionalmente a las series regionalizadas de las proyecciones. El número total de patrones se representa en la siguiente tabla.

VARIABLES	Nº de pasos temporales	Periodos temporales de 30 años	Escenarios de emisiones	Total mapas-patrón
Precipitación (PRE) y temperaturas máxima (TMX) y mínima (TMN)	Medio mensual	4 periodos en 3 proyecciones CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM  2 periodos en 3 proyecciones HadAM3-FIC, ECHAM4-RCAO y HadCM3-PROMES	A2 y B2 solamente en los periodos del s. XXI	
3	12	18	2	1080

Tabla 14. Número de patrones estimados para interpolación

En cada mes se superpone el mapa-patrón a los residuos interpolados por inverso de la distancia al cuadrado. Los residuos se obtienen por normalización considerando las medias y desviaciones típicas mensuales de cada mapa-patrón. Los resultados de la interpolación se agregaron en mapas de valores totales anuales, medios mensuales y anuales por periodo.

## 5.1 Precipitación

### 5.1.1 Interpolación de precipitación

El procedimiento de interpolación se apoya en patrones mensuales de medias y desviaciones típicas que permiten extrapolar los datos de las proyecciones a la totalidad del territorio. En cada mes de cálculo se interpolan por inverso de distancia al cuadrado los residuos procedentes de una normalización mensual que tiene en cuenta el valor de media y desviación típica media mensual de cada mapa-patrón. En cada proyección y periodo se estiman los nuevos patrones mensuales, proporcionalmente a los datos de estación o rejilla.

#### 5.1.1.1 Proyecciones climáticas con datos en estaciones

Las proyecciones FIC y SDSM dan resultados escalados en estaciones meteorológicas. Los patrones para la interpolación se obtuvieron siguiendo el siguiente proceso:

1. Selección de estaciones meteorológicas en función de una disponibilidad mínima de datos. Se consideraron 795 estaciones en las proyecciones por regionalización FIC y 29 años hidrológicos de datos diarios completos en las series observadas. Éste último criterio se rebajó de 29 a 25 años completos para trabajar con 1.138 series de estaciones meteorológicas de las proyecciones SDSM

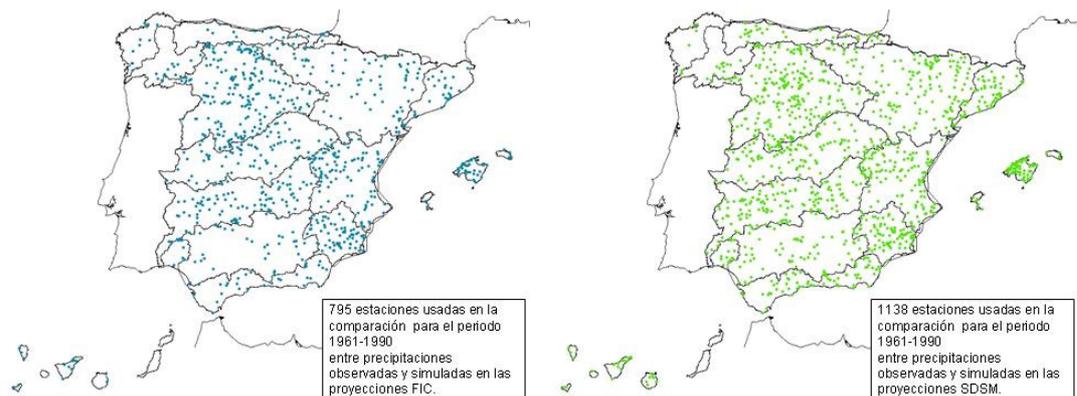


Figura 77. Selección de estaciones para el cálculo de patrones de PRE mensual

2. Obtención de los estadísticos media y desviación típica mensual de cada serie observada y proyectada durante el periodo 1960/61 y 1990/91. Cálculo de los cocientes de estadísticos procedentes de las proyecciones y de las series observadas
3. Interpolación de los cocientes por inverso distancia al cuadrado y multiplicación por los mapas-patrón de referencia. Mediante el paso anterior se obtuvieron mapas patrones de PRE simulada para cada mes, para el conjunto del periodo de 1961 a 1990 y para cada una de las proyecciones FIC y SDSM. En la siguiente figura se muestran los patrones para la proyección climática CGCM2-FIC para meses representativos del comportamiento estacional

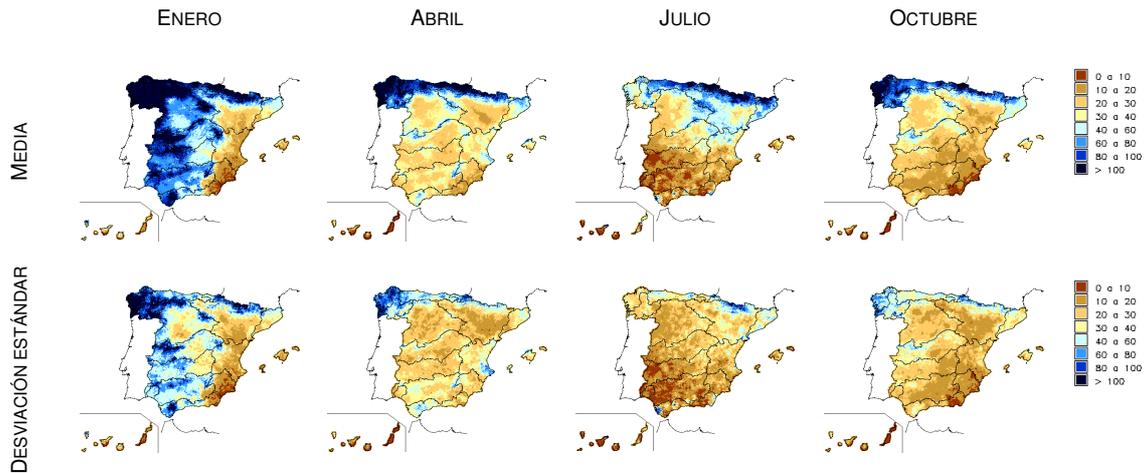


Figura 78. Patrones de PRE (mm) 1961-1990 para CGCM2-FIC

4. Cálculo de los cocientes entre estadísticos de periodos del s. XXI y el correspondiente al periodo de control de su misma proyección. Calculados estos cocientes, se obtiene un mapa por interpolación que permite trasladar proporcionalmente el resultado anterior a cada uno de los periodos del s. XXI: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100. Entre proyecciones, se trabajó con todas las series disponibles, 5.579 (FIC) y 2.319 (SDSM).

En la siguiente figura se muestran los patrones de medias y desviaciones estándar para la proyección climática CGCM2-FIC, mes de octubre y los tres periodos futuros.

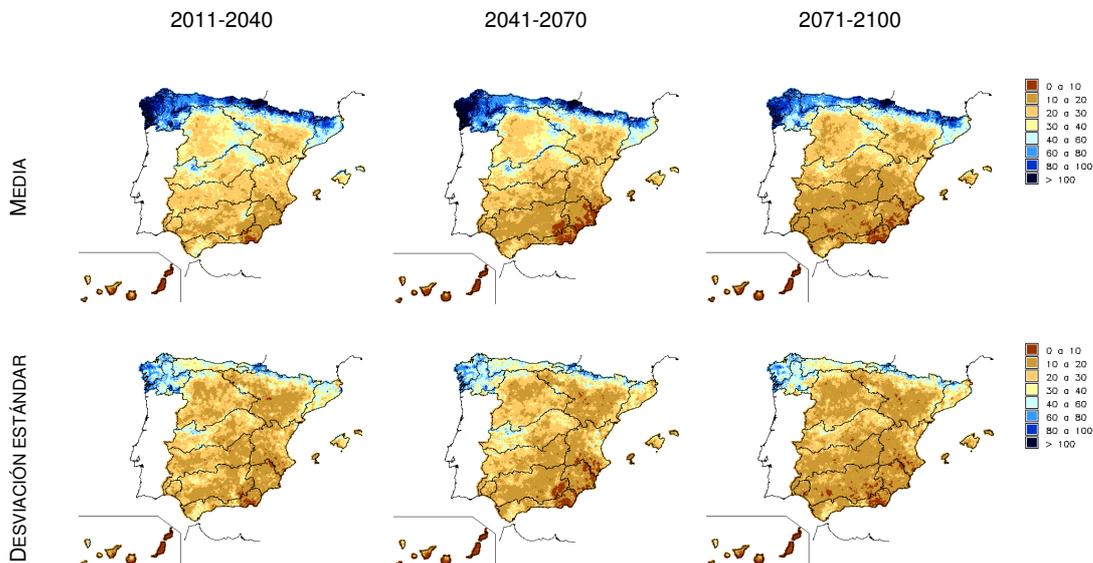


Figura 79. Patrones de PRE (mm) octubre para CGCM2-FIC-A2

Finalmente se obtuvieron, mediante interpolación por residuos normalizados, mapas de PRE mensual desde enero de 1961 hasta diciembre de 1990 de CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC, HadCM3-SDSM y HadAM3-FIC; de enero de 2011 a diciembre de 2100 con CGCM2-FIC y ECHAM4-FIC; de enero de 2011 a diciembre de 2099 con HadCM3-SDSM; y de enero de 2071 a diciembre de 2100 con HadAM3-FIC. Todo ello en los escenarios climáticos A2 y B2. En total se generaron 10.056 mapas mensuales de PRE de proyecciones regionalizadas por análogos FIC y regresión SDSM.

### 5.1.1.2 Proyecciones climáticas con datos en rejilla

Los datos de PRE aportados por las proyecciones del proyecto PRUDENCE proceden de una rejilla centrada en la Península Ibérica y que deja fuera a las Islas Canarias, con un total de 988 celdas de 0,5º de resolución en coordenadas geográficas. Para utilizarlos en el presente proyecto, se requiere proyectar estos mapas de PRE a una rejilla de celdas de 1 km<sup>2</sup> en coordenadas UTM, lo que constituiría en sí una técnica de downscaling conservativa en los estadísticos. Este proceso se ha llevado a cabo en los siguientes pasos:

1. En cada celda de la rejilla PRUDENCE, se calculó el valor medio correspondiente a los 12 mapas de patrones mensuales de referencia de PRE observada. Estos valores medios se asociaron a las coordenadas de cada celda y se interpolaron sobre una rejilla de 1 km<sup>2</sup> mediante un planteamiento variacional (Mitasova y Mitas, 1993; Mitasova y Hofierka 1993; Mitas y Mitasova, 1988) del que se obtiene una superficie suavizada. Del cociente entre el primer y el último mapa de la siguiente figura, se obtiene el factor por el que hay que multiplicar cada celda de los mapas medios de ECHAM4-RCAO y HadCM3-PROMES y obtener un patrón de PRE mensual proyectado en la escala de trabajo.

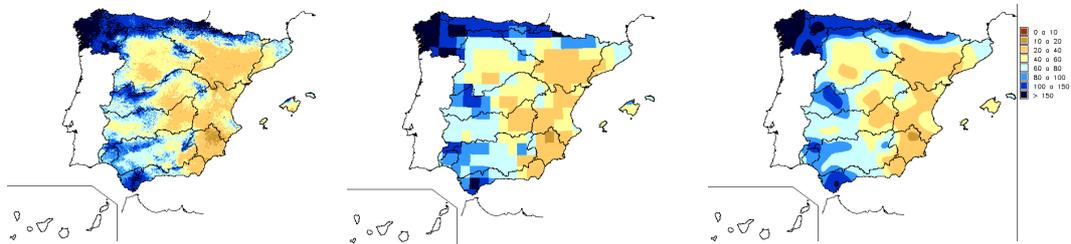


Figura 80. Adaptación patrón de PRE (mm) en rejilla PRUDENCE (centro) y suavizado (dcha)

2. La obtención de los mapas de PRE mensual usan el planteamiento variacional para interpolar los residuos mensuales de ECHAM4-RCAO y HadCM3-PROMES, desde el centro de la celda. Los mapas de residuos se adaptan finalmente a los patrones para obtener los 2880 mapas mensuales de PRE

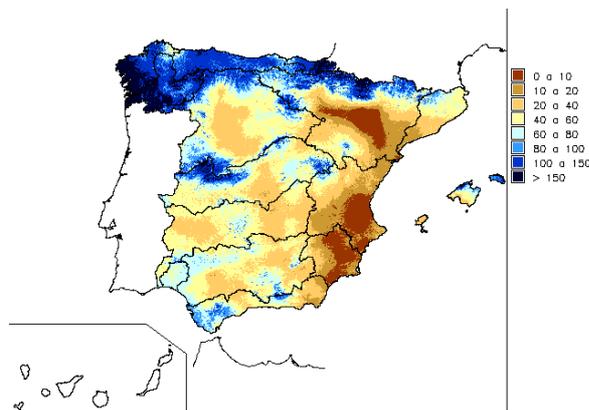


Figura 81. PRE proyectada desde celdas PRUDENCE a la escala equivalente a celdas de 1 km<sup>2</sup>. Enero 2080, HadCM3-PROMES-A2

## 5.1.2 Resultados

La PRE presenta gran variabilidad respecto al resto de variables del ciclo hidrológico. Los resultados de las técnicas de interpolación presentadas en el apartado anterior son series de mapas mensuales que cubren los periodos temporales desde enero de 1961 hasta diciembre de 1990 y desde enero de 2011 hasta diciembre de 2100. El objetivo de estos procedimientos es proyectar espacialmente los resultados de las proyecciones objeto de este trabajo hasta la escala de 1 km<sup>2</sup>, respetando los valores de los estadísticos principales sin introducir ni corregir sesgo alguno. La agregación espacial de los mapas anuales en España permite contemplar la evolución media de las proyecciones. En la figura siguiente se muestra la evolución de las PRE anuales estimadas para el periodo de control (en verde) y para el s. XXI según el escenario A2 (en rojo) y B2 (en verde). En trazo grueso se muestran las medias de las proyecciones A2 y B2.

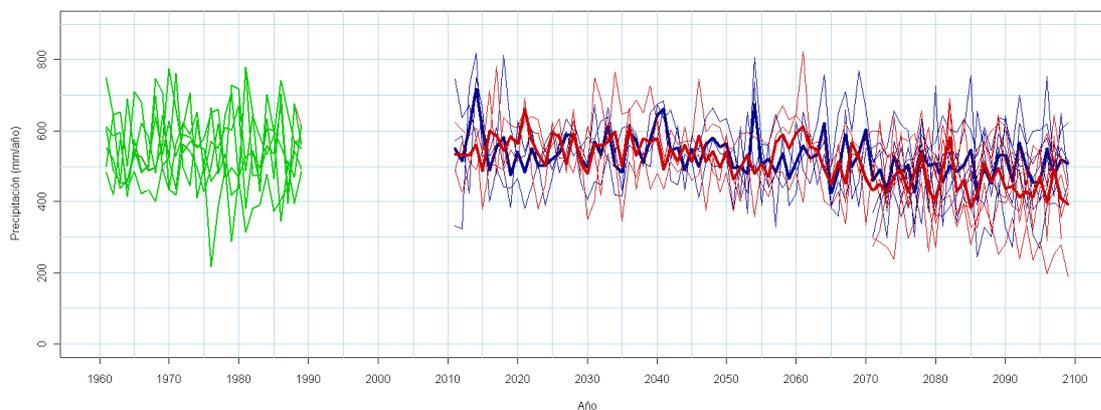


Figura 82. Series de PRE anual en España. Escenarios A2 (rojo) y B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

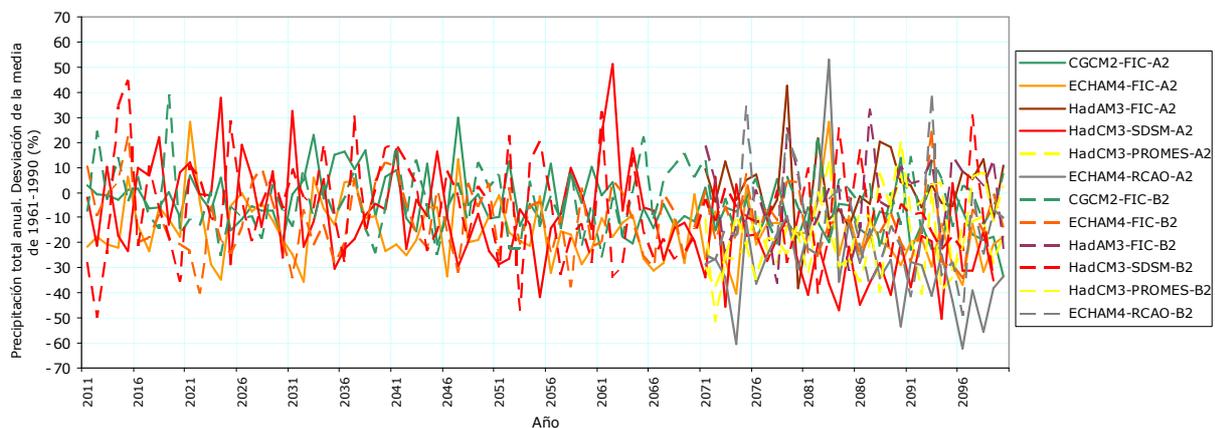


Figura 83.  $\Delta$  PRE anual (%) en España

La PRE en España muestra entonces una tendencia general decreciente respecto a los valores alcanzados durante los treinta años del periodo de control, aunque hay singularidades dependientes del periodo, proyección y escenario. La tendencia decreciente es suave o estacionaria durante el 1<sup>er</sup> periodo de análisis, 2011-2040, y se hace más acusada conforme avanza el siglo XXI. En este periodo y en la fachada mediterránea de la Península, CGCM2-FIC y ECHAM4-FIC dan aumentos de PRE que se pueden mantener a lo largo de otros periodos del s. XXI. En el periodo 2071-2100, solamente HadAM3-FIC-A2,

produce un ligero aumento de PRE, más destacado en las cuencas del Duero y Ebro. Las disminuciones globales más pronunciadas se dan en este último periodo y corresponden a HadCM3-SDSM-A2, con un 26% y HadCM3-PROMES-A2, con un 28%, considerando valores medios en España. Otro de los aspectos destacables es la evolución similar que se encuentra en las proyecciones de los escenarios A2 y B2 hasta el 3<sup>er</sup> periodo de análisis del siglo XXI. Es entonces cuando los escenarios A2 aparecen más desfavorables que los B2, salvo en el caso de HadAM3-FIC del que ya se ha mencionado que la proyección en el escenario A2 arroja un incremento del 2%, mientras que la B2 es decreciente con un valor de desviación del 2%. La siguiente figura muestra los valores de las desviaciones porcentuales medias alcanzadas en España. En rojo se muestra los resultados de las proyecciones en escenario A2 y en azul, las B2. Los resultados numéricos por D.H. se muestran en la tabla siguiente.

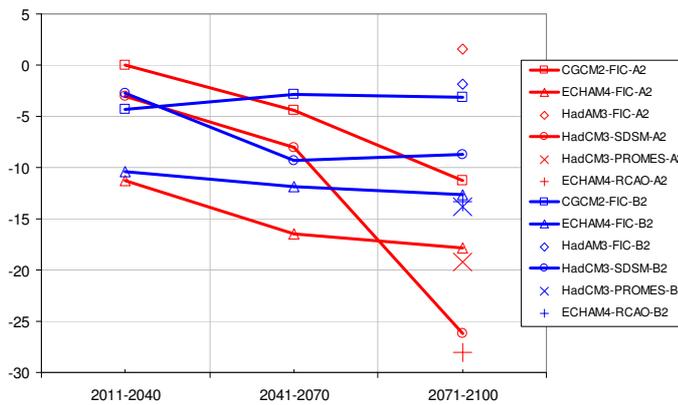


Figura 84.  $\Delta$  PRE anual (%) en España en periodos s. XXI

La distribución espacial de las variaciones de las distintas proyecciones se puede contemplar en el primer Anexo que acompaña al informe. Los MCG CGCM2 y ECHAM4 en las proyecciones FIC y RCAO presentan disimetrías entre la fachada atlántica y la mediterránea, asociada a la rejilla de los modelos climáticos globales. En la primera disminuye la PRE y en la segunda aumenta. Las proyecciones derivadas del HadAM3 y HadCM3, SDSM y PROMES, presentan un gradiente de descensos de PRE norte sur, con los menores valores en la costa mediterránea. Las siguientes figuras se han obtenido mediante los promedios del conjunto de proyecciones de cada escenario.

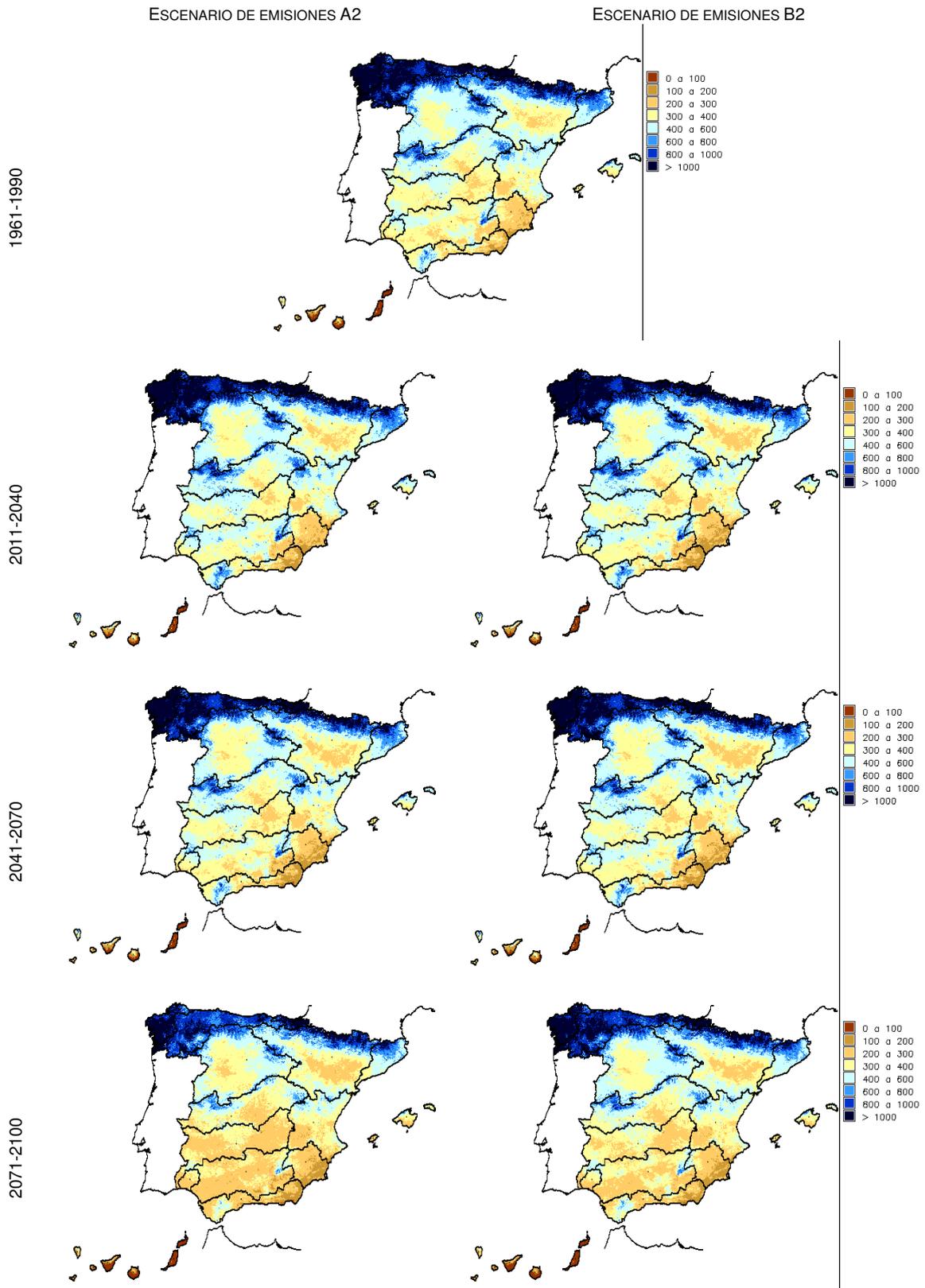


Figura 85. PRE anual (mm) para el periodo de control y periodos del s. XXI

Las desviaciones de PRE media anual respecto a la correspondiente del periodo de control se muestran en la figura siguiente. Las reducciones más importantes se sitúan en la parte atlántica y suroeste de la Península y Canarias, mientras que en la fachada mediterránea pueden aparecer áreas con incrementos temporales de PRE. El periodo más desfavorable es el de final de siglo, 2071-2100.

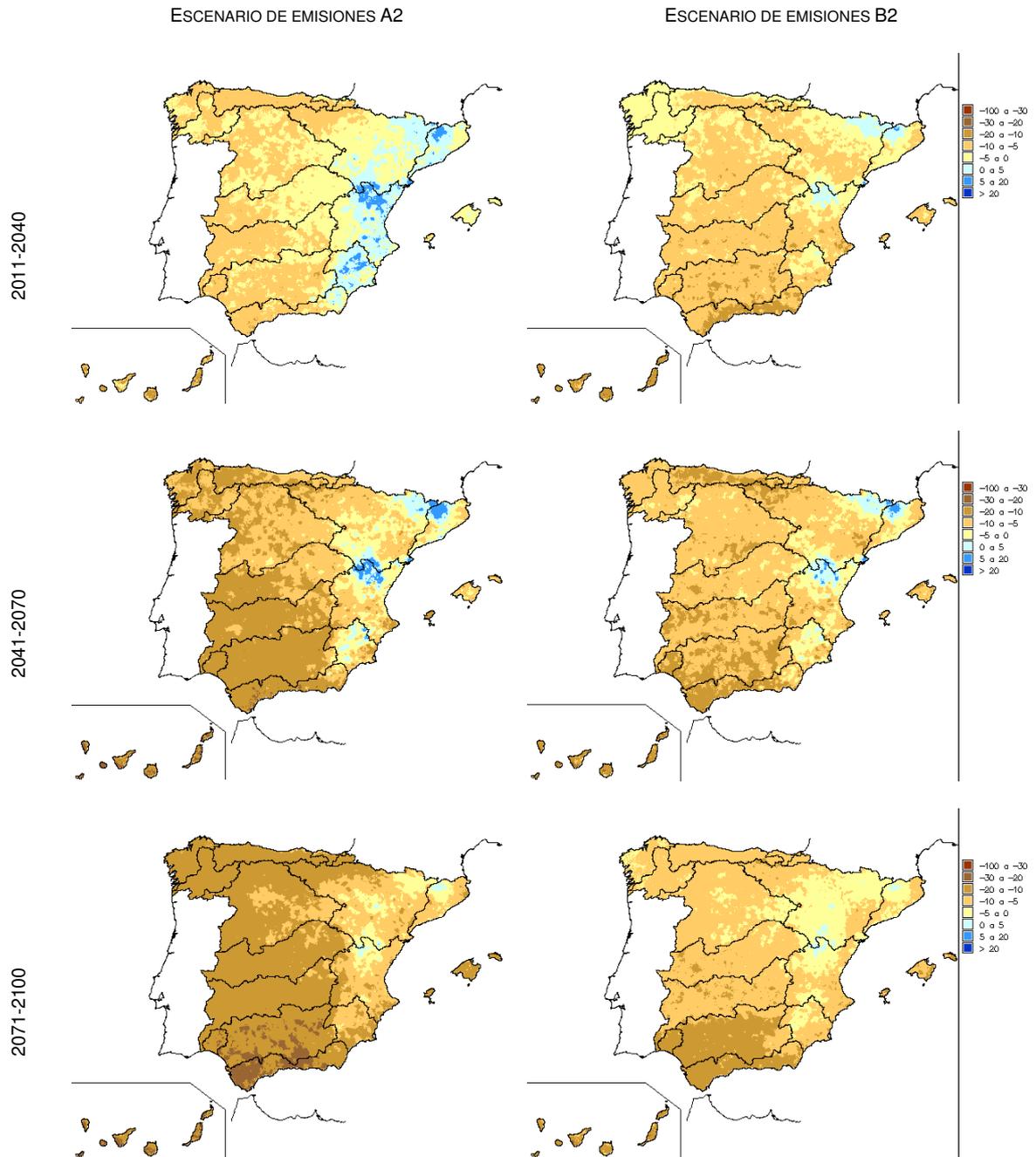


Figura 86.  $\Delta$  PRE anual (%) por periodo del s. XXI respecto al periodo de control

El patrón de distribución espacial reflejado en los mapas también se muestra en la siguiente tabla con las desviaciones agregadas por D.H.

		Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	2011-2040	0	-11		-3			-5	-4	-10		-3			-6
	2041-2070	-4	-16		-8			-9	-3	-12		-9			-8
	2071-2100	-11	-18	2	-26	-19	-28	-17	-3	-13	-2	-9	-14	-13	-9
Cantábrico	2011-2040	-4	-12		-7			-8	-3	-8		-5			-6
	2041-2070	-2	-16		-12			-10	-4	-13		-14			-10
	2071-2100	-7	-25	2	-27	-18	-32	-18	0	-17	-3	-10	-13	-18	-10
Galicia-Costa	2011-2040	-2	-14		-2			-6	1	-9		-3			-3
	2041-2070	-4	-23		-6			-11	-4	-15		-5			-8
	2071-2100	-14	-27	5	-20	-12	-24	-16	-2	-18	1	-1	-8	-10	-6
CI País Vasco	2011-2040	-2	-9		-5			-6	-2	-6		-4			-4
	2041-2070	0	-12		-10			-7	-2	-10		-12			-8
	2071-2100	-2	-21	0	-22	-23	-32	-15	3	-14	-6	-9	-17	-20	-9
Miño-Sil	2011-2040	-2	-15		-1			-6	0	-10		0			-3
	2041-2070	-5	-24		-3			-10	-4	-16		-3			-7
	2071-2100	-14	-28	7	-18	-13	-29	-17	-2	-19	2	2	-8	-13	-6
Duero	2011-2040	-1	-13		-4			-6	-4	-12		-3			-6
	2041-2070	-6	-19		-5			-10	-4	-14		-8			-8
	2071-2100	-12	-18	7	-25	-13	-31	-16	-3	-14	4	-5	-10	-15	-8
Tajo	2011-2040	0	-14		-2			-5	-5	-14		-1			-7
	2041-2070	-7	-21		-5			-11	-4	-14		-7			-8
	2071-2100	-15	-19	1	-27	-21	-33	-19	-6	-14	-1	-6	-15	-14	-9
Guadiana	2011-2040	-1	-15		-3			-6	-7	-17		-1			-8
	2041-2070	-8	-22		-9			-13	-4	-15		-10			-9
	2071-2100	-17	-21	-2	-31	-26	-34	-21	-8	-15	-4	-10	-18	-15	-11
Guadalquivir	2011-2040	0	-17		-2			-6	-10	-17		1			-9
	2041-2070	-8	-25		-11			-15	-3	-16		-11			-10
	2071-2100	-20	-25	-7	-32	-30	-30	-24	-10	-18	-9	-12	-20	-14	-14
CI Andalucía	2011-2040	-1	-17		-3			-7	-9	-18		-2			-10
	2041-2070	-9	-25		-15			-16	-4	-16		-14			-11
	2071-2100	-21	-25	-13	-35	-31	-25	-25	-12	-19	-13	-18	-21	-13	-16
Segura	2011-2040	6	-3		-2			0	-11	-7		-1			-6
	2041-2070	-1	-7		-9			-6	0	-8		-8			-6
	2071-2100	-1	-10	-8	-20	-29	-12	-14	-2	-4	-9	-14	-19	-3	-9
Júcar	2011-2040	5	0		-2			1	-9	-5		-4			-6
	2041-2070	-1	-3		-9			-4	-1	-3		-9			-5
	2071-2100	-2	-3	-3	-24	-25	-13	-12	-2	-1	-5	-14	-20	-2	-8
Ebro	2011-2040	2	-7		-4			-3	-3	-6		-5			-4
	2041-2070	0	-8		-9			-5	0	-7		-12			-6
	2071-2100	-4	-8	7	-28	-17	-27	-13	2	-7	2	-12	-12	-14	-7
CI Cataluña	2011-2040	4	1		-2			1	-3	0		-5			-3
	2041-2070	1	2		-6			-1	0	1		-10			-3
	2071-2100	-2	3	-1	-20	-18	-17	-9	-1	3	-5	-11	-15	-7	-6
Islas Baleares	2011-2040	-2	-6		-1			-3	-10	-10		-3			-7
	2041-2070	-4	-12		-6			-8	-4	-10		-11			-9
	2071-2100	-8	-21	-15	-25	-15	-19	-18	-8	-13	-18	-11	-12	-9	-12
Canarias	2011-2040	-4	-20		-4			-10	-9	-17		-15			-14
	2041-2070	-10	-22		-24			-19	-5	-20		-20			-16
	2071-2100	-16	-27	-20	-36			-25	-11	-20	-18	-33			-20

**PRECIPITACIÓN:** Incrementos (%) de medias anuales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RGAO (PRUDENCE-SMHI). Colores: verde >0%, amarillo -20% a 0%, rojo < -20%.

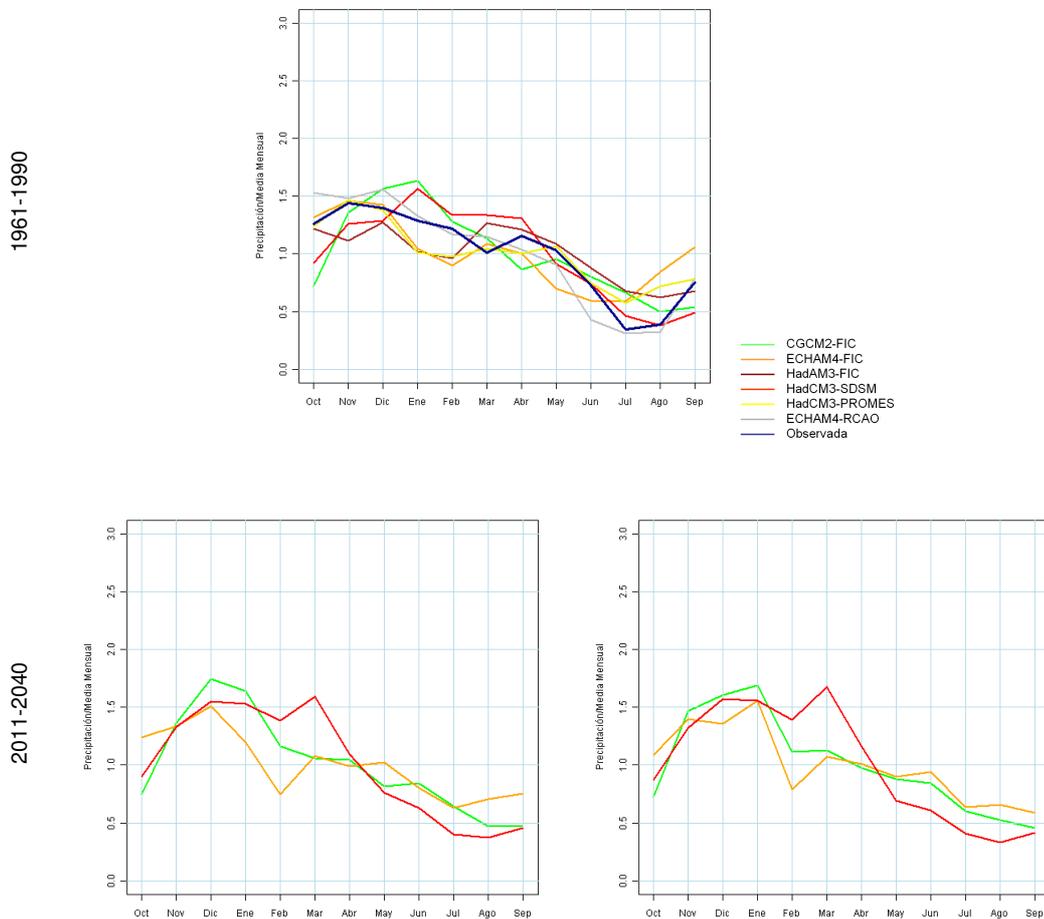
Tabla 15.  $\Delta$  PRE anual (%) por D.H., proyección y periodo

Los incrementos de PRE destacan en CI Cataluña para ECHAM4-FIC y en todos los periodos. No ocurre así para la ECHAM4-RCAO, lo que evidencia la relevancia del proceso de regionalización. Otros incrementos destacables se dan en el noroeste de la Península y en el conjunto de España en HadAM3-FIC, para 2071-2100. Hay fuertes descensos en todas las proyecciones para Canarias, Guadalquivir y C.I. Andalucía.

La evolución estacional de la PRE en cada una de las proyecciones tiene dos problemas mencionados anteriormente. En primer lugar, el sesgo existente en el conjunto de las simulaciones al compararla con los datos observados. En segundo lugar, la falta de ajuste entre los ciclos estacionales. La siguiente figura muestra la evolución estacional de la PRE media mensual en cada periodo de España. Ha sido estandarizada al dividirla por la media de los 12 meses de cada proyección.

Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2



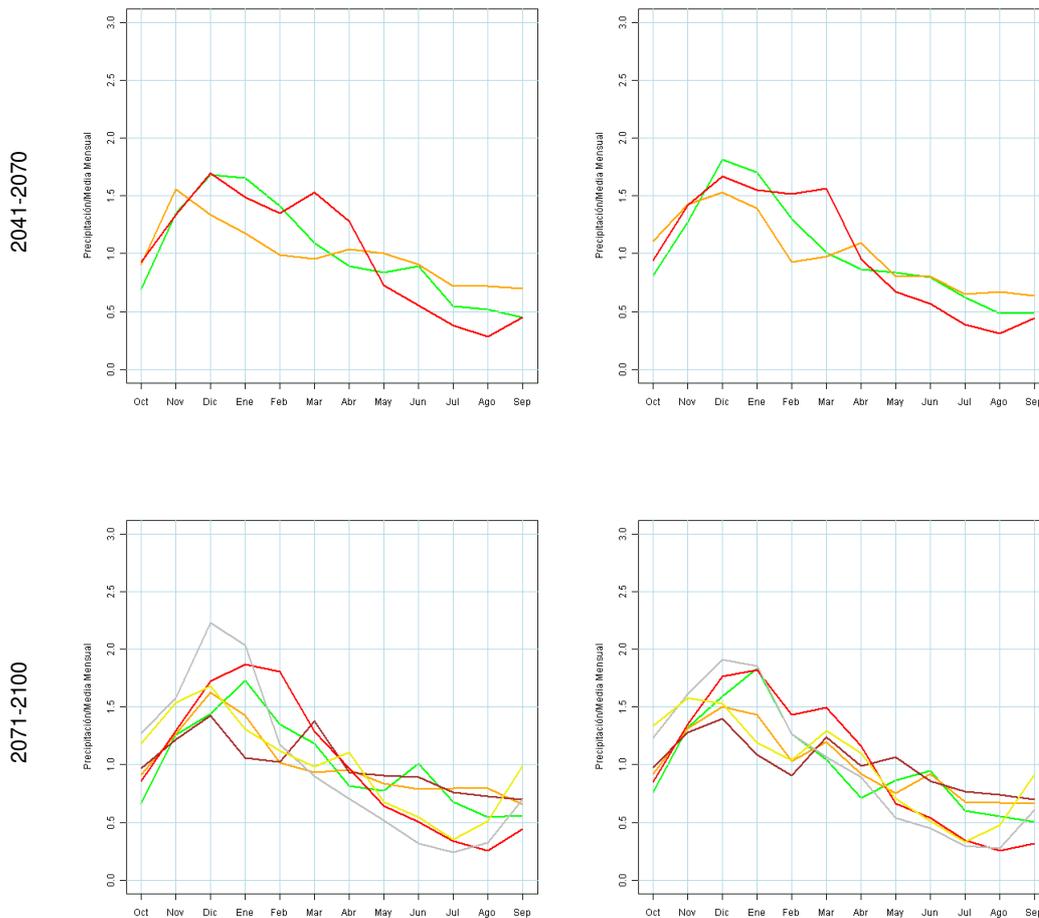


Figura 87. Ciclos estacionales de PRE estandarizada por periodo y escenario

Como ya se comentó en la comparativa por estaciones, la PRE media areal en España durante el periodo 1961-1990, muestra un comportamiento ligeramente bimodal, fruto de la combinación de PRE de invierno en la fachada atlántica y las de otoño y primavera en la mediterránea. En media, las distintas proyecciones no parecen seguir fielmente este patrón, bien por mostrar evoluciones unimodales o bien por ir desfasada la onda que forman los incrementos y decrementos de PRE. En todo caso, la envolvente del conjunto de proyecciones para la media española sí parece seguir la evolución real. No ocurre lo mismo cuando se contemplan valores medios mensuales como los de la cuenca del Segura con una dispersión similar a la que se mostraba en capítulos anteriores. Las consecuencias de un desajuste estacional entre proyecciones y datos observados son importantes ya que afecta a la PRE y, consecuentemente, al resto de procesos del ciclo hidrológico.

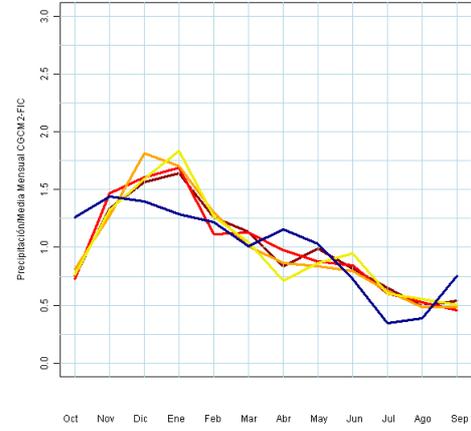
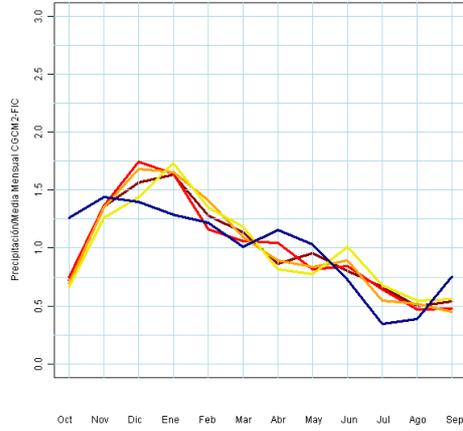
Las siguientes gráficas ilustran la evolución de PRE estacional a lo largo de los periodos de análisis. En todas las figuras se ha superpuesto la evolución real 1961-1990 para apreciar las diferencias de cada proyección. Ninguna de las proyecciones FIC muestra un cambio notable en la estacionalidad de las PRE. Son las proyecciones SDSM y RCAO en el periodo 2071-2100 las que dan una concentración de PRE en los meses de diciembre a febrero respecto al periodo de control; y una disminución en los meses de primavera. Además, en el escenario A2 es más pronunciada esta concentración relativa. Se destaca que en todo caso, las PRE anuales disminuyen en el último periodo de análisis.

- Observados
- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2071-2100

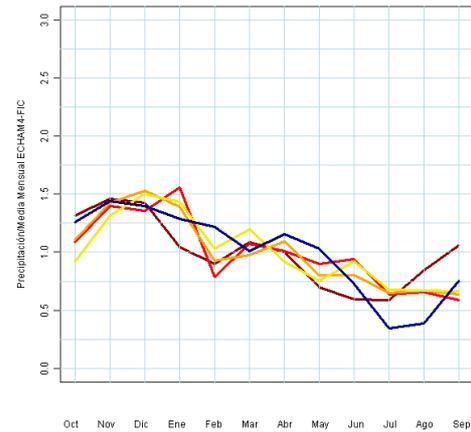
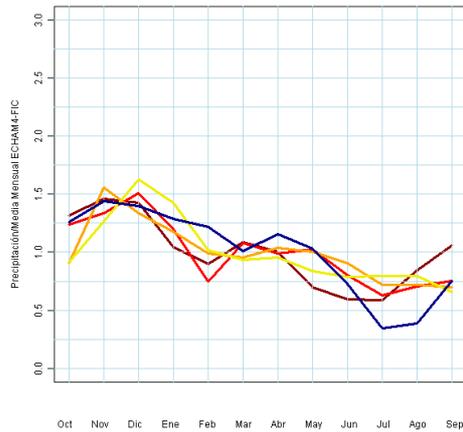
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

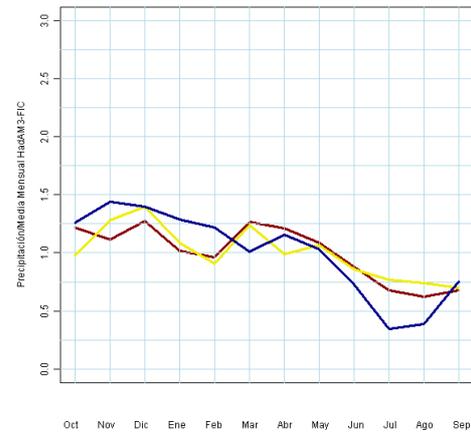
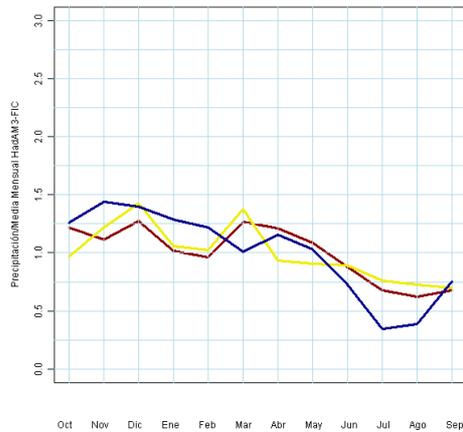
CGCM-FIC



ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC

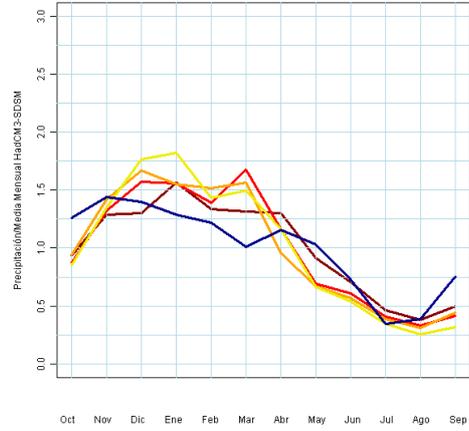
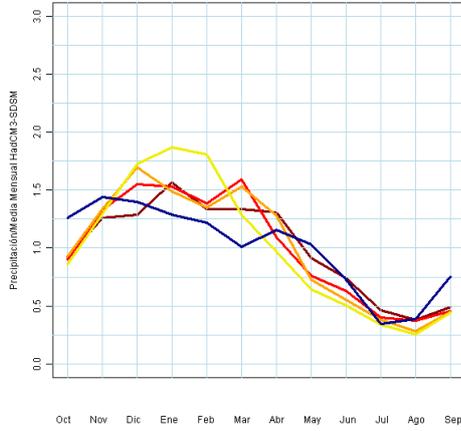


- Observados
- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2071-2100

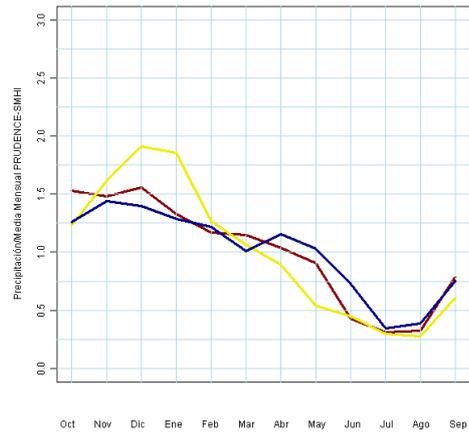
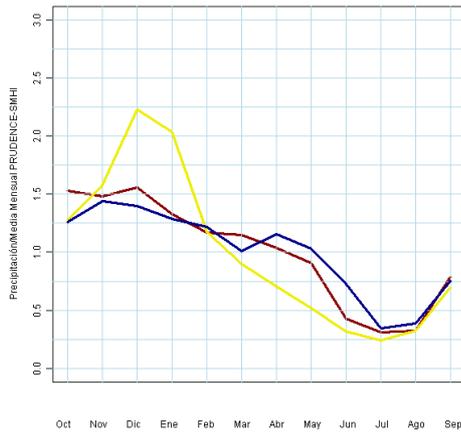
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

HadCM3-SDSM



ECHAM4-RCAO



HadCM3-PROMES

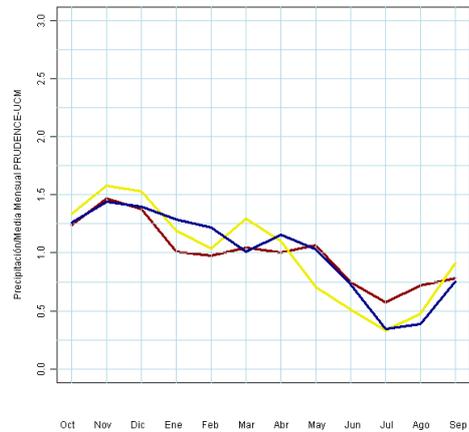
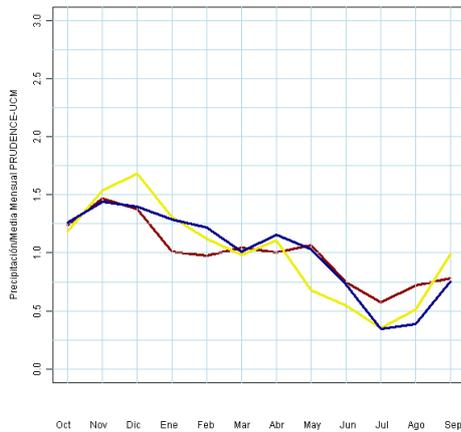


Figura 88. Ciclos estacionales de PRE estandarizada por proyección

La siguiente tabla muestra los resultados trimestrales de desviaciones de PRE.

		Escenario de emisiones A2						Escenario de emisiones B2							
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
<b>Anual</b>	2011-2040	0	-11		-3			-5	-4	-10		-3			-6
	2041-2070	-4	-16		-8			-9	-3	-12		-9			-8
	2071-2100	-11	-18	2	-26	-19	-28	-17	-3	-13	-2	-9	-14	-13	-9
<b>OND</b>	2011-2040	5	-13		6			-1	0	-17		5			-5
	2041-2070	-2	-25		4			-8	3	-15		3			-3
	2071-2100	-18	-25	2	-17	-13	-20	-16	-3	-23	-1	3	-6	-9	-7
<b>EFM</b>	2011-2040	-4	-12		3			-4	-7	1		6			0
	2041-2070	-2	-14		-5			-6	-3	-4		0			-2
	2071-2100	-6	-9	8	-13	-8	-20	-8	0	5	-1	3	2	-2	1
<b>AMJ</b>	2011-2040	3	9		-19			-3	-2	11		-18			-4
	2041-2070	-5	8		-20			-7	-8	4		-32			-13
	2071-2100	-12	-6	-12	-47	-34	-52	-27	-8	0	-11	-26	-30	-31	-17
<b>JAS</b>	2011-2040	-6	-26		-10			-16	-10	-33		-17			-22
	2041-2070	-15	-28		-23			-23	-8	-30		-23			-21
	2071-2100	-7	-26	13	-43	-28	-35	-20	-5	-30	11	-37	-30	-27	-19

**PRECIPITACIÓN:** Desviaciones (%) de medias anuales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RAO (PRUDENCE-SMHI). Colores: verde >0%, amarillo -20% a 0%, rojo < -20%.

Tabla 16.  $\Delta$  PRE (%) estacional en España

## 5.2 Evapotranspiración potencial

### 5.2.1 Interpolación de temperaturas

Al igual que en el caso de las PRE, el procedimiento de interpolación se apoya en patrones mensuales de medias que permiten extrapolar los datos de las proyecciones a la totalidad del territorio. En cada mes de cálculo se interpolan por inverso de distancia al cuadrado los residuos procedentes de una normalización mensual que tiene en cuenta el valor de TEM mensual de cada patrón. En cada proyección y periodo se estiman los nuevos patrones mensuales, proporcionalmente a los datos de estación o rejilla.

#### 5.2.1.1 Proyecciones climáticas con datos en estaciones

Las proyecciones FIC y SDSM proporcionan resultados en estación. Los patrones se simplifican en el caso de las temperaturas porque los residuos se interpolan en términos de desviaciones (°C) respecto a cada mapa patrón. Por tanto solamente es necesario obtener mapas patrón de temperatura mensual. Se siguió el siguiente proceso:

1. Selección de estaciones meteorológicas con las que realizar la comparación en el periodo de control entre TMX y TMN reales y simuladas de las proyecciones. Se consideraron 834 estaciones con datos en las proyecciones por regionalización FIC y 25 años hidrológicos completos en las series reales. Éste último criterio se rebajó a 20 años completos para trabajar con 301 series de estaciones meteorológicas de las proyecciones SDSM

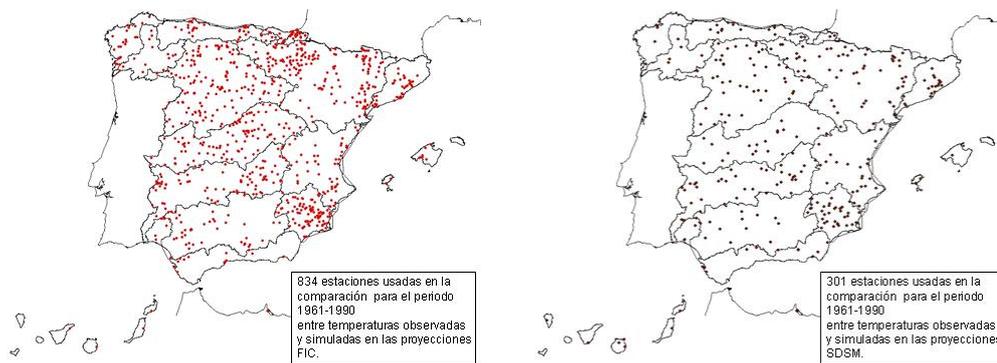


Figura 89. Selección de estaciones para el cálculo de patrones de temperatura mensual

2. Obtención de la media mensual de cada estación, proyección y periodo, tanto para TMX como para TMN. En el caso de las proyecciones los periodos a considerar son cuatro, el de control entre los años hidrológicos 1961 y 1990 y los tres del siglo XXI, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100.
3. Cálculo de las diferencias de medias entre datos observados y proyectados en el periodo de control y de cada periodo del siglo XXI respecto al simulado en el periodo de control. Entre proyecciones simuladas se consideró la totalidad de series disponibles: 1.854 en FIC y 369 en SDSM.
4. Interpolación de esas diferencias por inverso de la distancia al cuadrado y suma a los patrones de referencia. Mediante el paso anterior se obtuvieron mapas patrones de TMN y TMX simuladas para cada mes y para el conjunto del periodo de 1961 a 1990 y para cada una de las proyecciones FIC y SDSM. En la siguiente figura se muestran los patrones para la proyección climática CGCM2-FIC para meses representativos del comportamiento estacional.

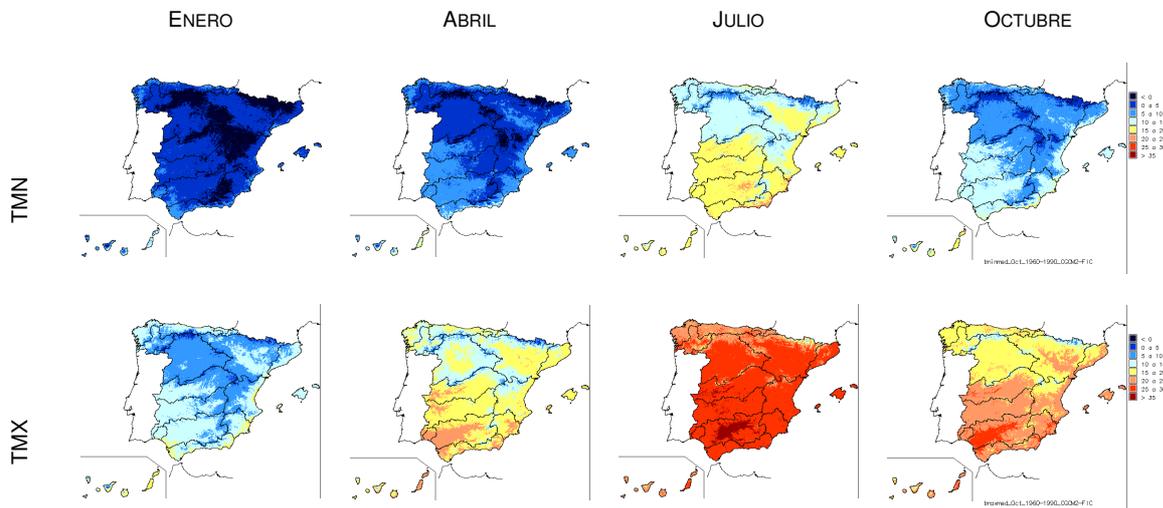


Figura 90. Patrones de TMX y TMN en 1961-1990 para CGCM2-FIC.

5. En la siguiente figura se muestran los patrones para la proyección climática CGCM2-FIC para las medias de las TMX y TMN en el mes de octubre para los tres periodos futuros.

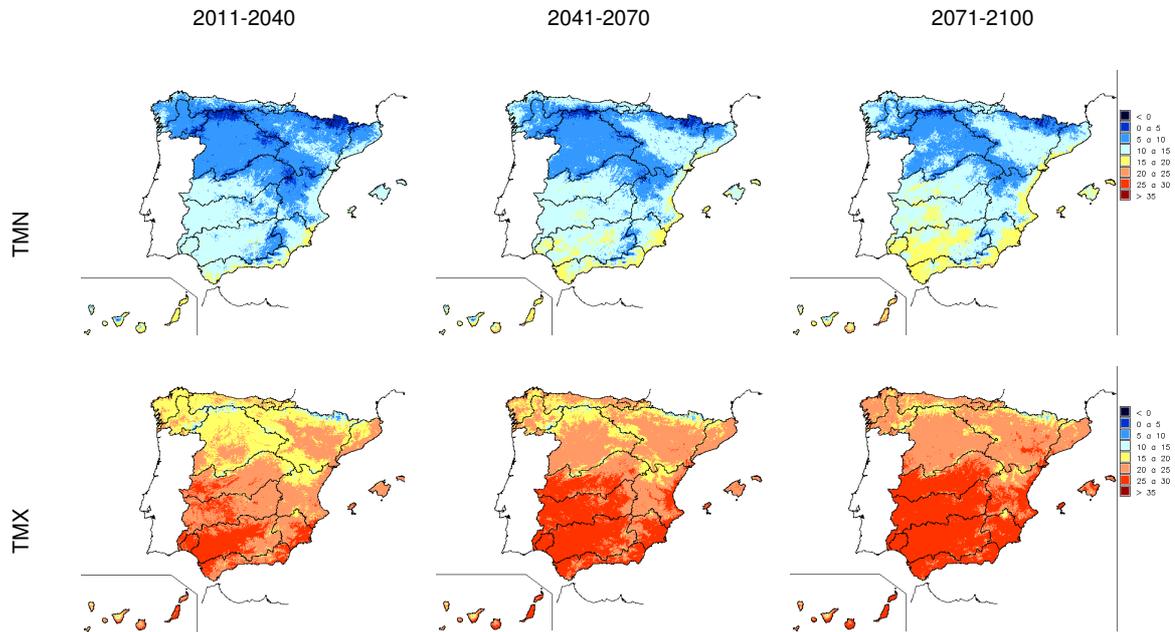


Figura 91. Patrones de TMN y TMX de octubre para CGCM2-FIC-A2

Posteriormente, se obtuvieron mediante interpolación de residuos los mapas mensuales de TMX, TMN y TEM, desde enero de 1961 a diciembre de 1990 (CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC, HadCM3-SDSM y HadAM3-FIC), de enero de 2011 a diciembre de 2100 (CGCM2-FIC y ECHAM4-FIC), de enero de 2011 a diciembre de 2099 (HadCM3-SDSM) y de enero de 2071 a diciembre de 2100 (HadAM3-FIC). En total se generaron 30.168 mapas mensuales de TMX, TMN y TEM simuladas por proyecciones regionalizadas por análogos FIC y regresión SDSM.

### 5.2.1.2 Proyecciones climáticas con datos en rejilla

Los datos de TMX y TMN aportados por las proyecciones del proyecto PRUDENCE están dados en 988 celdas de 0,5º de una rejilla centrada en la Península Ibérica que deja fuera a las Islas Canarias.

Se ha seguido el mismo procedimiento que con las PRE con el objetivo de trasladar los datos de temperaturas al formato ráster en UTM y en celdas de 1 km<sup>2</sup>, aplicando para ello los patrones de TMX y TMN observadas para el periodo de control.

A partir del mapa ráster anteriormente creado para las PRE en el que cada celda de 1 km<sup>2</sup> tiene el código de la celda PRUDENCE coincidente espacialmente, se han llevado a cabo los siguientes pasos:

1. Para las TMX y TMN observadas para el periodo de control, para cada uno de los 12 meses y en cada una de las celdas de la rejilla PRUDENCE, se calculó el promedio de los valores de las celdas de 1 km<sup>2</sup> de los patrones mensuales. Estos valores medios se asignaron a las coordenadas de los centros de cada celda PRUDENCE y se interpolaron sobre la rejilla de 1 km<sup>2</sup> mediante un planteamiento variacional del que se obtuvo una superficie suavizada (figura siguiente)

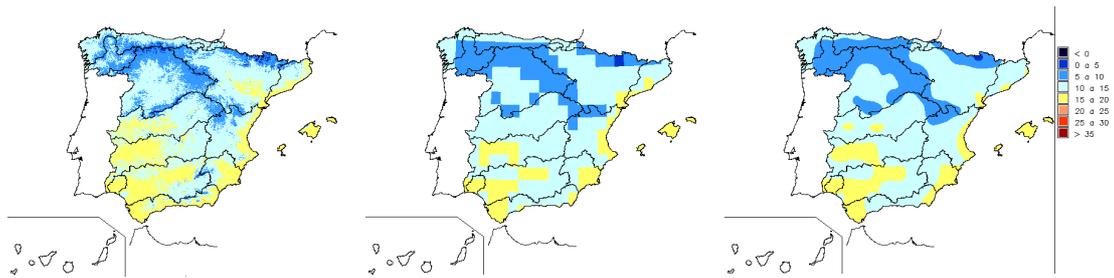


Figura 92. Patrones de TMN en junio en celdas de 1 km<sup>2</sup> (izda) y valores medios en celdas PRUDENCE (centro) y su suavizado (dcha)

- Diferencia de los 12 mapas patrón (figura anterior izda) menos los 12 mapas de valores medios en celdas PRUDENCE (figura anterior dcha). Estos mapas de diferencias representan la desviación de la temperatura en cada celda de 1 km<sup>2</sup> con relación al resto de ellas que comparten la celda PRUDENCE
- Interpolación de las TMX y TMN simuladas, obteniéndose mapas mensuales de TMX y TMN (siguiente figura izquierda). Posteriormente se suman a los mapas de diferencias calculados anteriormente, obteniéndose los mapas mensuales de TMX y TMN. Finalmente, como semisuma de los anteriores, se obtienen los mapas de TEM simuladas (siguiente figura derecha)

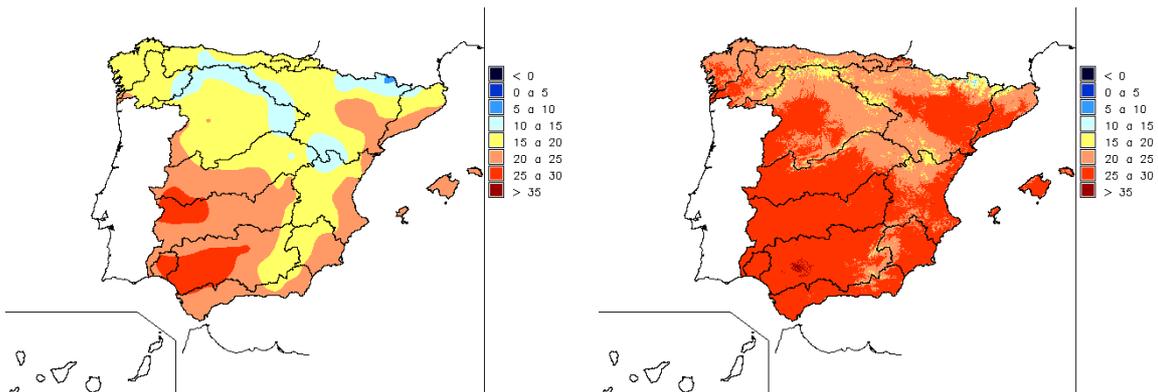


Figura 93. Mapa suavizado de medias de TMN (°C) agrupadas en celdas PRUDENCE (izda) y mapa final de TEM (dcha). Simulación para junio 2080 por HadCM3-PROMES-A2

De ese modo se han obtenido 8640 mapas mensuales de TMX, TMN y TEM para ECHAM4-RCAO y HadCM3-PROMES en los dos periodos 1961-1990 y 2071-2100.

### 5.2.1.3 Resultados

En el gráfico de evolución anual de la siguiente figura se observa la tendencia progresiva al calentamiento a lo largo del siglo XXI. En línea gruesa se indica la media de las proyecciones para el siglo XXI. El último periodo, 2071-2100, incorpora tres proyecciones sin estimaciones desde 2011 hasta el 2070. Dos de ellas dan los máximos de TEM, HadAM3-FIC y ECHAM4-RCAO, lo que provoca un escalón en la evolución. Considerando los valores medios de las proyecciones del escenario A2, resultan unos incrementos medios de aproximadamente de 1,5 °C en el 2011-2040, de 2,9 °C en el 2041-2070 y de 4,8 °C en el 2071-2100. Los incrementos de los resultados de las proyecciones en escenario B2 son inferiores y se estiman en 1,6 °C, 2,5 y 3,6 °C.

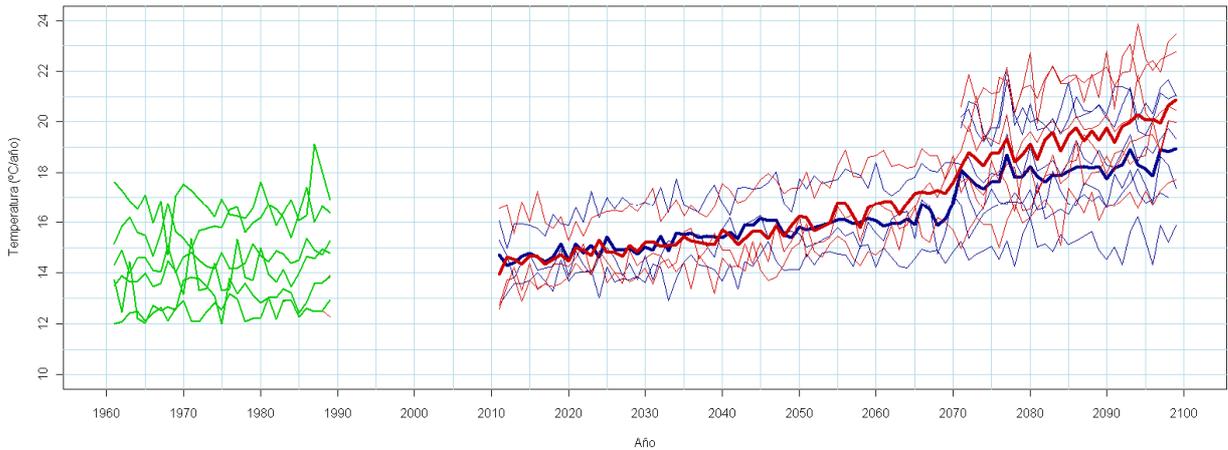


Figura 94. Series de TEM anual en España. A2 (rojo); B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

Una aproximación lineal al gradiente creciente de TEM permite estimar en media un ascenso de unos 5,5 °C/100 años en los escenarios A2 y de 3,3 °C/100 años en los B2. La siguiente figura muestra la evolución incremental de TEM anual respecto a la media del periodo 1961-1990 de cada proyección.

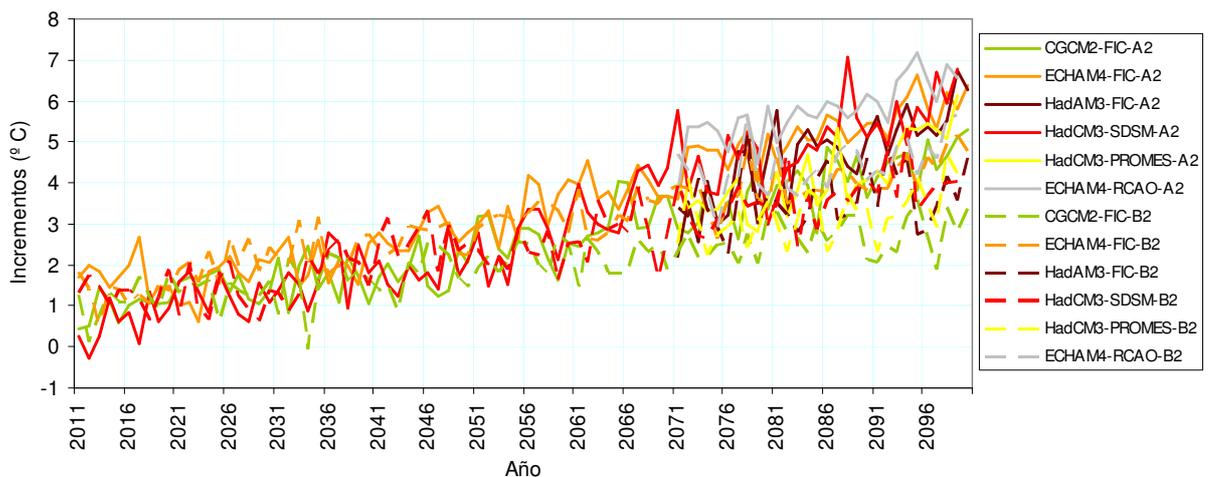


Figura 95.  $\Delta$  TEM anual (°C) en España

El análisis de las evoluciones de cada proyección permite identificar al MCG ECHAM4, regionalizado según FIC y RCAO, como el que da los mayores incrementos. Tal como se aprecia en los mapas del anexo 1, los incrementos de TEM son mayores en las zonas interiores que en las próximas a la costa. ECHAM4-RCAO-A2 llega a estimar un incremento de TEM de 5,8 °C en el periodo 2071-2100 respecto a la media del 1961-1990, con valores superiores a 6 °C en las Demarcaciones del Duero, Tajo, Ebro y Guadiana. En la tabla siguiente se muestran los incrementos de TEM anual para España y para cada Demarcación Hidrográfica con relación a las proyecciones del periodo de control.

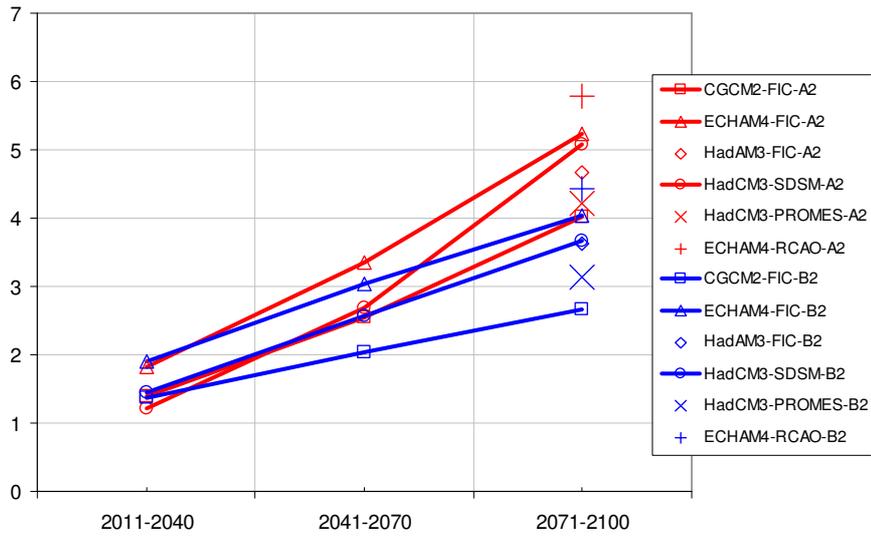


Figura 96.  $\Delta$  TEM anual (°C) por periodo en España

		Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	2011-2040	1.4	1.8		1.2			1.5	1.4	1.9		1.5			1.6
	2041-2070	2.5	3.4		2.7			2.9	2.0	3.0		2.6			2.5
	2071-2100	4.0	5.2	4.7	5.1	4.2	5.8	4.8	2.7	4.0	3.6	3.7	3.1	4.4	3.6
Cantábrico	2011-2040	1.1	1.6		0.9			1.2	1.0	1.7		1.0			1.3
	2041-2070	2.0	3.0		2.0			2.3	1.6	2.7		1.9			2.0
	2071-2100	3.2	4.6	3.8	3.9	3.2	5.4	4.0	2.1	3.6	3.0	2.8	2.3	4.3	3.0
Galicia-Costa	2011-2040	1.0	1.5		0.7			1.1	0.9	1.6		0.9			1.1
	2041-2070	1.8	2.8		1.8			2.1	1.4	2.5		1.6			1.8
	2071-2100	2.9	4.1	3.1	3.4	3.1	5.0	3.6	1.9	3.3	2.4	2.4	2.2	4.1	2.7
CI País Vasco	2011-2040	1.1	1.5		0.9			1.2	1.0	1.5		1.2			1.2
	2041-2070	2.0	2.8		2.2			2.3	1.5	2.5		2.1			2.0
	2071-2100	3.1	4.3	3.9	4.2	2.9	5.3	4.0	2.1	3.3	3.1	3.0	1.9	4.2	3.0
Miño-Sil	2011-2040	1.2	1.9		1.0			1.4	1.1	1.9		1.1			1.4
	2041-2070	2.3	3.4		2.3			2.7	1.8	3.0		2.2			2.3
	2071-2100	3.7	5.1	4.1	4.4	3.8	5.9	4.5	2.4	4.1	3.2	3.1	2.7	4.6	3.3
Duero	2011-2040	1.4	2.0		1.3			1.5	1.3	2.0		1.5			1.6
	2041-2070	2.6	3.6		2.7			3.0	2.1	3.3		2.7			2.7
	2071-2100	4.2	5.7	4.9	5.2	4.3	6.2	5.1	2.7	4.4	3.8	3.8	3.2	4.7	3.8
Tajo	2011-2040	1.5	2.0		1.4			1.6	1.5	2.0		1.6			1.7
	2041-2070	2.8	3.7		2.9			3.1	2.2	3.3		2.8			2.8
	2071-2100	4.5	5.8	5.2	5.4	4.6	6.1	5.3	2.9	4.4	4.0	3.9	3.5	4.6	3.9
Guadiana	2011-2040	1.5	2.0		1.3			1.6	1.5	2.1		1.5			1.7
	2041-2070	2.8	3.8		2.8			3.1	2.3	3.4		2.7			2.8
	2071-2100	4.5	5.9	5.2	5.4	4.7	6.0	5.3	3.0	4.5	4.0	3.8	3.5	4.6	3.9
Guadalquivir	2011-2040	1.5	2.0		1.3			1.6	1.5	2.1		1.5			1.7
	2041-2070	2.7	3.6		2.7			3.0	2.2	3.3		2.7			2.7
	2071-2100	4.4	5.5	4.7	5.2	4.6	5.8	5.0	2.9	4.3	3.7	3.7	3.4	4.4	3.7
CI Andalucía	2011-2040	1.3	1.6		1.1			1.3	1.4	1.7		1.3			1.5
	2041-2070	2.4	2.9		2.4			2.6	2.0	2.7		2.3			2.3
	2071-2100	3.8	4.5	4.0	4.6	4.0	5.3	4.4	2.6	3.5	3.1	3.3	3.0	4.1	3.3
Segura	2011-2040	1.4	1.6		1.3			1.4	1.5	1.8		1.6			1.6
	2041-2070	2.5	2.9		2.8			2.7	2.1	2.7		2.6			2.5
	2071-2100	3.8	4.5	4.4	5.2	4.1	5.1	4.5	2.7	3.6	3.4	3.7	3.1	3.9	3.4
Júcar	2011-2040	1.4	1.7		1.1			1.4	1.4	1.8		1.3			1.5
	2041-2070	2.5	3.1		2.4			2.7	2.1	2.8		2.2			2.4
	2071-2100	3.9	4.9	4.7	4.4	4.1	5.3	4.6	2.7	3.8	3.7	3.2	3.2	4.1	3.4
Ebro	2011-2040	1.4	1.7		1.4			1.5	1.3	1.8		1.7			1.6
	2041-2070	2.5	3.2		3.1			2.9	2.0	2.9		2.9			2.6
	2071-2100	3.8	5.2	4.8	5.8	4.1	6.0	5.0	2.6	3.9	3.8	4.3	3.1	4.5	3.7
CI Cataluña	2011-2040	1.3	1.7		1.0			1.3	1.2	1.8		1.3			1.4
	2041-2070	2.3	3.0		2.6			2.6	1.8	2.7		2.4			2.3
	2071-2100	3.4	4.7	4.4	4.9	4.0	5.3	4.5	2.4	3.6	3.5	3.5	3.1	4.1	3.4
Islas Baleares	2011-2040	1.3	1.4		0.9			1.2	1.2	1.5		1.2			1.3
	2041-2070	2.1	2.5		2.3			2.3	1.8	2.4		2.1			2.1
	2071-2100	3.0	4.0	3.9	4.3	3.5	4.5	3.9	2.2	3.1	3.0	3.0	2.6	3.6	2.9
Canarias	2011-2040	0.9	1.3		0.8			1.0	1.2	1.4		1.0			1.2
	2041-2070	2.0	2.4		1.9			2.1	1.7	2.3		1.8			1.9
	2071-2100	3.2	3.9	2.9	3.5			3.4	2.3	3.0	2.2	2.5			2.5

**TEMPERATURAS:** Incrementos (°C) de medias anuales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RAO (PRUDENCE-SMHI). Colores: verde >0%, amarillo 0% a 3%, rojo > 3%

Tabla 17.  $\Delta$  TEM anual (°C) por D.H., proyección y periodo

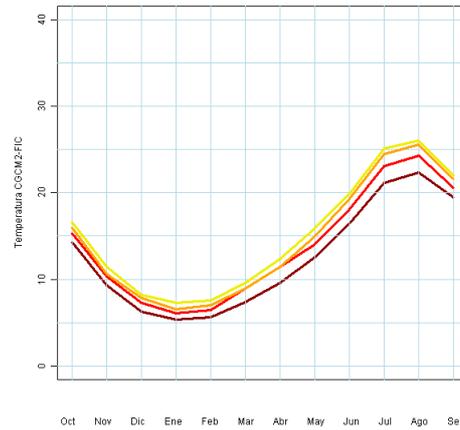
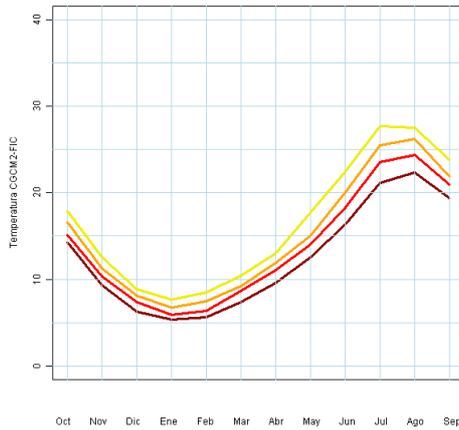
Los cambios de TEM no son uniformes en todos los meses y estaciones del año. Los mayores incrementos de TEM y las mayores diferencias entre modelos se dan entre el final de la primavera y verano y los menores entre otoño e invierno. El hecho de que los mayores incrementos de TEM se den durante meses secos hace esperar que el impacto del ascenso de TEM en la ESC sea reducido.

— 1961-1990  
— 2011-2040  
— 2041-2070  
— 2070-2100

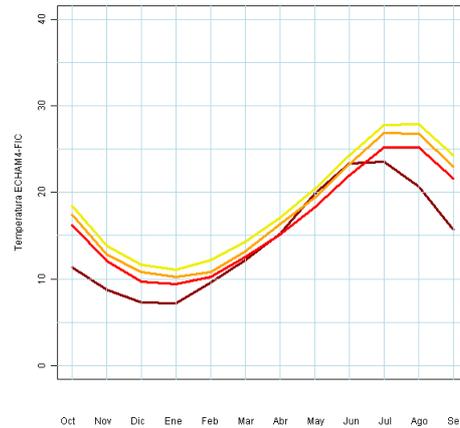
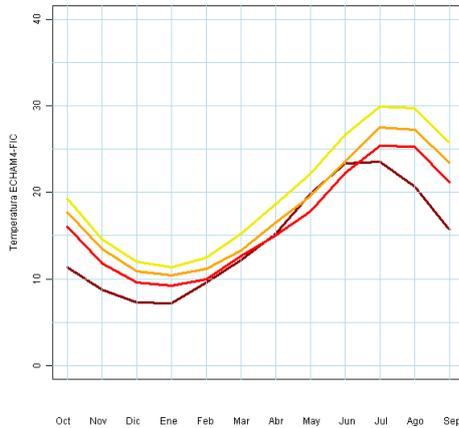
Escenario de Emisiones A2

Escenario de Emisiones B2

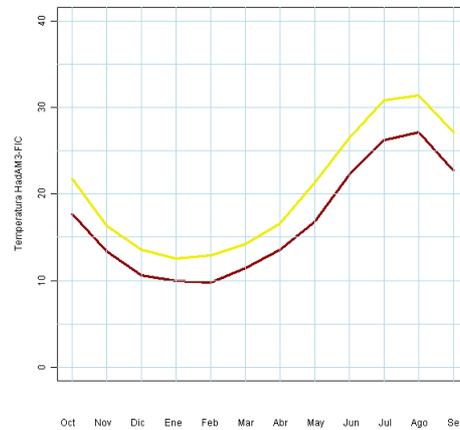
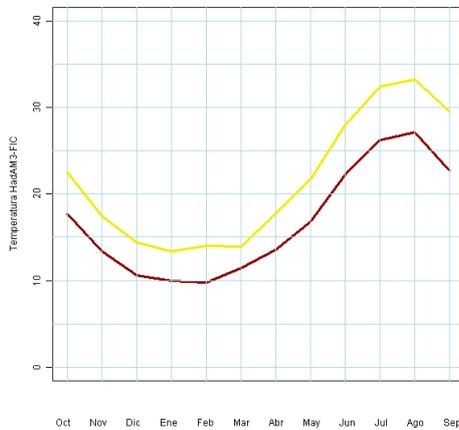
CGCM2-FIC



ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC

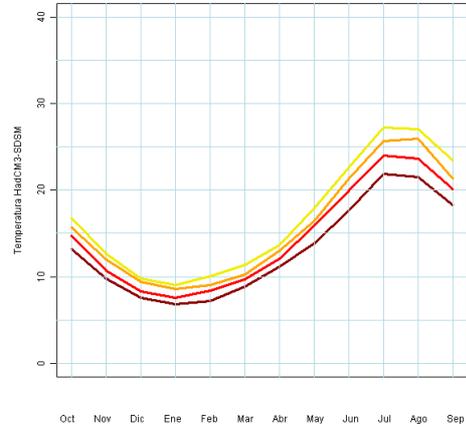
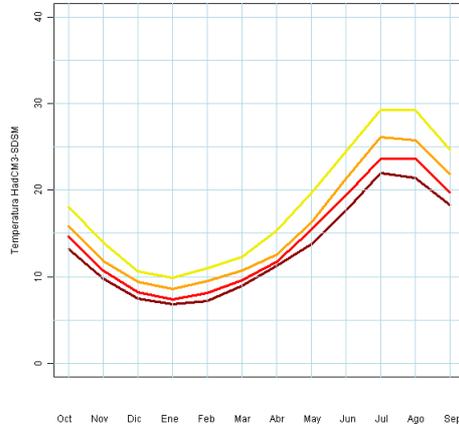


- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

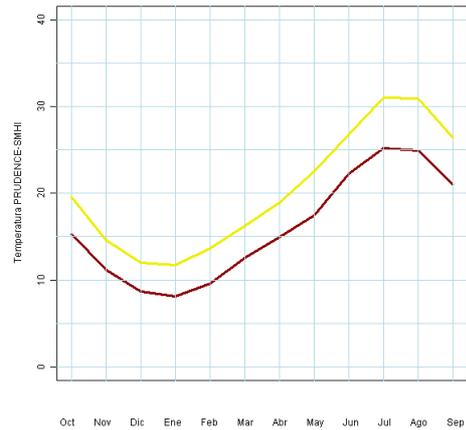
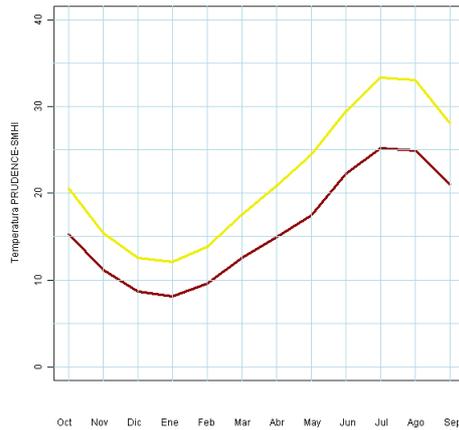
Escenario de Emisiones A2

Escenario de Emisiones B2

HadCM3-SDSM



ECHAM4-RCAO



HadCM3-PROMES

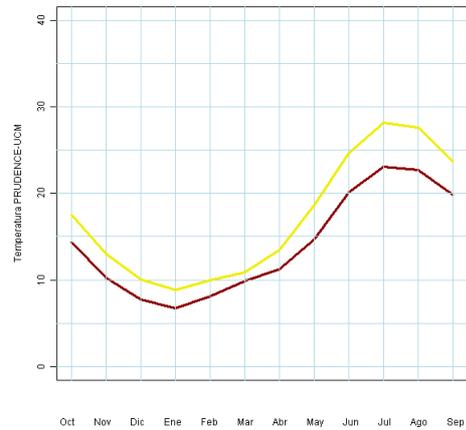
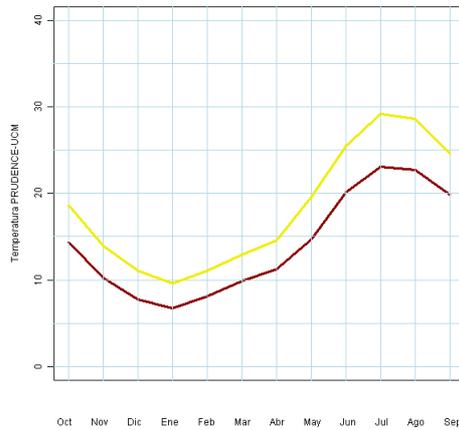


Figura 97. Ciclo estacional de temperatura (°C) por proyección.

Todos los modelos conservan la misma evolución estacional durante los sucesivos periodos de análisis. La única singularidad se da en ECHAM4-FIC con una anomalía en medias mensuales de mayo a junio, con valores superiores a los que cabría esperar y que ya apareció en el análisis de información básica. Las siguientes gráficas y tablas muestran los resultados agregados trimestralmente.

		Escenario de emisiones A2						Escenario de emisiones B2							
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
<b>Anual</b>	2011-2040	1.4	1.8		1.3			1.5	1.4	1.9		1.5			1.6
	2041-2070	2.5	3.3		2.7			2.9	2.0	3.0		2.6			2.5
	2071-2100	4.0	5.2	4.7	5.1	4.3	5.8	4.8	2.7	4.0	3.6	3.7	3.2	4.5	3.6
<b>OND</b>	2011-2040	1.1	3.4		1.0			1.8	1.1	3.6		1.1			1.9
	2041-2070	2.1	4.9		2.2			3.1	1.6	4.6		2.2			2.8
	2071-2100	3.2	6.2	4.2	4.0	3.7	4.5	4.3	2.2	5.5	3.3	2.9	2.7	3.7	3.4
<b>EFM</b>	2011-2040	0.9	1.0		0.8			0.9	1.1	1.1		1.0			1.0
	2041-2070	1.7	2.0		2.0			1.9	1.4	1.8		1.6			1.6
	2071-2100	2.7	3.4	3.3	3.5	3.0	4.3	3.4	2.0	2.8	2.8	2.6	1.6	3.7	2.6
<b>AMJ</b>	2011-2040	1.7	-1.1		1.3			0.6	1.6	-1.0		1.8			0.8
	2041-2070	2.8	0.4		2.5			1.9	2.3	0.2		2.7			1.8
	2071-2100	4.9	3.0	4.8	5.7	4.6	6.7	4.9	3.1	1.1	4.0	3.9	3.6	4.6	3.4
<b>JAS</b>	2011-2040	2.1	3.9		1.8			2.6	1.7	4.0		2.0			2.6
	2041-2070	3.6	6.1		4.0			4.6	2.9	5.5		3.7			4.1
	2071-2100	5.4	8.4	6.2	7.1	5.6	7.7	6.7	3.4	6.6	4.4	5.2	4.7	5.8	5.0

**TEMPERATURAS:** Incrementos (°C) de medias anuales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RCOA (PRUDENCE-SMHI). Colores: verde >0%, amarillo 0% a 3%, rojo > 3%

Figura 98. Δ TEM (°C) estacional en España

### 5.2.2 Aplicación del método de Hargreaves al cálculo de la ETP y correcciones

La ETP se ha calculado combinando los métodos Penman-Monteith y Hargreaves, ya que si bien el primero se considera más adecuado bajo cualquier condición climática, precisa numerosos datos que sólo están disponibles en escasas estaciones y simulaciones. Por el contrario, el método de Hargreaves calcula la ETP a partir de temperaturas y las coordenadas geográficas, lo que permite su cálculo en todas las celdas de 1 km<sup>2</sup> en las que se discretiza España.

$$ETP_r = 0,0023 \cdot (TMD + 17,8) \cdot (TMX - TMN)^{0,5} \cdot R_A$$

Siendo  $R_A$ , la radiación solar extraterrestre.

Los mapas resultantes se multiplican por mapas mensuales correctores que reflejan la relación entre la ETP calculada por el método Penman-Monteith y por el de Hargreaves. Esta relación es característica de cada mes y se ha obtenido en las estaciones completas en las que se pueden aplicar los dos métodos. Los coeficientes correctores de las estaciones, se han interpolado para obtener mapas mensuales correctores. Finalmente, se aplica un coeficiente de cultivo a los mapas de ETP obtenido a partir de los usos de suelo (CORINE LAND COVER).

Consecuentemente, los incrementos de ETP reflejan los de TEM. Se estiman incrementos medios en España y todas las proyecciones entre un 6% y un 28%. Los escenarios de emisiones A2 dan incrementos mayores que los B2.

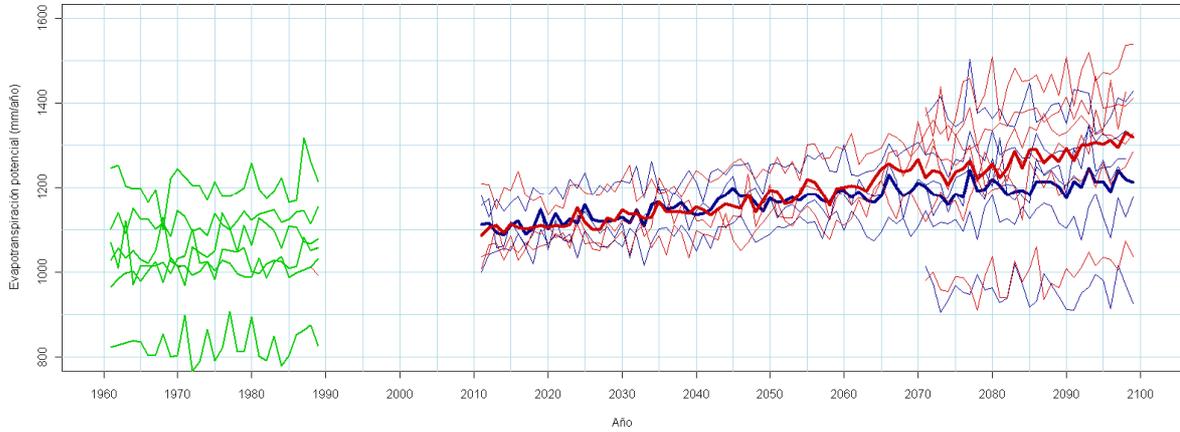


Figura 99. Series de ETP anual en España. Periodo de control (verde); A2 (rojo); B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

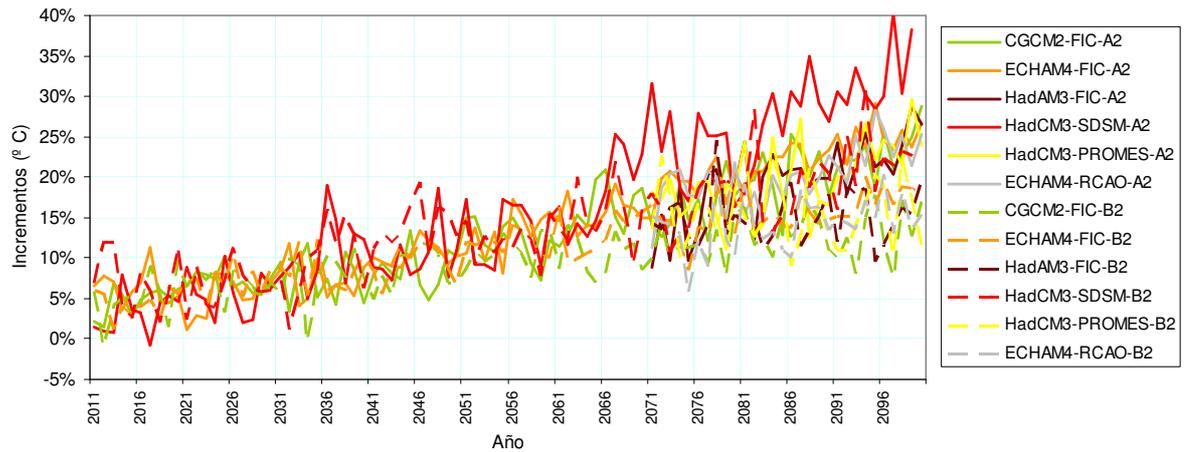


Figura 100.  $\Delta$  ETP (%) anual en España

Las estimaciones de las diferentes proyecciones no difieren mucho en los dos primeros periodos donde se estiman incrementos medios para España del 6% al 8% para 2011-2040 y del 10% al 14% para 2041-2070. Por el contrario, en el último periodo, el rango de incrementos oscila entre 13% y 28%, siendo ya claramente mayores los incrementos del escenario climático A2. HadCM3-SDSM-A2 y ECHAM4-FIC-A2 dan los incrementos más altos para 2071-2100, siendo de 28% y 22% respectivamente;

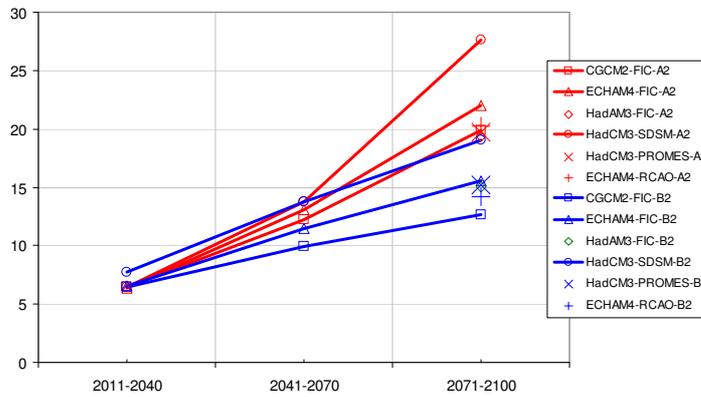


Figura 101.  $\Delta$  ETP (%) anual por periodo en España

En el anexo 1 se muestran los mapas de ETP media anual de cada proyección y periodo por D.H. El promedio de las proyecciones de ETP en cada uno de los periodos se muestra en los siguientes mapas. Los menores valores se encuentran en el norte de la Península y las mayores altitudes. Los mayores valores de ETP se encuentran en zonas de interior y aquellas zonas de costa sometidas a la acción del viento. En el último periodo y en escenario A2 son reducidas las zonas con ETP inferiores a los 1000 mm/año.

ESCENARIO DE EMISIONES A2

ESCENARIO DE EMISIONES B2

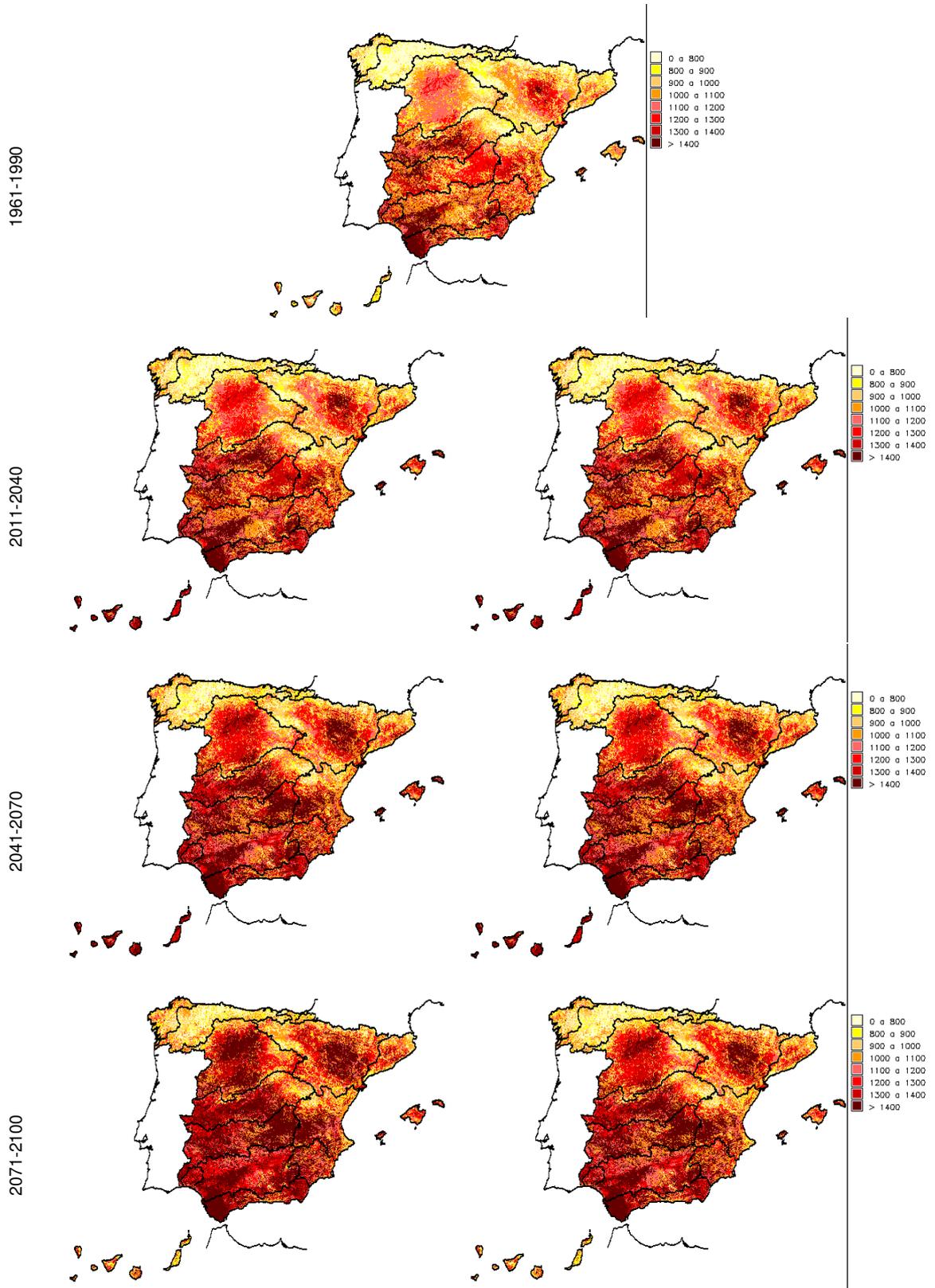


Figura 102. ETP anual promedio de las proyecciones. Periodo de control y s. XXI

La distribución espacial de las desviaciones respecto al periodo de control 1961-1990 se muestra en la siguiente figura. Se han obtenido como desviaciones de los promedios de cada periodo del s. XXI respecto al promedios 1961-1990. La desviación es positiva y mayor en el interior de la Península que en las zonas costeras. Así, hay moderados incrementos en las Baleares y Canarias y fuertes en las DD.HH. del Duero y Ebro. La mayoría de las proyecciones estiman importantes incrementos en las cabeceras de cuencas.

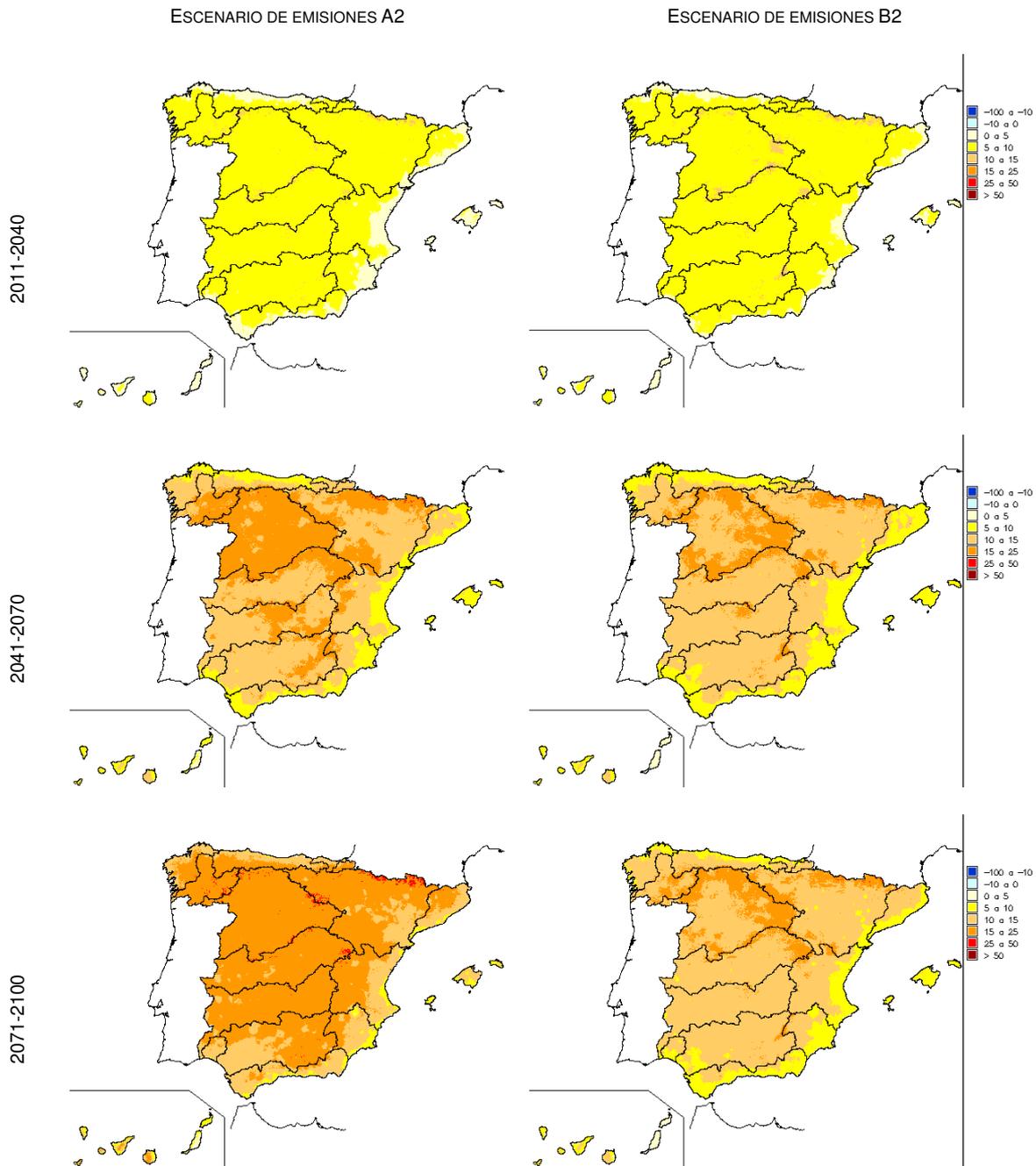


Figura 103.  $\Delta$  ETP (%) en cada periodo del s. XXI respecto al periodo de control

HadCM3-SDSM-A2 da los incrementos más altos, especialmente en las DD.HH. del Ebro y Duero, llegando a estimar hasta el 37% de incremento para la cuenca del Ebro para final de siglo. ECHAM4-RCAO presenta una polaridad norte-sur, con los mayores incrementos al

norte, lo que contrasta con el resto de proyecciones. La tabla siguiente muestra los resultados de estas desviaciones por DD.HH., periodo, escenario y proyección.

		Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	2011-2040	6	6		6			6	6	7		8			7
	2041-2070	12	13		14			13	10	12		14			12
	2071-2100	20	22	19	28	20	20	21	13	16	15	19	15	14	15
Cantábrico	2011-2040	4	6		5			5	4	6		6			5
	2041-2070	9	11		11			10	7	10		11			9
	2071-2100	14	19	16	23	20	27	19	9	13	12	15	15	18	14
Galicia-Costa	2011-2040	5	6		5			5	4	6		5			5
	2041-2070	9	12		10			10	7	10		10			9
	2071-2100	15	19	14	20	19	23	18	9	14	10	13	14	17	13
CI País Vasco	2011-2040	4	5		6			5	4	5		8			6
	2041-2070	8	10		13			10	6	9		13			9
	2071-2100	13	17	16	27	15	23	19	8	12	13	18	11	17	13
Miño-Sil	2011-2040	7	8		7			7	5	8		7			7
	2041-2070	13	16		15			15	10	14		15			13
	2071-2100	22	26	20	30	23	29	25	13	19	15	20	18	20	17
Duero	2011-2040	8	8		8			8	7	8		10			8
	2041-2070	15	17		17			16	12	14		17			15
	2071-2100	24	28	23	34	24	26	26	15	20	18	23	19	18	19
Tajo	2011-2040	7	7		7			7	7	7		8			7
	2041-2070	13	14		15			14	11	12		15			13
	2071-2100	22	24	21	29	21	20	22	14	17	16	20	16	14	15
Guadiana	2011-2040	7	7		7			7	7	7		8			7
	2041-2070	13	14		14			14	11	12		14			13
	2071-2100	22	24	20	28	19	18	22	14	17	16	19	15	13	15
Guadalquivir	2011-2040	7	7		6			6	7	7		7			7
	2041-2070	13	13		13			13	10	12		13			12
	2071-2100	20	22	18	26	18	16	20	13	16	14	18	13	11	14
CI Andalucía	2011-2040	5	5		5			5	6	5		6			6
	2041-2070	10	10		10			10	9	9		10			9
	2071-2100	16	16	15	19	16	13	16	11	12	11	14	12	9	11
Segura	2011-2040	6	5		5			5	7	5		6			6
	2041-2070	11	10		11			11	9	9		11			10
	2071-2100	17	16	17	22	17	14	17	11	12	13	15	13	10	12
Júcar	2011-2040	6	5		5			5	7	6		6			6
	2041-2070	12	11		11			11	10	10		10			10
	2071-2100	19	19	19	22	18	18	19	12	13	15	15	14	12	14
Ebro	2011-2040	6	6		8			7	6	6		10			7
	2041-2070	12	13		18			14	10	11		17			13
	2071-2100	19	22	21	37	21	25	24	12	15	17	25	17	17	17
CI Cataluña	2011-2040	5	5		4			5	5	5		5			5
	2041-2070	9	10		10			10	8	8		10			9
	2071-2100	14	17	17	21	16	20	18	10	11	14	15	13	14	13
Islas Baleares	2011-2040	5	4		4			4	4	4		4			4
	2041-2070	8	8		8			8	6	7		8			7
	2071-2100	11	13	13	16	12	13	13	8	9	10	11	9	10	10
Canarias	2011-2040	4	4		2			3	4	5		3			4
	2041-2070	7	8		5			7	6	8		5			6
	2071-2100	12	13	10	10			11	8	10	7	7			8

**ETP:** Incrementos (%) de medias anuales. Titulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RCAO (PRUDENCE-SMH). Colores: verde < 0%, amarillo 0% a 15%, rojo > 15%

Tabla 18.  $\Delta$  ETP (%) media por D.H., proyección y periodo

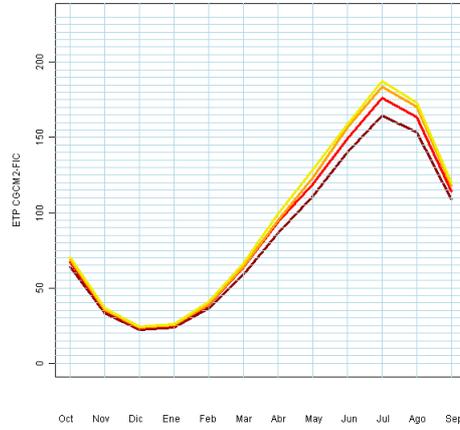
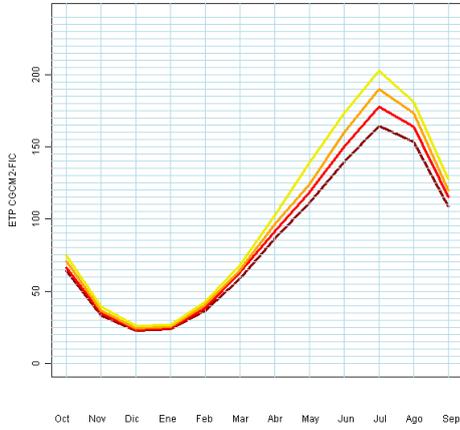
La evolución mensual vuelve a repetir los patrones de la TEM. Hay un ascenso de la ETP en épocas de alta ETP media mensual y bajos incrementos absolutos en invierno y épocas húmedas. La evolución estacional se mantiene constante en cada proyección. Todas presentan un pico y valle mensual. La única anomalía aparece en los resultados obtenidos durante el mes de junio del periodo 1961-1990 en ECHAM4-FIC con valores similares a los de julio.

- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

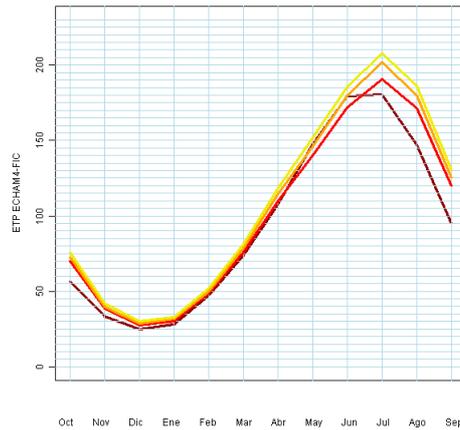
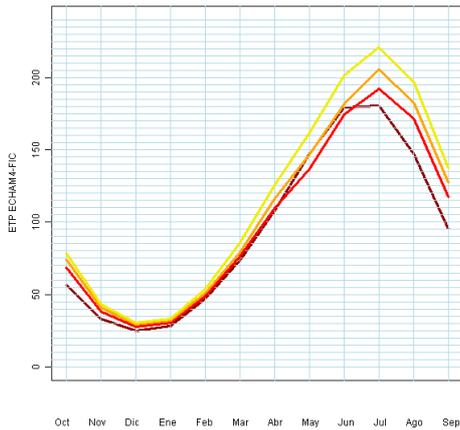
Escenario A2

Escenario B2

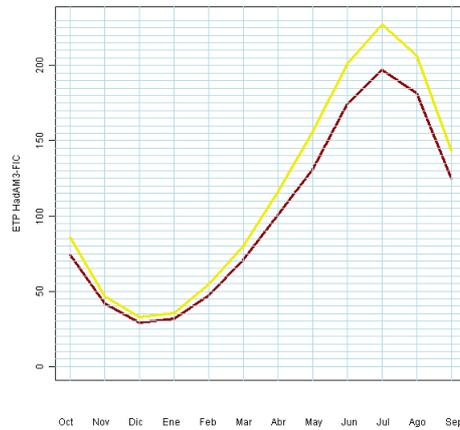
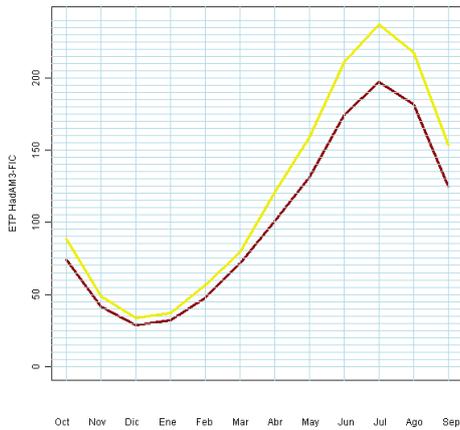
CGCM2-FIC



ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC

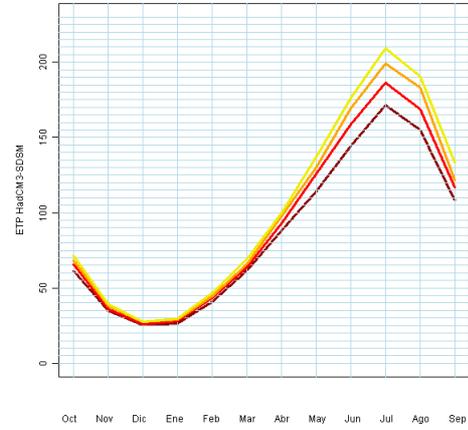
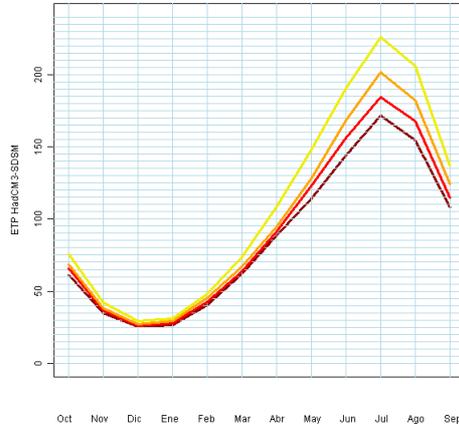


1961-1990  
2011-2040  
2041-2070  
2070-2100

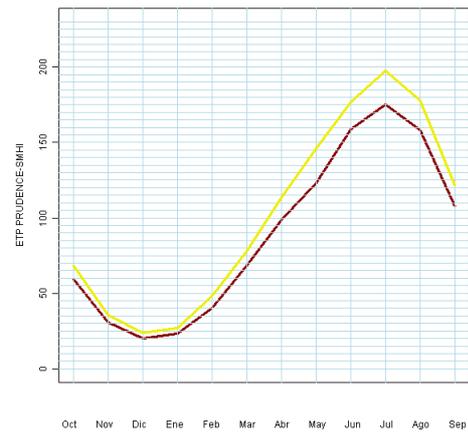
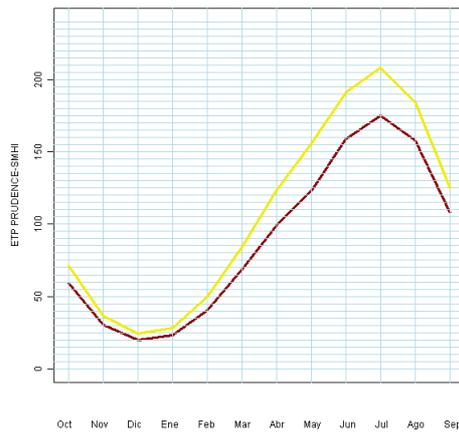
Escenario A2

Escenario B2

HadCM3-SDSM



ECHAM4-RCAO



HadCM3-PROMES

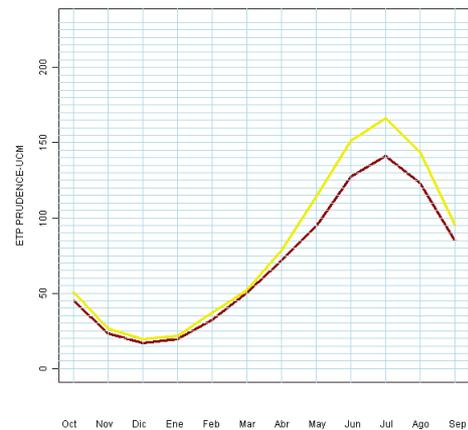
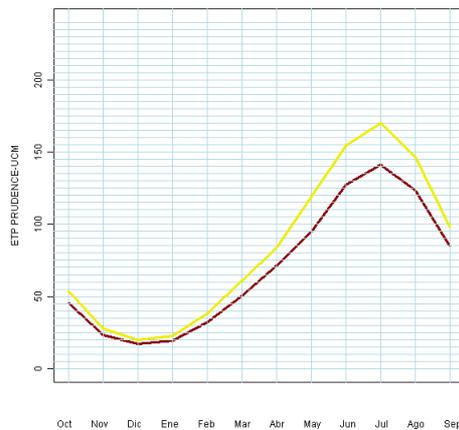


Figura 104. Ciclo estacional de ETP (mm) por proyección

La tabla siguiente muestra las desviaciones trimestrales de la ETP en España. Las altas desviaciones obtenidas en época húmeda y especialmente durante el invierno se deben a que los reducidos incrementos son del mismo orden de magnitud que los valores de referencia.

		Escenario de emisiones A2							Escenario de emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
<b>Anual</b>	2011-2040	6	6		6			6	6	7		8			7
	2041-2070	12	13		14			13	10	12		14			12
	2071-2100	20	22	19	28	20	20	21	13	16	15	19	15	14	15
<b>OND</b>	2011-2040	4	18		5			9	5	19		5			9
	2041-2070	10	26		10			15	7	24		10			14
	2071-2100	17	33	18	21	19	20	21	10	29	15	14	14	16	16
<b>EFM</b>	2011-2040	5	5		4			5	6	4		4			5
	2041-2070	9	9		10			9	8	8		8			8
	2071-2100	15	16	15	19	19	22	17	11	11	13	13	8	16	12
<b>AMJ</b>	2011-2040	7	-3		7			3	7	-3		9			4
	2041-2070	13	2		13			9	11	1		14			8
	2071-2100	23	12	20	29	22	23	21	14	5	16	19	17	15	14
<b>JAS</b>	2011-2040	7	14		7			9	6	14		9			10
	2041-2070	13	22		17			17	11	20		16			15
	2071-2100	20	31	21	31	19	17	23	13	24	15	22	16	13	17

ETP: Desviaciones (%) de medias anuales y trimestrales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global CHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PRUDENCE-UCM; P = modelo global ECHAM4 y regionalización PRUDENCE-SMHI. Colores: verde < 0%, amarillo 0% a 15%, rojo > 15%

Tabla 19.  $\Delta$  ETP (%) estacional en España

## 6 EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS E IMPACTOS

En este capítulo se describen los resultados de la implementación del modelo de recursos hídricos mensual de SIMPA para simular las sucesivas fases del ciclo hidrológico y estimar la ETR, el estado de almacenamiento en el suelo, la REC y la ESC. Se incluyen también consideraciones sobre la evolución de cobertura nival en zonas montañosas utilizando índices extraídos de las series proyectadas.

Se ha elegido un método directo para la implementación de variables atmosféricas en el modelo hidrológico. Anteriormente se ha mostrado la comparativa entre los datos observados y los proyectados. Estas diferencias cabría asociarlas a errores de representación y simulación de los modelos y proyecciones regionales, así como a las incertidumbres que conlleva la simulación de fenómenos atmosféricos. Se ha comprobado la existencia de un sesgo que infravalora el valor medio de la PRE. Se han destacado las diferencias en el comportamiento de las series temporales cuando se consideran las tendencias de los treinta años del periodo de control, decreciente en términos reales y estacionaria o creciente en las proyecciones. Las características de las secuencias de ciclos de años húmedos y secos ni los ciclos estacionales tampoco aparecen representadas en las series proyectadas.

La consideración de este conjunto de aspectos hace complicado encontrar transformaciones que corrijan unas propiedades sin modificar otras. Por otro lado, todas las proyecciones ya han sido estudiadas en diferentes proyectos especializados en el conocimiento del clima que han trasladado los resultados de los modelos de cambio climático a escalas locales, bien por procedimientos estadísticos (FIC y SDSM) o bien por procedimientos dinámicos (PRUDENCE). No parece oportuno volver a realizar trabajos excediendo el objetivo de éste que debe centrarse en la implementación en el ciclo hidrológico.

### 6.1 Evapotranspiración Real

El modelo que simula el ciclo hidrológico estima la ETR en función de características climáticas como la ETP e hidrológicas como el modelo de generación de ESC y capacidad de almacenamiento en el suelo. A diferencia del modelo simplificado Schreiber-Budyko, SIMPA contabiliza mensualmente disponibilidades de agua en el suelo con las que se calcula la ETR.

Las proyecciones indican que la ETP asciende, lo que provocaría un aumento de la ETR si existiera suficiente agua disponible. Por otro lado disminuyen las PRE y disponibilidades de agua mensuales, lo que finalmente provoca que la evolución anual de ambas variables, PRE y ETR, sea decreciente, especialmente en el último periodo de análisis, 2071-2100.

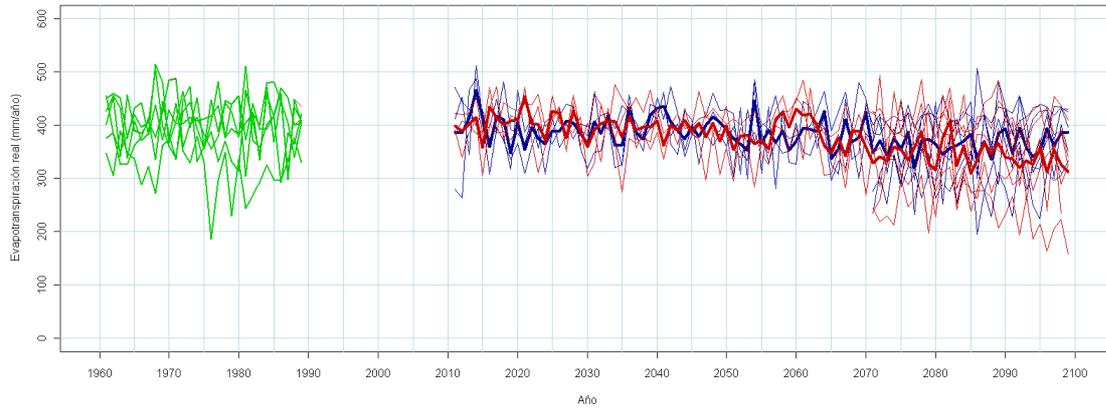


Figura 105. Series de ETR (mm) anual en España. Periodo de control (verde); A2 (rojo); B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

En términos medios, en España las proyecciones del escenario A2 están dando unas desviaciones entre el -3%, 2011-2040, -7%, 2041-2070, y el -13%, 2071-2100. En B2, siguen siendo negativas entre el -5%, -6% y -7% respectivamente. Estas medias combinan resultados que pueden llegar a ser positivos como los dan las proyecciones CGCM2-FIC-A2 y HadAM3-FIC-A2 en el 1<sup>er</sup> y último periodo. Los valores negativos correspondientes a decrementos de ETR que se dan en el resto de proyecciones y periodos. Los más pronunciados en el 1<sup>er</sup> periodo corresponden a ECHAM4-FIC y en el último a HadCM3-SDSM y ECHAM4-RCAO (figura siguiente).

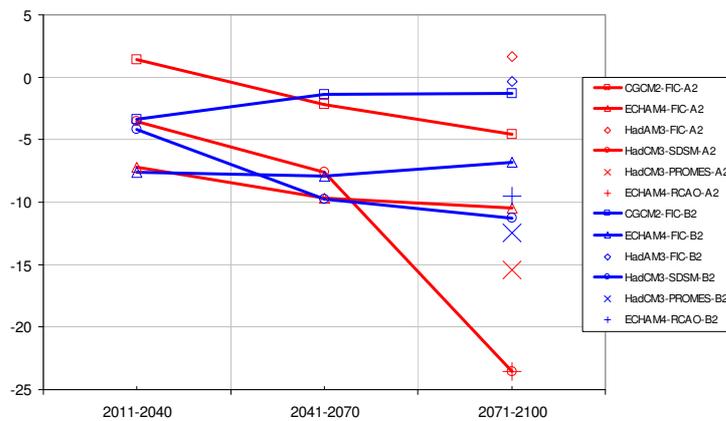


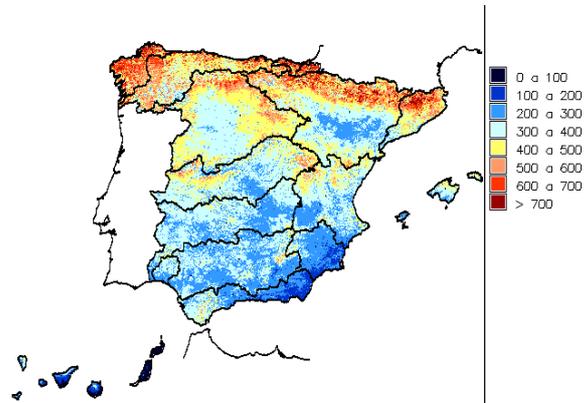
Figura 106. Δ ETR (%) en España en periodos s. XXI

Los siguientes mapas muestran la variabilidad espacial de las medias de ETR en cada uno de los periodos de análisis. En ambos escenarios no se encuentran diferencias significativas hasta llegar al último periodo en el que las disponibilidades de agua en la mitad sur de la Península disminuyen.

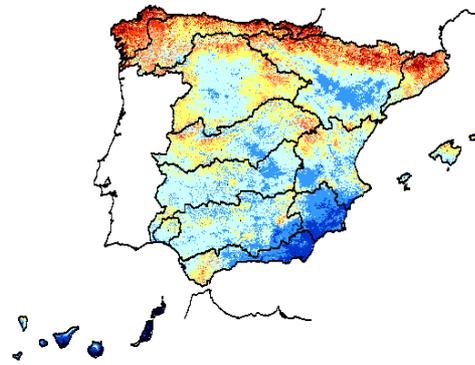
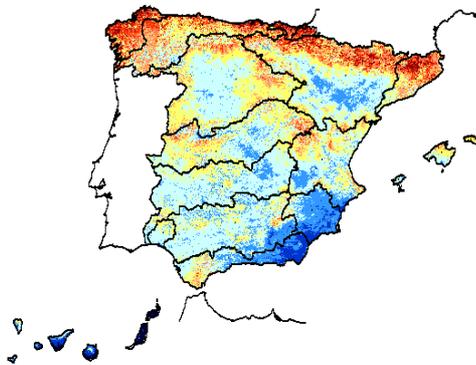
Escenario emisiones A2

Escenario emisiones B2

1961-1990

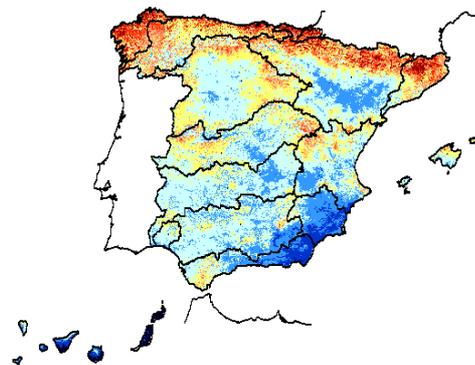
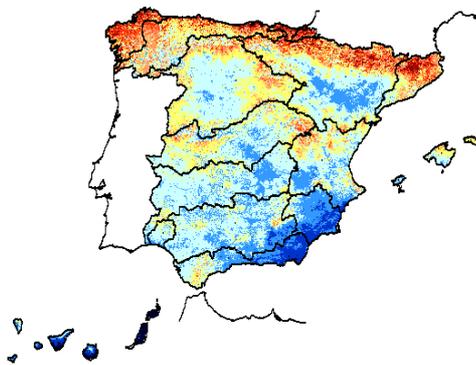


2011-2040



0 a 100  
 100 a 200  
 200 a 300  
 300 a 400  
 400 a 500  
 500 a 600  
 600 a 700  
 > 700

2041-2070



0 a 100  
 100 a 200  
 200 a 300  
 300 a 400  
 400 a 500  
 500 a 600  
 600 a 700  
 > 700

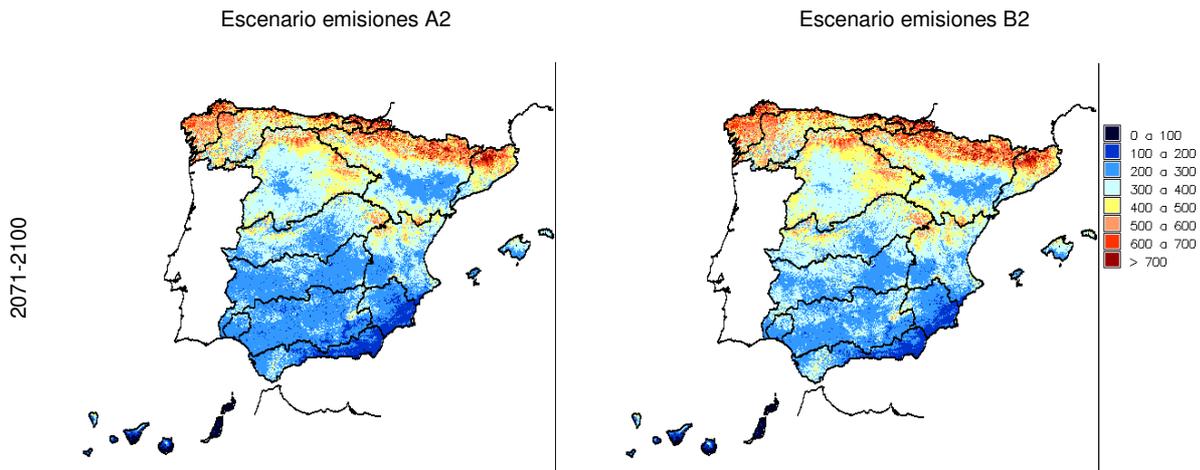
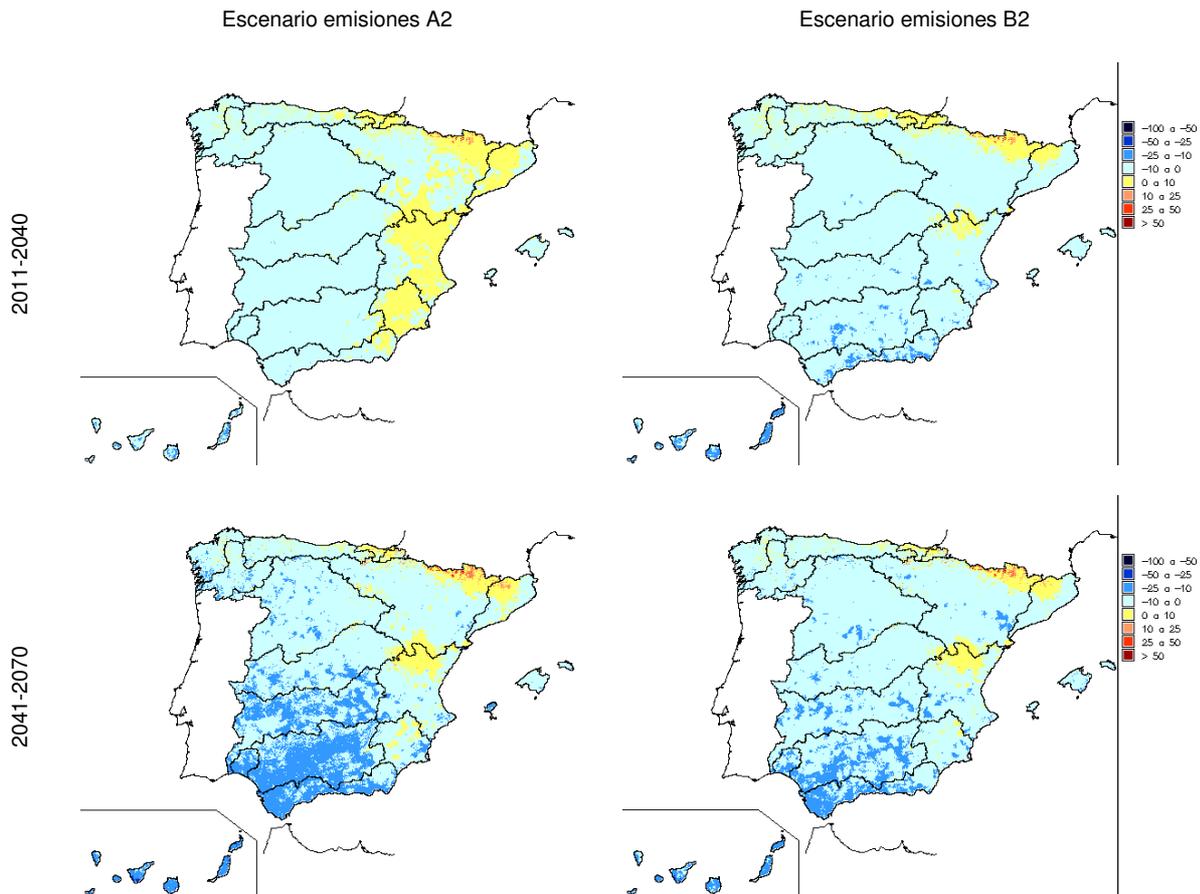


Figura 107. ETR (mm) media anual en el periodo de control y por periodo del siglo XXI

La ETR aumenta en la zona oriental peninsular en el 1<sup>er</sup> periodo y escenario A2 y en las zonas de montaña del norte en todos los periodos. Es decir, donde, además del aumento de ETP, hay suficiente agua disponible. En el periodo 2071-2100, la ETR del escenario A2 especialmente en la mitad sur (siguiente figura) se reduce más que la correspondiente al B2.



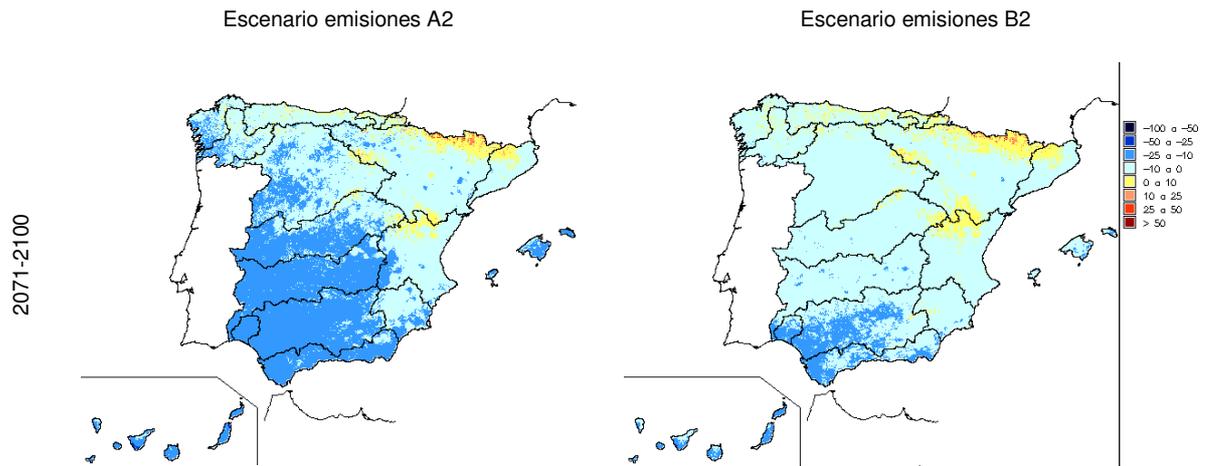


Figura 108.  $\Delta$  ETR (%) por periodo del siglo XXI respecto al periodo de control

Las características de la distribución espacial comentadas se observan en la siguiente tabla con la desagregación por D.H. de las desviaciones respecto al periodo 1961-1990.

		Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2							
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	2011-2040	1	-7		-4			-3	-3	-8		-4			-5
	2041-2070	-2	-10		-8			-6	-1	-8		-10			-6
	2071-2100	-5	-10	2	-24	-15	-24	-12	-1	-7	0	-11	-12	-10	-7
Cantábrico	2011-2040	0	-2		-3			-2	0	0		-2			-1
	2041-2070	0	-3		-6			-3	0	-2		-6			-3
	2071-2100	1	-6	4	-14	-2	-17	-5	2	-3	3	-7	-4	-6	-2
Galicia-Costa	2011-2040	-3	-7		-5			-5	-1	-4		-4			-3
	2041-2070	-3	-11		-8			-8	-2	-7		-10			-6
	2071-2100	-6	-16	-2	-17	-7	-21	-11	-2	-10	-3	-10	-7	-10	-7
CI País Vasco	2011-2040	2	2		1			2	2	3		2			2
	2041-2070	3	3		0			2	2	2		0			1
	2071-2100	6	2	6	-4	-6	-19	-1	5	4	6	0	-6	-9	1
Miño-Sil	2011-2040	-3	-8		-5			-5	-1	-5		-4			-3
	2041-2070	-3	-12		-7			-7	-2	-8		-9			-7
	2071-2100	-4	-16	2	-16	-6	-22	-10	-1	-11	0	-10	-7	-10	-6
Duero	2011-2040	0	-11		-5			-5	-3	-10		-5			-6
	2041-2070	-2	-13		-6			-7	-2	-11		-10			-7
	2071-2100	-5	-13	7	-23	-10	-27	-12	-1	-10	4	-9	-9	-12	-6
Tajo	2011-2040	1	-10		-4			-4	-3	-11		-5			-6
	2041-2070	-3	-13		-6			-7	-1	-11		-10			-7
	2071-2100	-6	-14	2	-24	-18	-31	-14	-2	-9	0	-9	-14	-13	-7
Guadiana	2011-2040	0	-13		-4			-5	-5	-15		-4			-8
	2041-2070	-5	-17		-8			-10	-3	-13		-11			-9
	2071-2100	-10	-18	-1	-29	-25	-36	-19	-5	-11	-3	-11	-17	-15	-10
Guadalquivir	2011-2040	1	-14		-3			-5	-7	-15		-2			-8
	2041-2070	-6	-19		-10			-12	-4	-14		-11			-10
	2071-2100	-14	-21	-6	-30	-27	-30	-20	-7	-14	-7	-14	-18	-12	-12
CI Andalucía	2011-2040	0	-12		-4			-6	-7	-13		-4			-8
	2041-2070	-7	-18		-13			-13	-5	-13		-14			-11
	2071-2100	-14	-20	-11	-32	-28	-25	-21	-9	-13	-11	-19	-19	-10	-14
Segura	2011-2040	6	0		-3			1	-9	-5		-2			-5
	2041-2070	-1	-4		-9			-5	-1	-6		-9			-5
	2071-2100	1	-7	-7	-20	-25	-11	-12	-1	-1	-8	-15	-17	-1	-8
Júcar	2011-2040	5	1		-2			1	-7	-3		-5			-5
	2041-2070	0	-1		-8			-3	-1	-2		-9			-4
	2071-2100	-1	-1	-2	-22	-20	-13	-10	-1	2	-4	-14	-17	-1	-6
Ebro	2011-2040	4	-3		-3			-1	-1	-3		-5			-3
	2041-2070	2	-2		-7			-2	2	-3		-10			-4
	2071-2100	2	-1	8	-25	-12	-19	-7	4	-2	5	-12	-11	-8	-3
CI Cataluña	2011-2040	4	2		-2			1	-2	1		-5			-2
	2041-2070	2	2		-5			0	1	2		-8			-2
	2071-2100	0	4	1	-17	-12	-15	-6	1	4	-2	-10	-13	-4	-4
Islas Baleares	2011-2040	-1	-4		-3			-3	-9	-8		-4			-6
	2041-2070	-4	-10		-8			-7	-4	-8		-10			-8
	2071-2100	-8	-18	-13	-23	-13	-19	-16	-7	-10	-16	-12	-9	-9	-11
Canarias	2011-2040	-3	-15		-5			-8	-7	-13		-13			-11
	2041-2070	-8	-17		-21			-16	-4	-16		-17			-13
	2071-2100	-13	-23	-18	-32			-22	-9	-16	-16	-29			-17

**ETR:** Incrementos (%) de medias anuales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RCOA (PRUDENCE-SMHI). Colores: verde < 0%, amarillo 0% a 15%, rojo > 15%

Tabla 20.  $\Delta$  ETR (%) por D.H., proyección y periodo

Con relación a la estacionalidad, la ETR observada presenta en la situación actual un pico en primavera, producto de las PRE de esa estación y de las disponibilidades de meses húmedos anteriores en los que no se evapotranspiró todo el agua almacenada en el suelo. Los mínimos del ciclo de la ETR se encuentran en verano, por agotamiento de las disponibilidades, y en invierno, por reducción de la ETP. La estacionalidad de la ETR

resultante de la implementación de las proyecciones al modelo hidrológico conservan más o menos la misma evolución durante el periodo de control, con los mismos picos y valles en la evolución del ciclo. En todo caso, es destacable el adelanto del pico de mayo a abril de ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC, HadCM3-SDSM y ECHAM4-RCAO y en el valle de agosto a julio de ECHAM4-FIC. La siguiente figura muestra los valores medios mensuales de ETR alcanzados durante el periodo de control. Los valores medios de cada mes se han dividido a su vez por la media de los doce meses para regularizar el gráfico y facilitar la comparación.

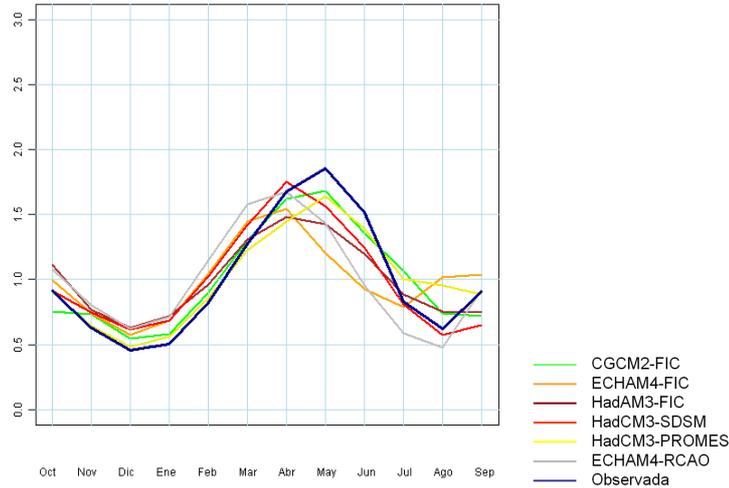


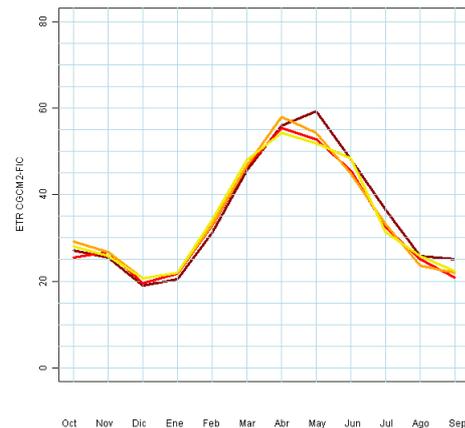
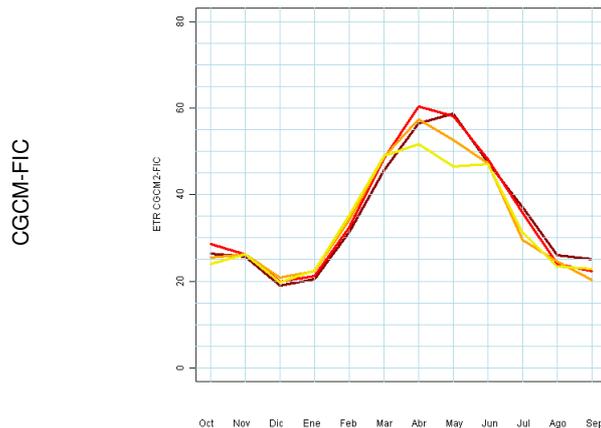
Figura 109. Ciclo medio de ETR estandarizada durante 1961-1990

La evolución del ciclo medio de ETR se muestra en la siguiente gráfica. Los picos de primavera se adelantan y reducen en el tiempo y los decrementos importantes se dan entre primavera y verano. En invierno se evapotranspira mayor cantidad por ascenso de ETP.

- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

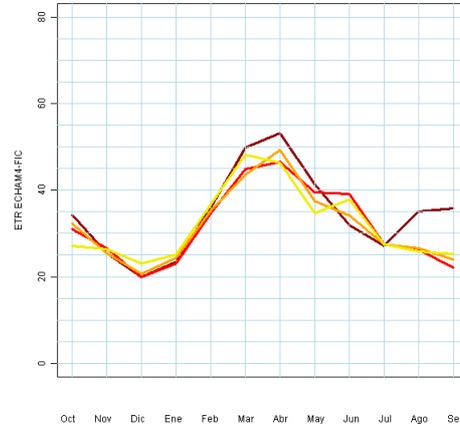
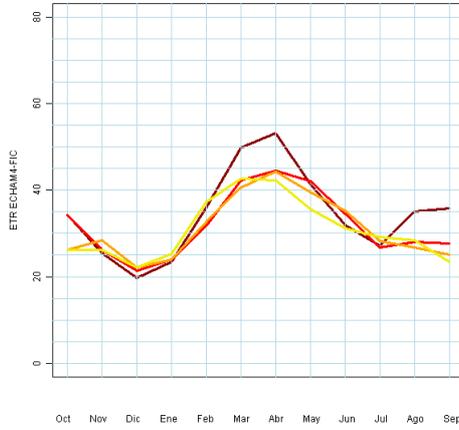


- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

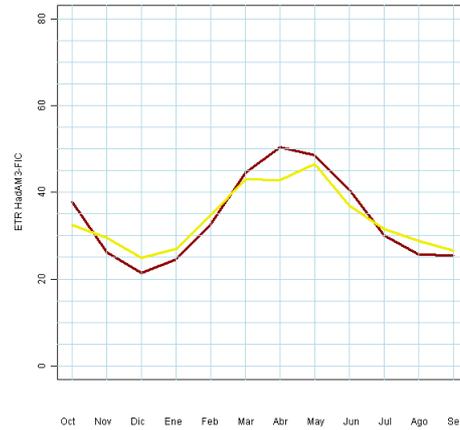
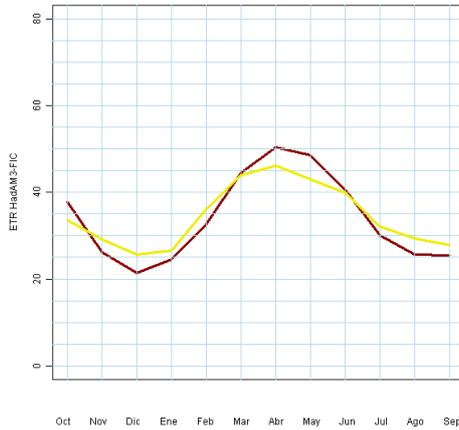
Escenario A2

Escenario B2

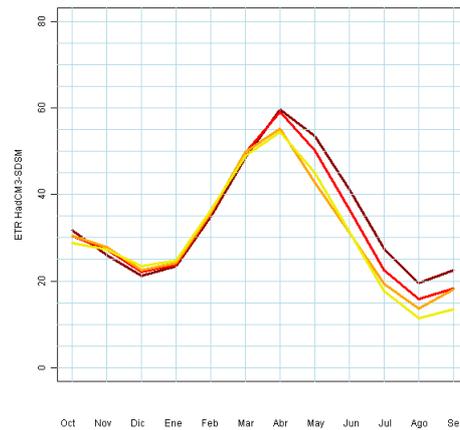
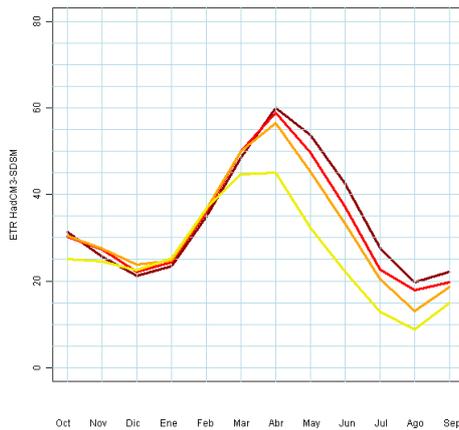
ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC



HadCM3-SDSM

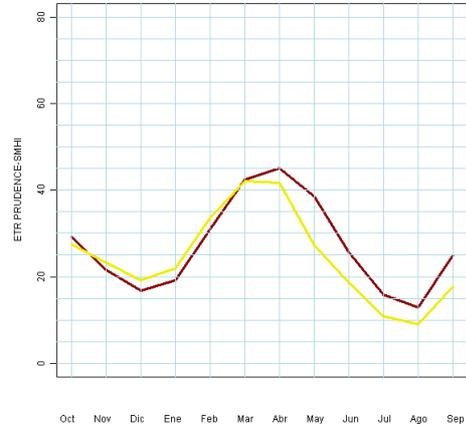
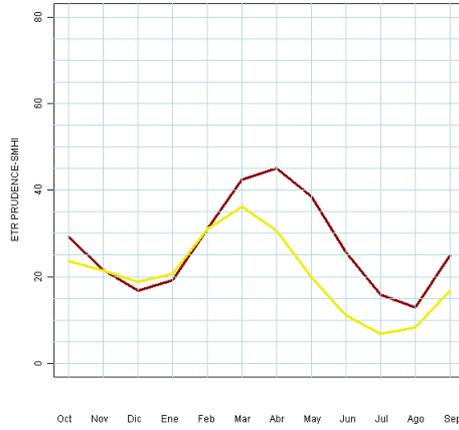


— 1961-1990  
— 2011-2040  
— 2041-2070  
— 2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

ECHAM4-RCAO



HecM3-PROMES

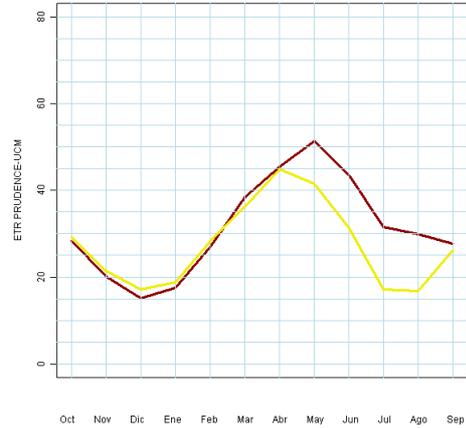
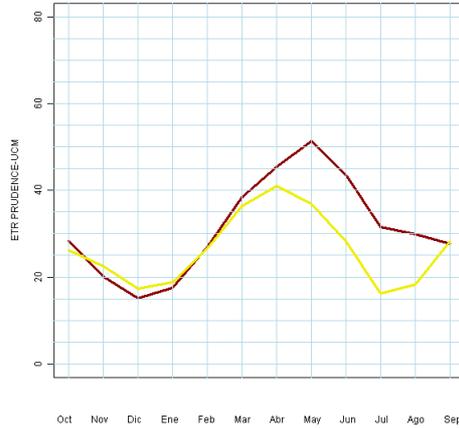


Figura 110. Ciclo estacional de ETR (mm) por proyección

La siguiente tabla desagrega los resultados por estación climática en valores medios de España.

		Escenario de emisiones A2						Escenario de emisiones B2							
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
<b>Anual</b>	2011-2040	1	-7		-4			-3	-3	-8		-4			-5
	2041-2070	-2	-10		-8			-6	-1	-8		-10			-6
	2071-2100	-5	-11	2	-24	-15	-24	-12	-1	-7	0	-11	-12	-10	-7
<b>OND</b>	2011-2040	4	3		2			3	1	-2		3			0
	2041-2070	3	-4		4			1	6	-2		1			2
	2071-2100	-2	-6	4	-8	4	-6	-2	4	-4	2	1	7	3	2
<b>EFM</b>	2011-2040	5	-10		3			-1	4	-6		2			0
	2041-2070	8	-11		4			0	5	-6		3			0
	2071-2100	10	-4	5	0	0	-5	1	8	1	4	3	1	5	4
<b>AMJ</b>	2011-2040	2	-4		-7			-3	-6	-1		-6			-4
	2041-2070	-3	-6		-14			-8	-4	-5		-16			-8
	2071-2100	-10	-13	-8	-37	-24	-43	-22	-5	-5	-10	-15	-16	-20	-12
<b>JAS</b>	2011-2040	-7	-16		-13			-12	-10	-23		-19			-17
	2041-2070	-16	-18		-25			-19	-10	-20		-27			-19
	2071-2100	-12	-18	11	-47	-29	-39	-21	-8	-20	9	-38	-33	-29	-19

**ETR:** Desviaciones (%) de medias anuales y trimestrales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PRUDENCE-UCM; P = modelo global ECHAM4 y regionalización PRUDENCE-SMHI.. Colores: verde < 0%, amarillo 0% a 15%, rojo > 15%.

Tabla 21.  $\Delta$  ETR (%) estacional en España

## 6.2 Humedad en el suelo

Conforme al modelo hidrológico implementado, en cada celda del suelo se realiza el balance de agua que permite estimar las disponibilidades de agua y la ETR. El agua procedente de la PRE se acumula en el suelo en función del esquema de generación de ESC y del parámetro humedad máxima almacenable en el suelo,  $H_{m\acute{a}x}$ . El suelo se vacía en función de la demanda de agua o ETP. El resultado del modelo en cada mes es el estado final de almacenamiento de agua en el suelo, HMS.

El parámetro  $H_{m\acute{a}x}$  es constante en las distintas simulaciones realizadas para la evaluación del impacto. Procede de una reclasificación que tiene en cuenta las texturas del suelo, la pendiente del terreno y los usos de suelo. Al no depender únicamente del último factor, cabe esperar que la evaluación del impacto sea robusta ante los cambios de uso de suelo.

Un primer índice de impacto se obtiene al evaluar cuánto desciende en media el porcentaje de HMS estandarizado por  $H_{m\acute{a}x}$ , en cada periodo del s. XXI respecto al periodo de control. Los siguientes mapas muestran estos descensos porcentuales en los cuatro trimestres del año medio. Se han escogido los resultados del periodo 2011-2040 con SRES A2 y los periodos 2011-2040 y 2071-2100 en SRES A2 y B2, todos respecto al periodo de control 1961-1990. Estos ejemplos permiten comprobar el empeoramiento del impacto hacia final de siglo considerando los SRES A2, así como la recuperación del SRES B2. Además, permite localizar las zonas de impacto en las orlas de montaña de las cuencas hidrográficas; en los valles los mayores ETP hacen que los valores de HMS sean reducidos y consecuentemente el impacto. En verano, cuando el suelo está tradicionalmente seco, el impacto es despreciable.

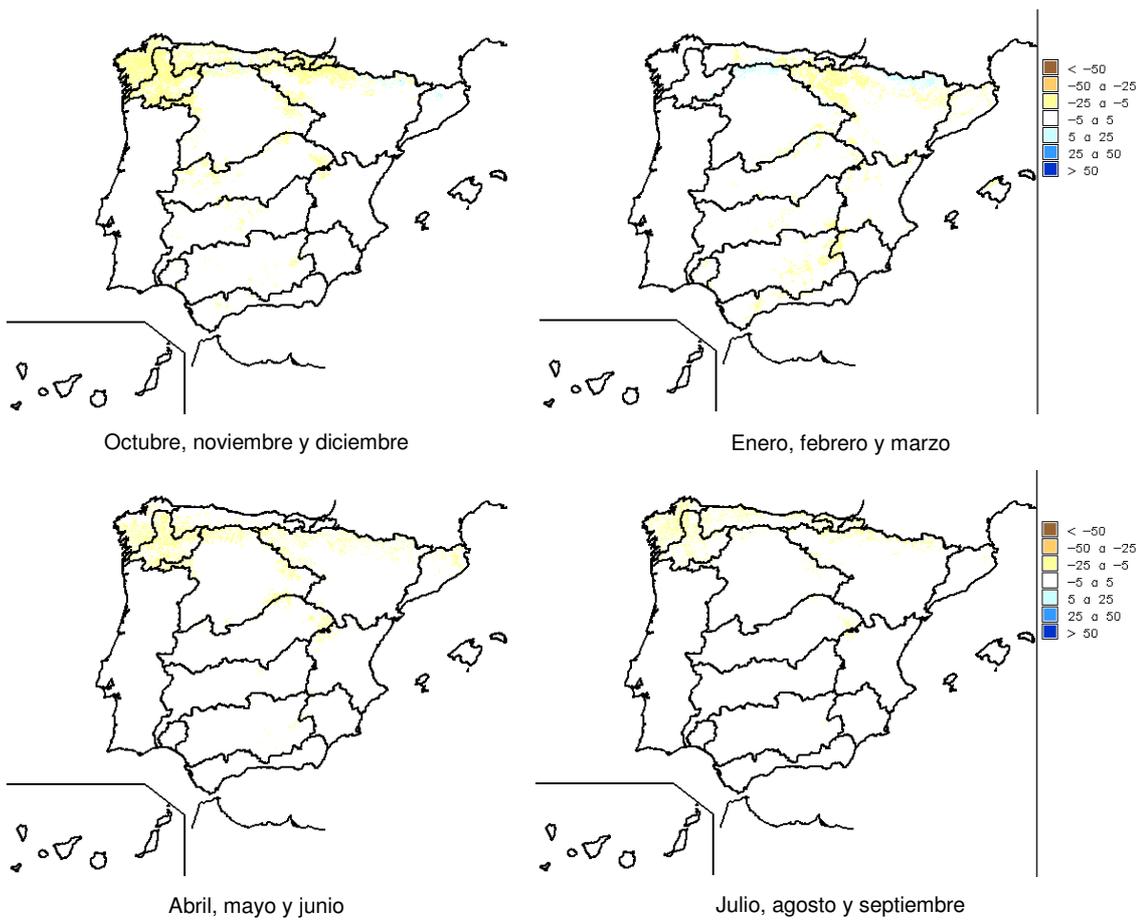
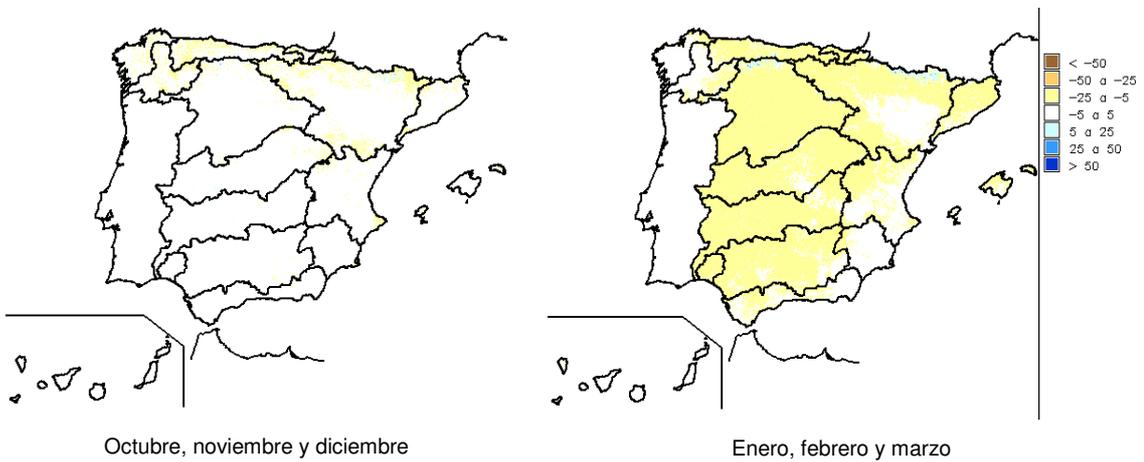


Figura 111. Variación HMS/H<sub>máx</sub> (%) del periodo 2011-2040 respecto al 1961-1990. SRES A2



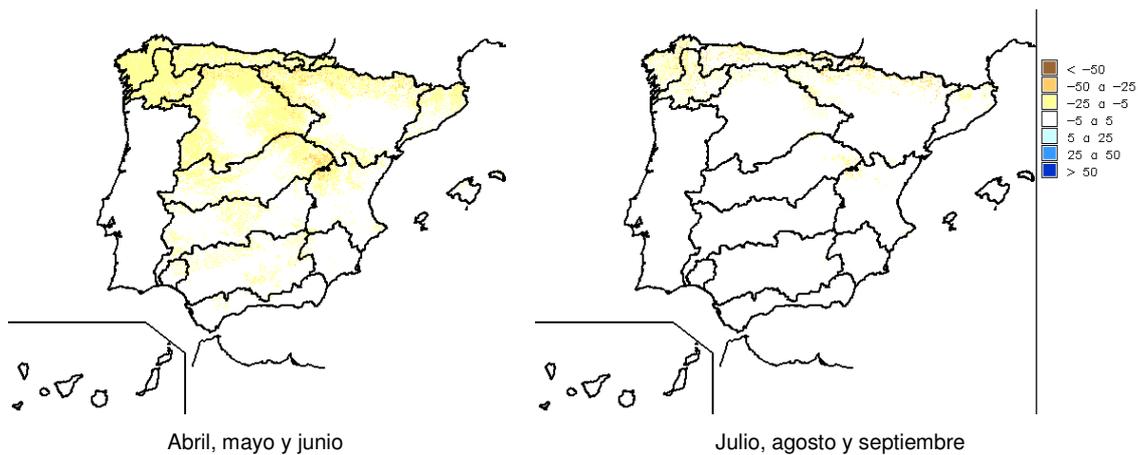


Figura 112. Variación  $HMS/H_{m\acute{a}x}$  (%) del periodo 2071-2100 respecto al 1961-1990. SRES A2

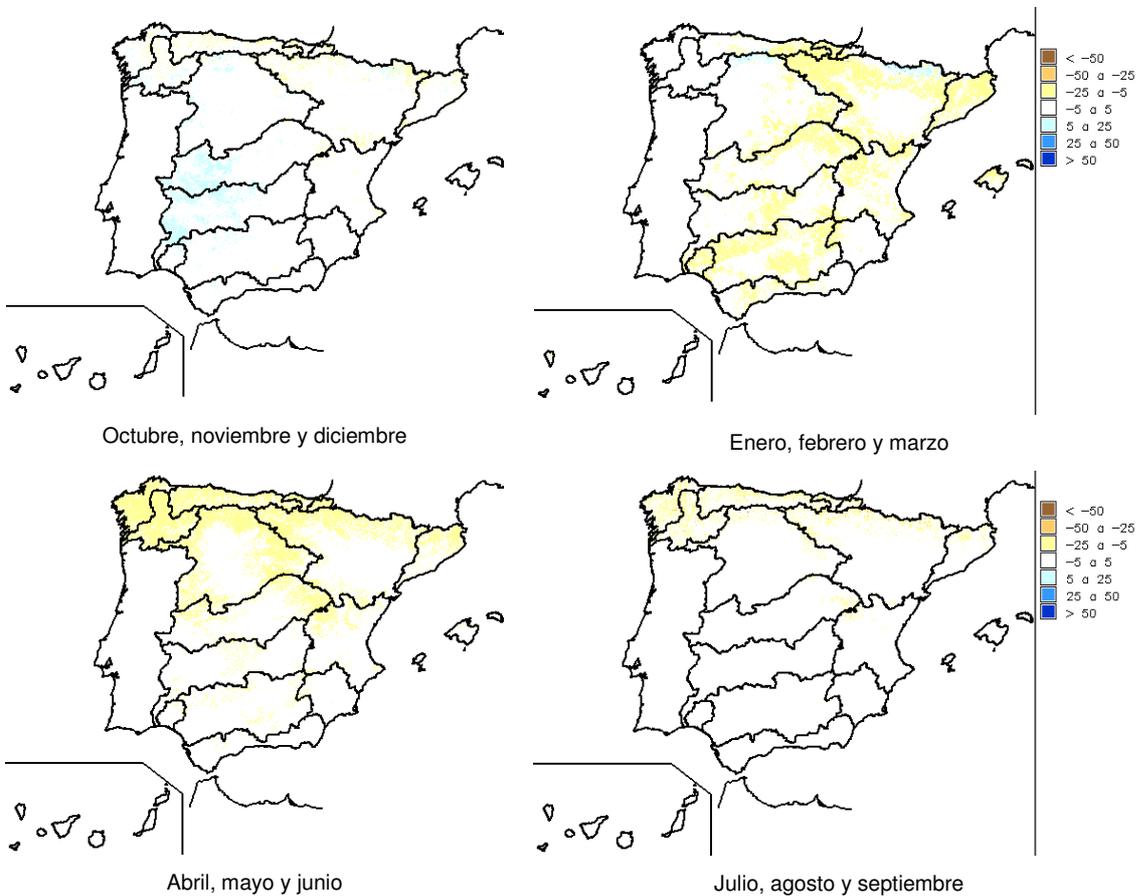


Figura 113. Variación  $HMS/H_{m\acute{a}x}$  (%) del periodo 2071-2100 respecto al 1961-1990. SRES B2

La siguiente tabla muestra los valores estacionales de los decrementos porcentuales de HMS en España. Para su estimación se suman las disponibilidades medias de HMS y se divide entre  $H_{m\acute{a}x}$ . La variación se calcula como diferencia entre la relación obtenida en cada uno de los periodos futuros respecto al periodo de control.

Las variaciones se dan en otoño e invierno. En verano son prácticamente nulas debido a que el suelo está prácticamente seco. Los mayores descensos son del MCG ECHAM4, ECHAM4-FIC-A2 y ECHAM4-RCAO-A2. Sin embargo, HadCM3-SDSM-A2 y CGCM2-FIC-

A2 son las que dan los descensos más acusados entre el 2º y 3º periodo del s. XXI. En B2 y CGCM2-FIC o HadCM3-SDSM las reducciones no son claras.

	Escenario de emisiones A2							Escenario de emisiones B2						
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
2011-2040	0	-7		0			-2	-1	-8		-1			-2
OND 2041-2070	-2	-9		-1			-4	-1	-8		0			-1
2071_2100	-6	-11	-1	-5	-8	-8	-6	-3	-9	-1	-1	-5	-5	-4
2011-2040	0	-8		1			-2	-3	-6		-1			0
EFM 2041-2070	-2	-11		-2			-5	-1	-6		1			2
2071_2100	-9	-10	-2	-10	-8	-11	-8	-4	-7	-3	-2	-5	-5	-4
2011-2040	-1	-1		-2			-2	-3	-1		-4			-2
AMJ 2041-2070	-4	-2		-3			-3	-3	-1		-2			-1
2071_2100	-7	-3	-2	-9	-8	-7	-6	-5	-2	-2	-5	-6	-5	-4
2011-2040	-1	-1		-1			-1	-1	-1		-1			-1
JAS 2041-2070	-1	-1		-1			-1	-1	-1		-1			-1
2071_2100	-1	-1	0	-1	-4	-1	-2	-1	-1	0	-1	-3	-1	-1

Humedad en el suelo. Variaciones (%) de medias trimestrales respecto 1961-1990 con relación a Hmax. Títulos de columnas: A =escenario de emisiones A2; B =escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización AnFIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización AnFIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización AnFIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PRUDENCE-UCM; P = modelo global ECHAM4 y regionalización PRUDENCE-SMHI. Med: desviaciones medias de A2 y B2. Colores: verde: >0%; Amarillo: 0 a -5%; Rojo: <-5%.

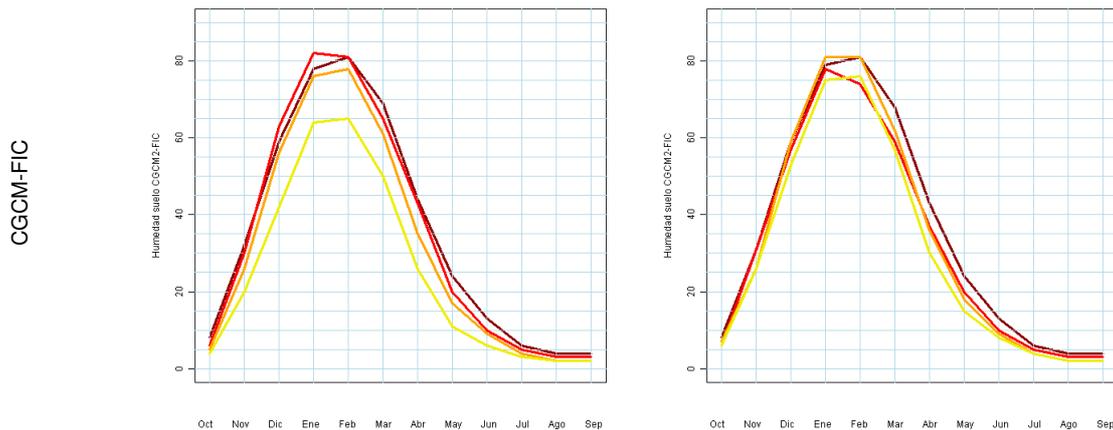
Tabla 22. Variación HMS/H<sub>máx</sub> (%) estacional en España

Las siguientes figuras muestran la evolución estacional de HMS en mm/mes. Al verano es seco lo que relativiza el impacto. ECHAM4-FIC-A2 da un acusado descenso durante el 1º periodo, mientras que CGCM2-FIC-A2 y HadCM3-FIC-A2 intensifican el impacto durante el último periodo, que parece alargar la estación seca en un mes cualquiera que sea la proyección escogida. Las recuperaciones del escenario B2 son apreciables desde la 2ª mitad del 2º periodo lo que reduce los impactos en CGCM2-FIC-B2 y HadCM3-SDSM-B2.

— 1961-1990  
— 2011-2040  
— 2041-2070  
— 2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

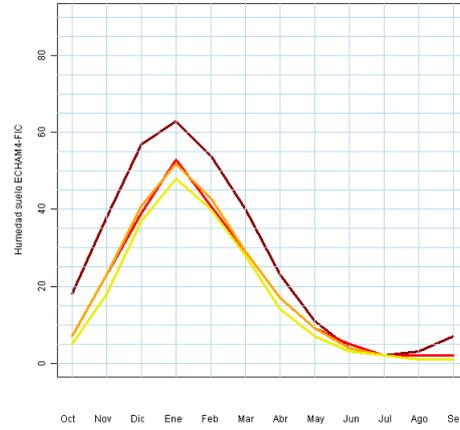
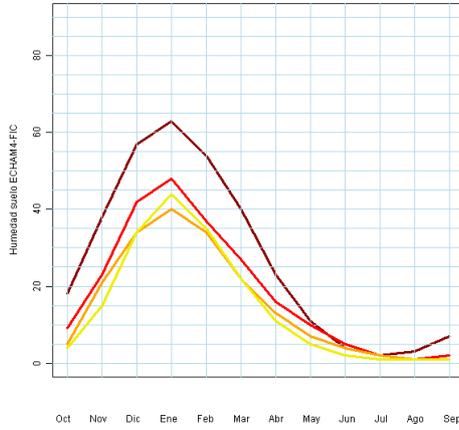


- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

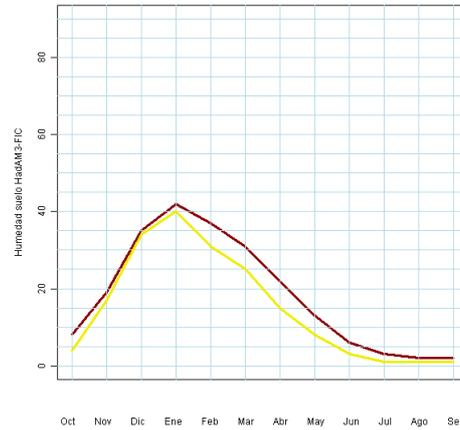
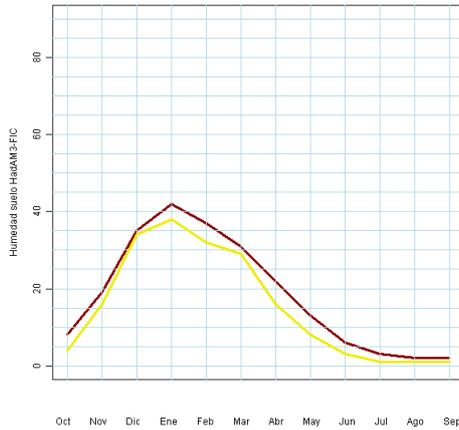
Escenario A2

Escenario B2

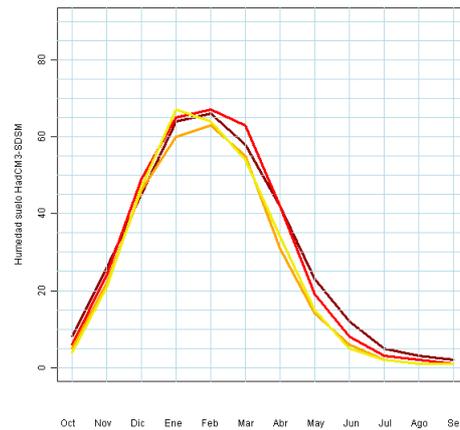
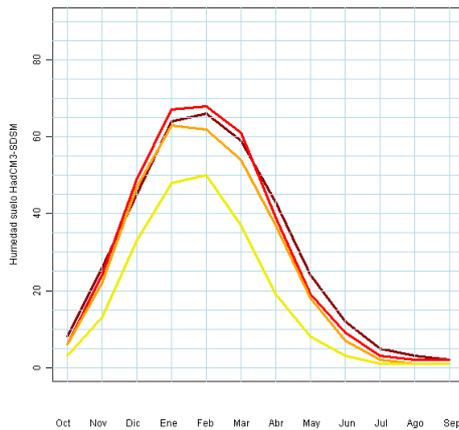
ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC



HadCM3-SDSM

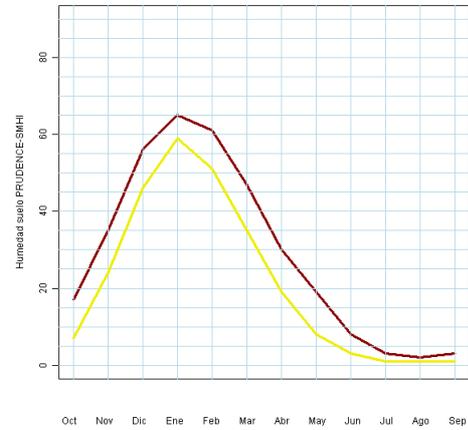
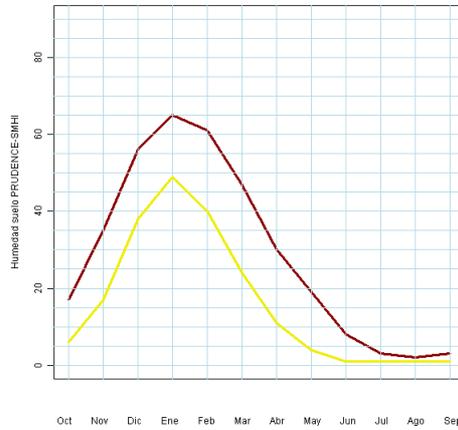


1961-1990  
2011-2040  
2041-2070  
2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

ECHAM4-RCAO



HecM3-PROMES

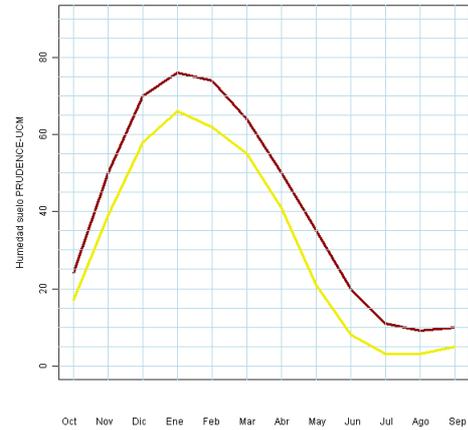
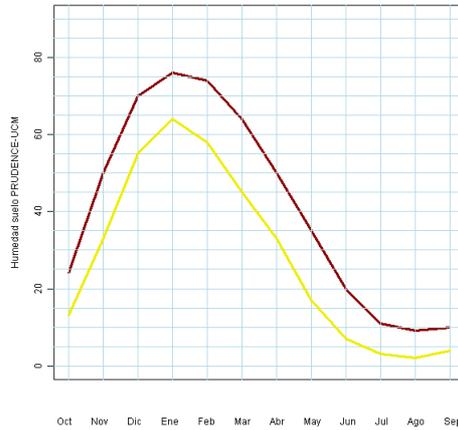


Figura 114. Ciclo estacional de HMS (mm) por proyección

Si se utiliza como índice de cada territorio la desviación del contenido total de agua en el suelo respecto a la del periodo de control, se vuelven a encontrar las mismas conclusiones. El orden de magnitud de este índice es superior en términos absolutos al de las variaciones, especialmente en verano debido al efecto de escasos contenidos de humedad en el denominador del índice, lo que hace su interpretación confusa.

		Escenario de emisiones A2							Escenario de emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
OND	2011-2040	-1	-35		2			-13	-4	-38		-1			-16
	2041-2070	-12	-47		-5			-24	-6	-38		-8			-19
	2071-2100	-34	-53	-13	-37	-30	-43	-36	-13	-47	-12	-9	-21	-28	-23
EFM	2011-2040	0	-29		3			-7	-7	-22		3			-8
	2041-2070	-6	-39		-6			-15	-2	-21		-6			-8
	2071-2100	-22	-36	-11	-29	-22	-34	-26	-9	-27	-13	-2	-14	-16	-13
AMJ	2011-2040	-9	-19		-15			-13	-17	-16		-12			-15
	2041-2070	-26	-36		-22			-26	-22	-20		-34			-27
	2071-2100	-47	-51	-33	-62	-45	-72	-52	-34	-35	-35	-30	-33	-49	-35
JAS	2011-2040	-26	-51		-30			-35	-25	-49		-35			-36
	2041-2070	-45	-62		-52			-52	-38	-60		-56			-50
	2071-2100	-56	-71	-44	-72	-68	-66	-65	-39	-66	-43	-62	-62	-59	-57

Humedad en el suelo. Desviaciones (%) de medias anuales y trimestrales. Títulos de columnas: A =escenario de emisiones A2; B =escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización AnFIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización AnFIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización AnFIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PRUDENCE-UCM; P = modelo global ECHAM4 y regionalización PRUDENCE-SMHI. Med: desviaciones medias de A2 y B2. Colores: verde: >0%; Amarillo: 0 a 20%; Rojo: >20%.

Tabla 23.  $\Delta$  HMS (%) media estacional en España

En la tabla siguiente se muestran el mismo índice de desviaciones desagregado por D.H. Se han obtenido valores medios anuales por promedios de los mensuales con objeto de simplificar la evaluación del impacto. Se observa que durante el periodo 2011-2040 se obtienen descensos de valores anuales medios para España del 2% al 31% respecto al periodo de control. El descenso medio de todas las proyecciones es de un 11% en A2 y de un 12% en B2, que serían inferiores si no se contemplara ECHAM4-FIC. Los mayores descensos se dan en las DD.HH. de la mitad sur de la Península, con descensos medios del 17% en A2, si bien son valores sesgados por las altas reducciones de ECHAM4-FIC (se superan reducciones anuales del 50%). Por el contrario, los menores descensos se dan en las DD.HH. del norte de España con reducciones en torno al 8%, sin tantas discrepancias entre proyecciones.

Durante el periodo 2041-2070, se obtienen descensos de valores anuales medios para España del 8% al 43%. El descenso medio de todos los escenarios climáticos es de un 18%, siendo del 21% para los A2 y del 16% para los B2. El descenso medio para A2 y B2 sería de un 11% si no se contemplara ECHAM4-FIC. Los mayores descensos se dan en las DD.HH. del sur de la Península, con descensos medios del 17% al 29% para B2 y del 26% al 34% para A2, llegando a reducciones del 67% en el Segura según ECHAM4-FIC-A2. Por el contrario, los menores descensos se dan en las DD.HH. del norte de España con reducciones medias en torno al 13%. En el noreste de España, las reducciones rondan el 20%.

Por último, durante el periodo 2071-2100 se obtienen descensos de valores medios anuales para España del 12% al 46%. El descenso medio de todos los escenarios climáticos es de un 28%, siendo del 35% para los A2 y del 22% para los B2. Los mayores descensos se dan en las DD.HH. del sur de la Península, con descensos medios sobre el 33% para B2 y el 46% para A2. Por el contrario, los menores descensos se dan en las DD.HH. del noroeste de España con reducciones medias en torno al 15% para B2 y al 22% para A2.

		Escenario de emisiones A2							Escenario de emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	2011-2040	-3	-31		-2			-11	-9	-28		-2			-12
	2041-2070	-12	-43		-10			-21	-8	-28		-14			-16
	2071-2100	-31	-46	-17	-40	-32	-45	-35	-16	-37	-18	-12	-23	-27	-22
Cantábrico	2011-2040	-7	-14		-7			-9	-6	-12		-9			-9
	2041-2070	-9	-20		-14			-14	-8	-16		-17			-13
	2071-2100	-16	-30	-14	-33	-29	-39	-27	-8	-22	-15	-18	-21	-27	-19
Galicia-Costa	2011-2040	-6	-15		-5			-9	-3	-12		-7			-7
	2041-2070	-8	-22		-9			-13	-7	-17		-10			-11
	2071-2100	-18	-28	-8	-21	-23	-32	-22	-9	-23	-10	-11	-16	-23	-15
CI País Vasco	2011-2040	-5	-10		-7			-7	-5	-8		-10			-8
	2041-2070	-8	-17		-17			-14	-7	-12		-20			-13
	2071-2100	-14	-27	-20	-36	-39	-50	-31	-6	-18	-20	-23	-29	-38	-22
Miño-Sil	2011-2040	-5	-17		-5			-9	-2	-15		-7			-8
	2041-2070	-9	-23		-8			-13	-7	-20		-10			-12
	2071-2100	-18	-31	-9	-22	-21	-31	-22	-9	-25	-11	-11	-14	-22	-15
Duero	2011-2040	-3	-33		0			-10	-5	-27		-1			-10
	2041-2070	-12	-43		-6			-18	-9	-28		-8			-14
	2071-2100	-30	-47	-8	-38	-26	-48	-34	-12	-34	-9	-5	-19	-27	-18
Tajo	2011-2040	-2	-40		2			-10	-8	-37		1			-12
	2041-2070	-13	-51		-5			-20	-9	-32		-9			-15
	2071-2100	-34	-52	-18	-41	-36	-52	-39	-16	-39	-17	-7	-26	-23	-21
Guadiana	2011-2040	-3	-47		4			-12	-12	-44		7			-13
	2041-2070	-16	-61		-11			-26	-10	-36		-11			-17
	2071-2100	-41	-57	-19	-47	-44	-47	-44	-22	-46	-16	-7	-29	-15	-23
Guadalquivir	2011-2040	-1	-50		4			-13	-20	-49		12			-18
	2041-2070	-19	-67		-16			-32	-7	-41		-15			-19
	2071-2100	-49	-63	-36	-49	-46	-45	-50	-26	-54	-36	-9	-34	-34	-31
CI Andalucía	2011-2040	-3	-51		3			-15	-17	-51		10			-18
	2041-2070	-20	-66		-21			-34	-8	-40		-16			-20
	2071-2100	-51	-58	-40	-52	-44	-30	-49	-29	-53	-32	-14	-33	-33	-32
Segura	2011-2040	2	-44		1			-18	-24	-49		7			-24
	2041-2070	-12	-67		-19			-38	-6	-49		-23			-29
	2071-2100	-36	-60	-37	-46	-48	-35	-45	-24	-64	-25	-16	-24	-50	-34
Júcar	2011-2040	7	-36		-4			-11	-21	-42		-4			-21
	2041-2070	-12	-59		-14			-28	-4	-42		-21			-23
	2071-2100	-35	-57	-30	-53	-36	-45	-43	-24	-55	-29	-19	-28	-25	-29
Ebro	2011-2040	-4	-27		-9			-13	-12	-23		-10			-15
	2041-2070	-11	-39		-15			-21	-8	-27		-24			-19
	2071-2100	-27	-47	-20	-47	-35	-50	-38	-15	-38	-25	-20	-24	-31	-25
CI Cataluña	2011-2040	3	-22		-6			-7	-17	-24		-13			-18
	2041-2070	-10	-40		-10			-19	-5	-27		-26			-19
	2071-2100	-27	-45	-27	-46	-28	-39	-34	-28	-31	-32	-21	-26	-18	-26
Islas Baleares	2011-2040	15	-41		11			-7	-10	-52		10			-15
	2041-2070	9	-68		7			-20	11	-55		-22			-30
	2071-2100	-21	-63	-32	-46	-28	-38	-37	-25	-61	-41	1	-26	-27	-27
Canarias	2011-2040	-5	-25		6			-9	-7	-23		-11			-14
	2041-2070	-9	-27		-16			-18	-6	-25		-19			-17
	2071-2100	-17	-31	-14	-36			-25	-12	-27	-13	-24			-20

**Humedad en el suelo.** Desviaciones (%) de medias anuales y trimestrales. Títulos de columnas: A =escenario de emisiones A2; B =escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización AnFIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización AnFIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización AnFIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PRUDENCE-UCM; P = modelo global ECHAM4 y regionalización PRUDENCE-SMHI. Med: desviaciones medias de A2 y B2. Colores: verde: >0%; Amarillo: 0 a 20%; Rojo: >20%.

Tabla 24.  $\Delta$  HMS (%) por D.H., proyección y periodo

### 6.3 Nieve

La acumulación estacional de nieve en las zonas montañosas es una importante fuente de recurso hídrico en algunas partes de España. A pesar de las incertidumbres acerca de cómo el incremento de gases de efecto invernadero afectará a las PRE, hay una alta posibilidad de que produzca un incremento de TEM. De hecho, anteriormente se ha mostrado cómo todas las proyecciones estiman incrementos de TEM a lo largo del siglo XXI; el incremento medio para España sería de 1,5°C para el periodo 2011-40, de 2,5°C a 2,9°C para 2041-2070 y de 3,6°C a 4,8°C para 2071-2100.

Es previsible que mayores TEM supongan varios efectos destacables en la capa de nieve: incrementarán la relación PRE/nieve, retrasarán la aparición de la nieve, acortarán la época de nieves y acelerarán el proceso de fusión, lo que conllevará un cambio en la distribución estacional de la ESC. Además, también se prevén disminuciones de los reducidos glaciares españoles.

El objetivo de un análisis global sobre el impacto climático en los volúmenes de nieve consideraría como objetivos principales definir si las proyecciones prevén cambios en cantidad de nieve y en la estacionalidad, tanto en lo que se refiere a la acumulación como a la fusión. Como en anteriores capítulos, sería recomendable contrastar previamente la representatividad de los resultados de las proyecciones durante el periodo de control, pero la ventana temporal del programa desarrollado desde 1983 por la DGA, ERHIN para la Evaluación de Recursos Hídricos procedentes de la Innivación por lo que no comprende información desde el año 1961. Por otro lado, las series de volúmenes equivalentes de agua del programa ERHIN se encuentran en revisión y no se recomienda desde la propia DGA su uso. En consecuencia, el análisis de impacto del cambio climático en nieve de este informe se basa en inferir, a partir de información indirecta de las proyecciones de PRE y TEM, cambios en la acumulación y fusión de nieve.

En el programa ERHIN se han identificado las cuencas de las montañas españolas donde la presencia de la nieve es hidrológicamente significativa (Cobos et al, 2006; Arenillas et al, 2008) y definido un ámbito de actuación constituido por el Pirineo, la Cordillera Cantábrica, Sierra Nevada, Sistema Central y Cordillera Ibérica. La cota a partir de la cual se acumula la nieve de manera significativa sube de norte a sur. En el año 1990/91 (MOPT, 1992) se situaba en 1.500 m en el norte y 2.000 m en Sierra Nevada. En este informe se ha llevado a cabo un análisis cualitativo del impacto del cambio climático sobre las proyecciones de PRE y la fusión de nieve en zonas seleccionadas con cotas superiores a 1.500 metros en la España peninsular (figura siguiente). Estas seis zonas son: Pirineo, Cantábrico, Cordillera Ibérica norte, Cordillera Ibérica sur, Sistema Central y Béticas.

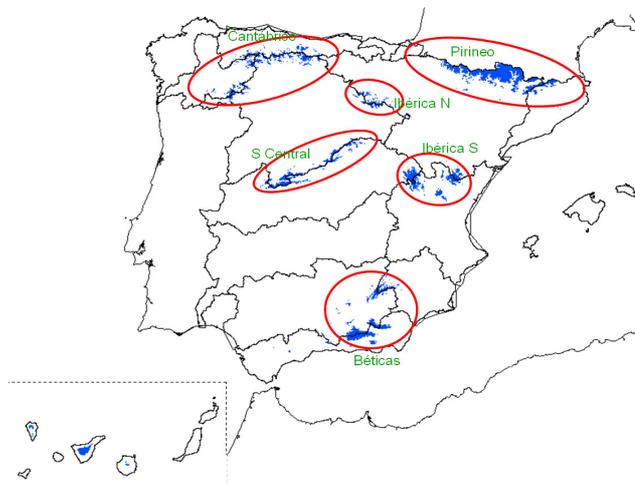
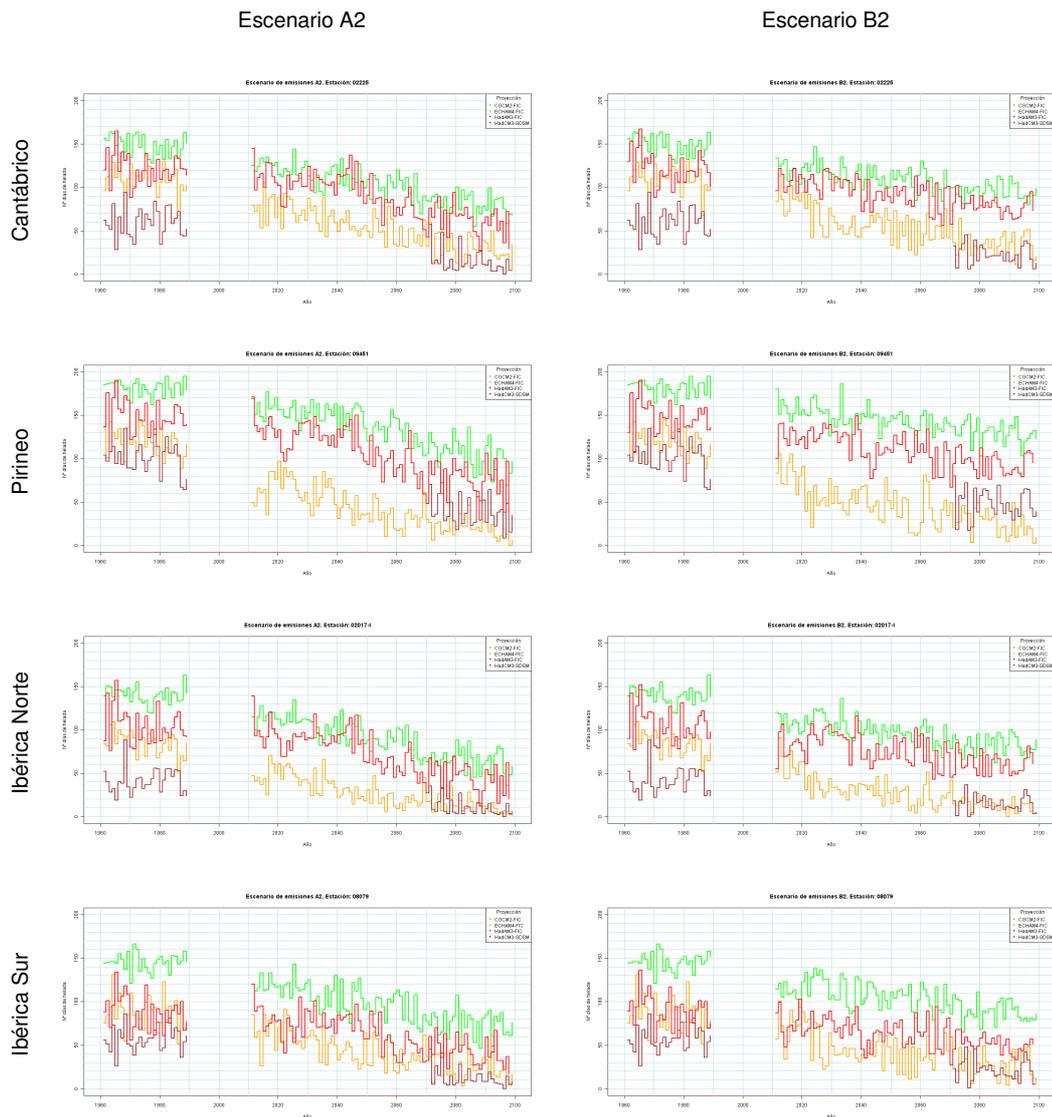


Figura 115. Áreas del territorio español con más de 1.500 metros de altitud

El índice Fd (frozen days; Frich et al, 2002) cuantifica el número de días con temperaturas inferiores a 0°C y se puede obtener a partir de las TMN proyectadas en estaciones meteorológicas correspondientes a CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC y HadAM3-FIC (1.854 estaciones) y HadCM3-SDSM (369 estaciones). De los datos diarios iniciales se han obtenido las series anuales de Fd en cada estación.

Las siguientes gráficas muestran las tendencias en términos anuales de estaciones seleccionadas en cada zona ERHIN. Durante el periodo de control, estas series tienen apariencia estacionaria. En la mayoría de casos, HadAM3-FIC da los valores mínimos y la CGCM2-FIC, los máximos, encontrándose diferencias importantes en cuanto a la localización de cada serie. El conjunto de proyecciones y estaciones muestra una tendencia decreciente del índice Fd a lo largo del s. XXI.



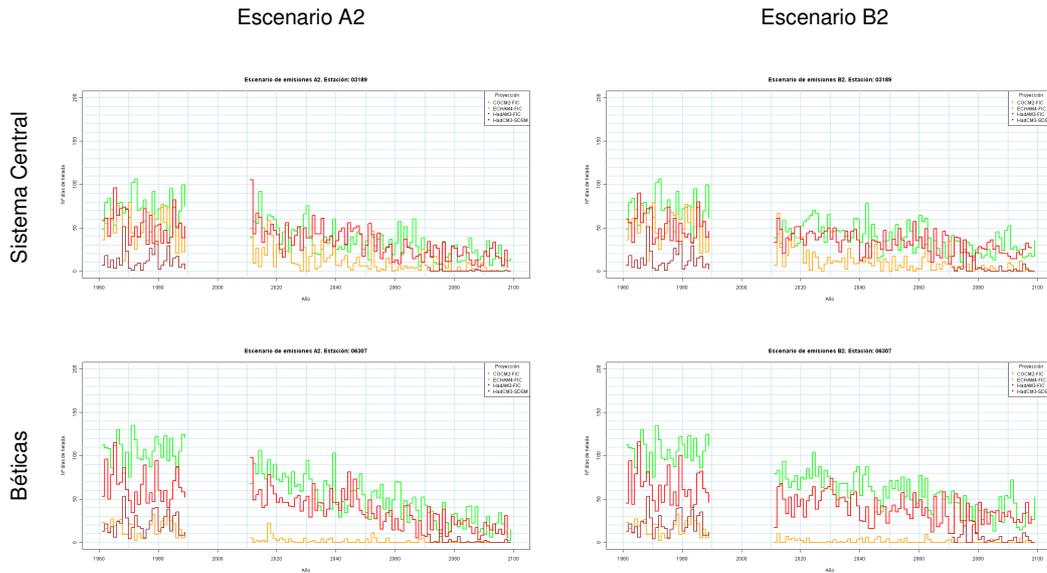
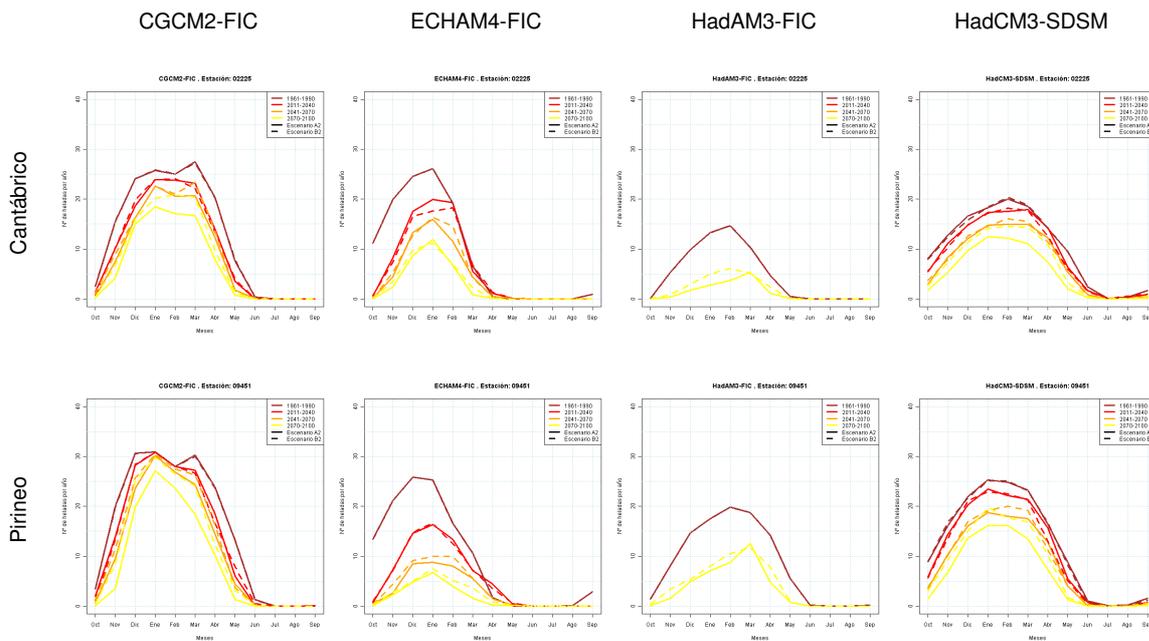


Figura 116. Nº de días de helada en selección de estaciones

La estacionalidad de este indicador, número de días de helada medios por mes, se representa en la siguiente figura para las distintas proyecciones y en la misma selección de estaciones. En cada fila se representan los resultados alcanzados con los datos de cada estación representativa de una zona montañosa; en cada columna se representa cada proyección. En cada gráfica se representan los valores medios mensuales de cada periodo de treinta años para cada escenario de emisiones, A2 o B2. Vuelve a aparecer la tendencia descendente en los periodos del s. XXI. La distribución estacional tiene una forma similar en cualquiera de los periodos con máximos entre enero y marzo; el periodo base, del que cabría esperar un comportamiento parejo a la acumulación y fusión de nieve, se acorta conforme avanza el s. XXI. Las diferencias más notables se encuentran entre proyecciones, con mayor número de días de helada en proyecciones CGCM2-FIC que en el resto.



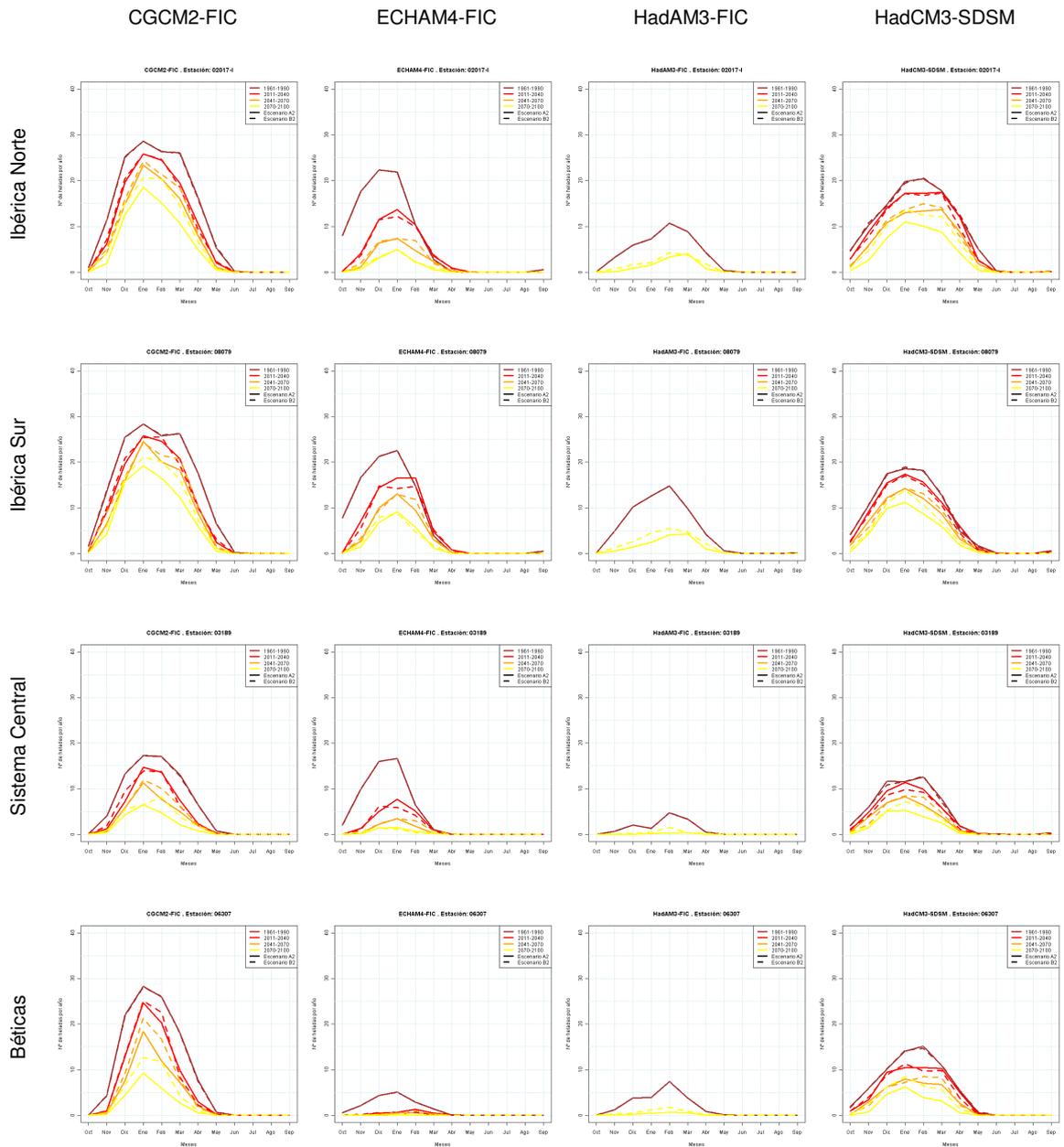


Figura 117. Estacionalidad del nº de días de helada en las proyecciones

La siguiente figura se ha elaborado con datos del Pirineo publicados por el programa ERHIN y muestra la evolución estacional del agua equivalente acumulada en forma de nieve para contrastar los resultados alcanzados durante el periodo de control del índice anterior. Los datos están promediados de las campañas 2002-2005. La acumulación de nieve se produce durante los meses de noviembre a junio, con el máximo en marzo.



Figura 118. Agua (hm<sup>3</sup>) acumulada en nieve en el Pirineo (a partir de Cobos et al, 2006)

Un análisis de impacto del cambio climático en las reservas de nieve también puede apoyarse en la correlación positiva entre la PRE invernal y la nieve y a la correlación negativa entre el incremento de TEM invernal y la nieve. De manera preliminar se considera que el periodo intra-anual con nieve significativa en España abarca desde noviembre a junio. En las siguientes figuras se muestran esas variaciones de TEM y PRE mensuales de cada una de las proyecciones climáticas y de la media de las mismas, para cada una de las seis zonas analizadas y cada uno de los dos escenarios de emisiones, A2 y B2.

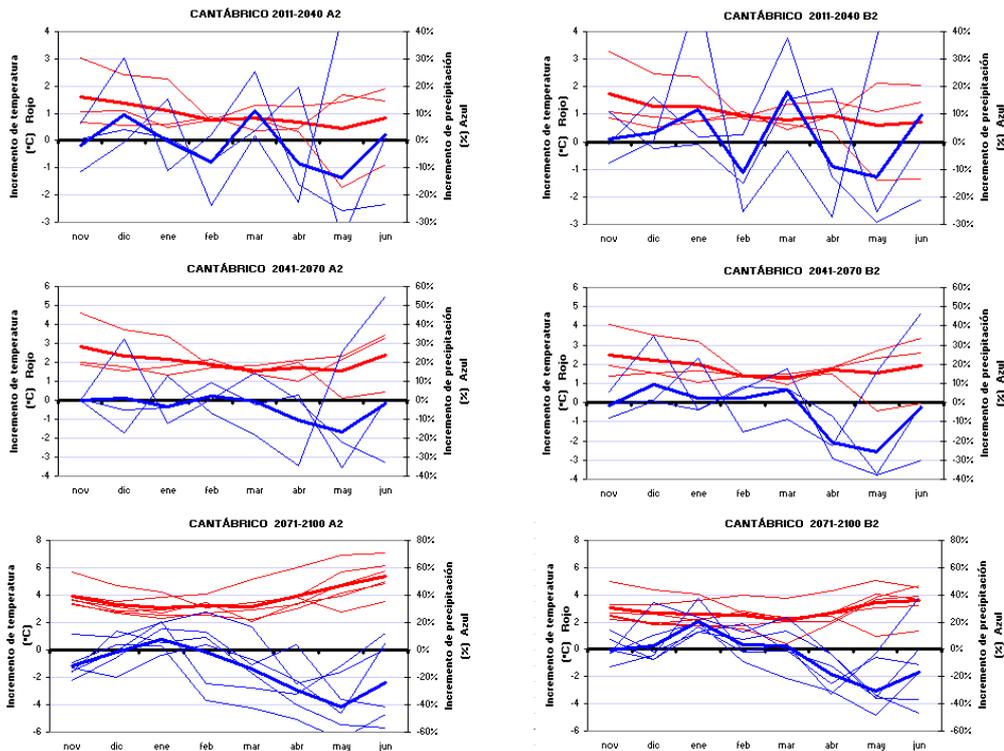


Figura 119.  $\Delta$  PRE mensual (%) y  $\Delta$  TEM mensual (°C) en el Cantábrico, para cada proyección (líneas finas) y la media de proyecciones (línea gruesa)

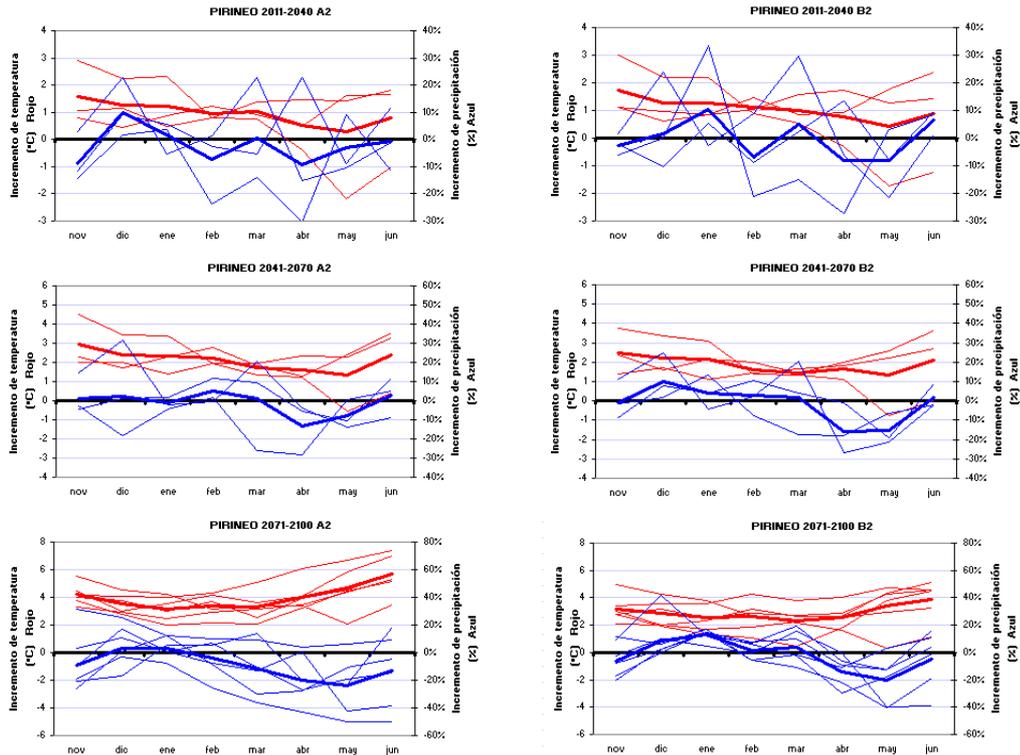


Figura 120.  $\Delta$  PRE mensual (%) y  $\Delta$  TEM mensual ( $^{\circ}$ C) en el Pirineo, para cada proyección (líneas finas) y la media de proyecciones (línea gruesa)

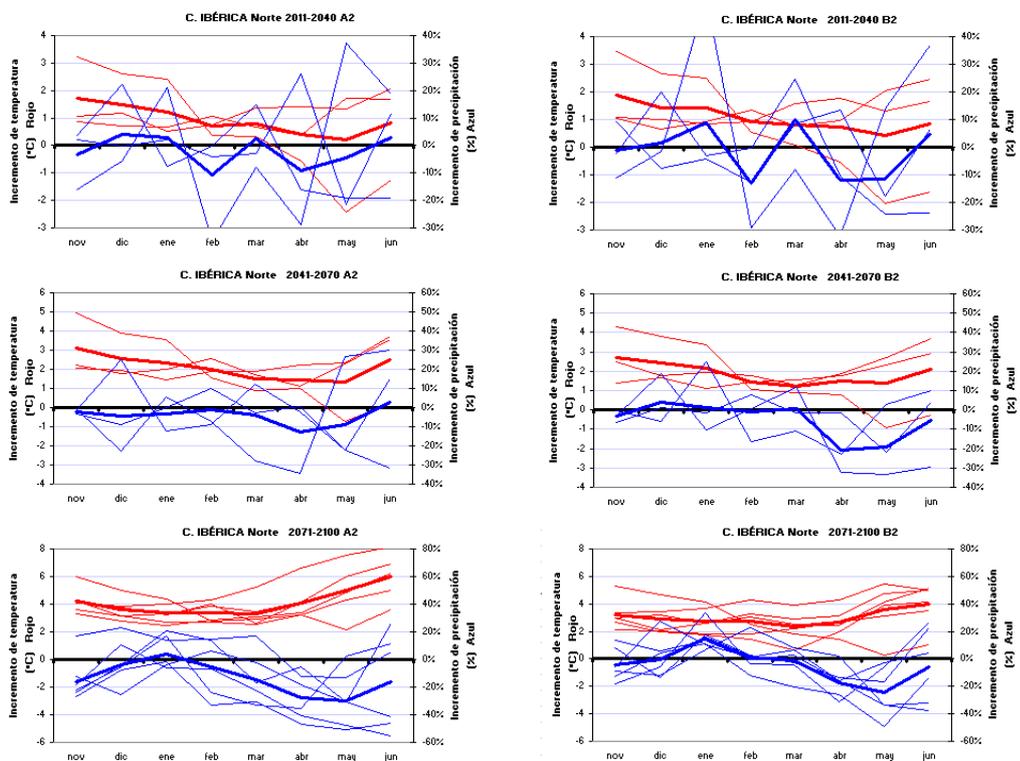


Figura 121.  $\Delta$  PRE mensual (%) y  $\Delta$  TEM mensual ( $^{\circ}$ C) en Cordillera Ibérica norte, para cada proyección (líneas finas) y la media de proyecciones (línea gruesa)

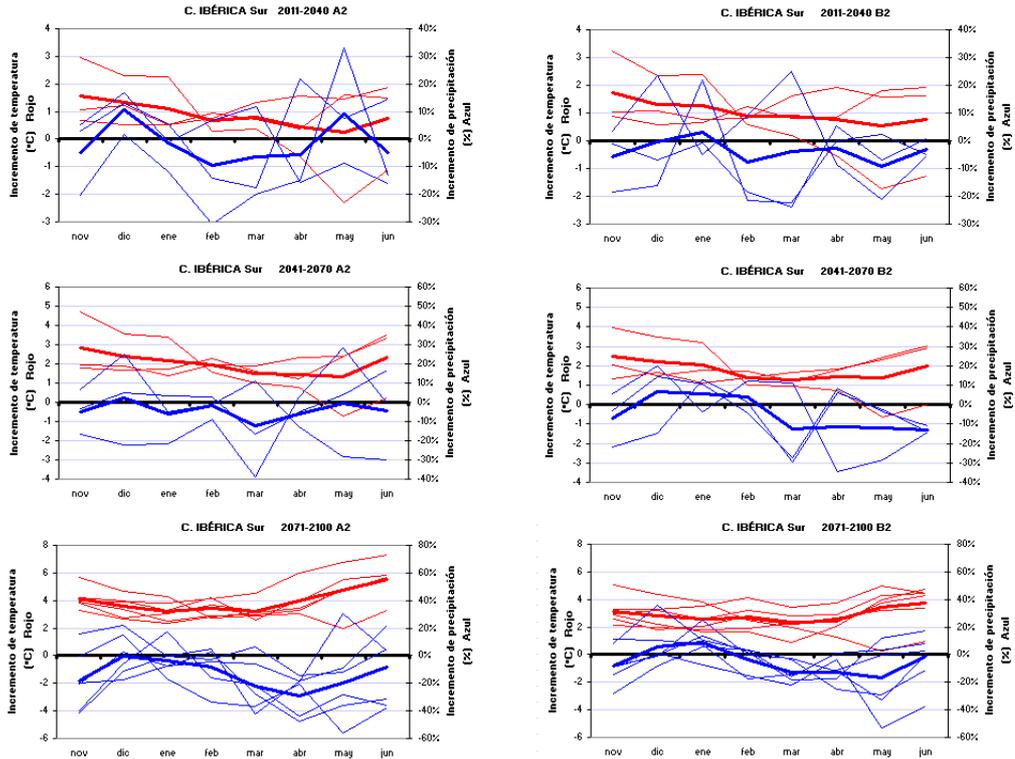


Figura 122.  $\Delta$  PRE mensual (%) y  $\Delta$  TEM mensual (°C) en Cordillera Ibérica sur, para cada proyección (líneas finas) y la media de proyecciones (línea gruesa)

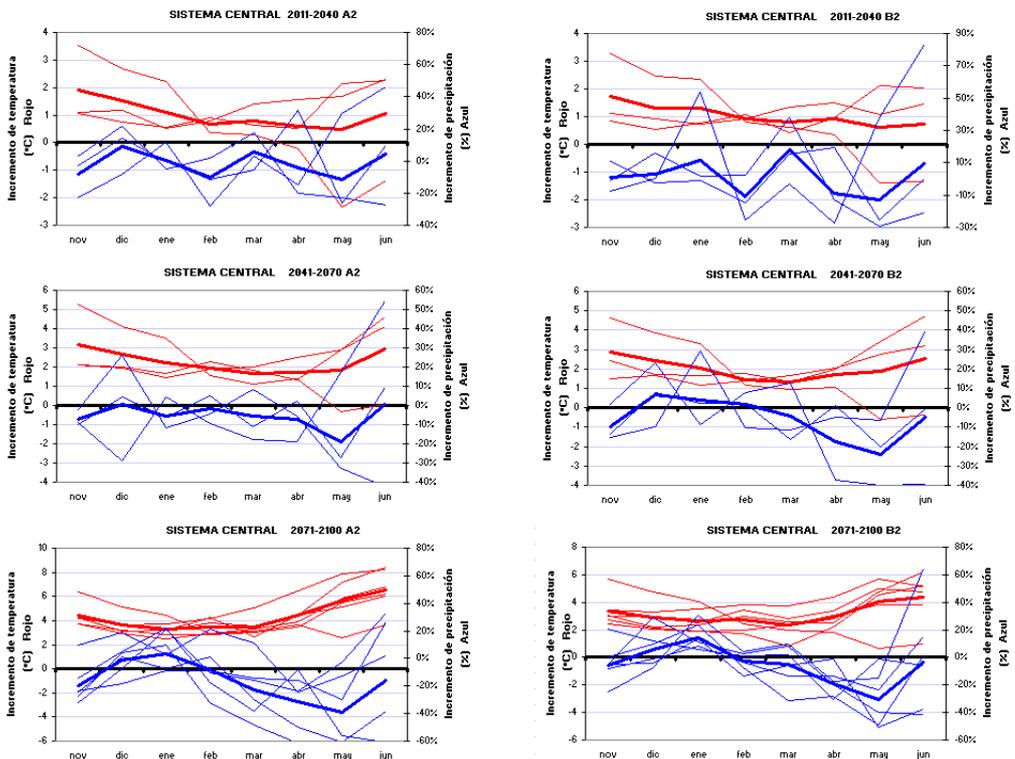


Figura 123.  $\Delta$  PRE mensual (%) y  $\Delta$  TEM mensual (°C) en Sistema Central, para cada proyección (líneas finas) y la media de proyecciones (línea gruesa)

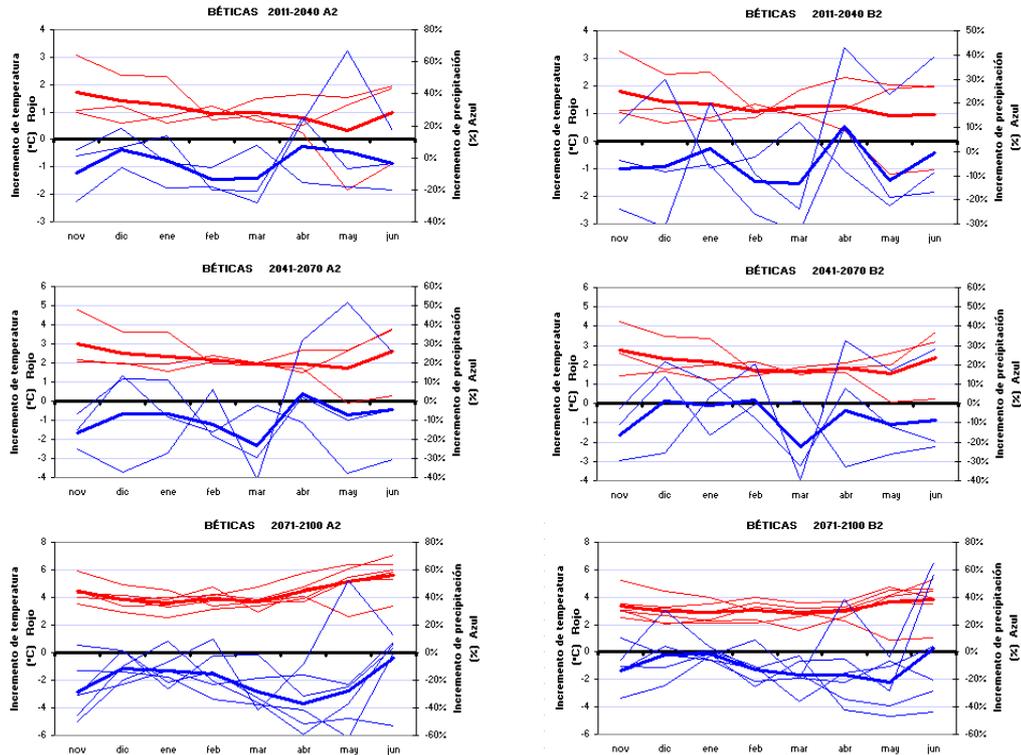


Figura 124.  $\Delta$  PRE mensual (%) y  $\Delta$  TEM mensual ( $^{\circ}$ C) en Cordillera Bética, para cada proyección y la media de proyecciones (trazo grueso)

Como norma general, las proyecciones dan un incremento de TEM, de aproximadamente  $1^{\circ}$ C para el periodo 2011-2040, de  $2^{\circ}$ C para 2041-2070 y de  $4^{\circ}$ C para el escenario A2 del periodo 2071-2100. Estos incrementos muestran tendencias similares en las seis zonas analizadas. Durante los dos primeros periodos, los incrementos muestran tendencias decrecientes desde noviembre hasta mayo para luego repuntar ligeramente en junio. Por el contrario, en el periodo 2071-2100 se observa un destacable incremento a partir de marzo en todas las zonas y escenarios. Los resultados de las proyecciones son muy parecidos en febrero y marzo, mientras que aumenta la dispersión en el resto de meses.

Esos incrementos de TEM en los meses invernales supondrían un descenso en la relación PRE de nieve/PRE total, con lo que es previsible un descenso de la cantidad de nieve acumulada en esas zonas, que se iría haciendo más acusado conforme avanza el siglo XXI. Por otro lado, el incremento de TEM en los meses primaverales provocaría un adelanto de la fusión de la nieve acumulada en las seis zonas de montaña. Este efecto se vería atenuado en los periodos 2011-2040 y 2041-2070 por el hecho de que en los meses de primavera es cuando se estiman los menores incrementos de TEM. Por el contrario, en el periodo 2071-2100, el brusco incremento de TEM desde marzo pronosticaría un adelanto significativo de la fusión de nieve, con el consiguiente adelanto de las puntas de ESC.

Las PRE muestran mayor variabilidad temporal y una gran dispersión, por lo que el análisis de los valores medios debe ser tomado con precaución. En el Pirineo, Cantábrico y Cordillera Ibérica norte y sur, hay un incremento de PRE mensual en los meses de diciembre y enero, que podría compensar el efecto del ligero incremento de TEM y no sería significativa la variación del volumen de nieve caída. Ese efecto de compensación se va atenuando conforme avanza el siglo XXI, siendo ese incremento de PRE invernal sólo significativo para el escenario B2. Por otro lado, en esas cuatro zonas, los mayores descensos de PRE se estiman para los meses de abril y mayo para todos los periodos.

Las PRE medias simuladas en el Sistema Central siguen pautas diferentes ya que supondrían una reducción de la PRE en forma de nieve para el periodo 2011-2040 y el 2041-2070; por el contrario, durante el periodo 2071-2100 se dan incrementos de PRE en los meses invernales acompañados por incrementos de TEM de 3°C a 4°C. Al igual que en las zonas anteriores, también en el Sistema Central se tendrían reducciones destacables de PRE en los meses de abril y mayo. Finalmente, los valores medios de las proyecciones en las Béticas dan reducciones generalizadas de PRE en todos los meses y todos los periodos, lo que implicaría una clara reducción de la nieve acumulada y un evidente adelanto de la época de fusión de la misma; no obstante, hay que tener en consideración que en esta zona es especialmente alta la dispersión de valores aportados por las diferentes proyecciones climáticas, lo que exigiría tomar con la mayor precaución las posibles interpretaciones basadas en valores medios.

#### 6.4 Recarga y volumen subterráneo

La REC en el modelo hidrológico de Tézmez depende de dos factores. El primero es el parámetro conductividad hidráulica vertical (mm/mes). Fue calibrado para la evaluación de recursos hídricos en España en función de las litologías del Litoestratigráfico del IGME (2006). El segundo es la carga de excedente calculada mensualmente por el modelo. Cuanto mayor sea la conductividad o la carga de agua, mayor es la infiltración mensual. Se calcula únicamente en celdas definidas como acuífero; en el resto de celdas se asume nula.

El valor medio en España del conjunto de proyecciones decrece a lo largo del s.XXI. La siguiente imagen muestra la evolución de las proyecciones en los escenarios A2 y B2. Los valores de REC son similares en A2 y B2 durante los periodos 2011-2040 y 2041-2070. Durante el último periodo, 2071-2100, las proyecciones A2 dan, en general, mayores descensos de REC, siendo ECHAM4-FIC-A2, HadCM3-SDSM-A2 y las dos A2 derivadas del PRUDENCE las que dan las REC inferiores.

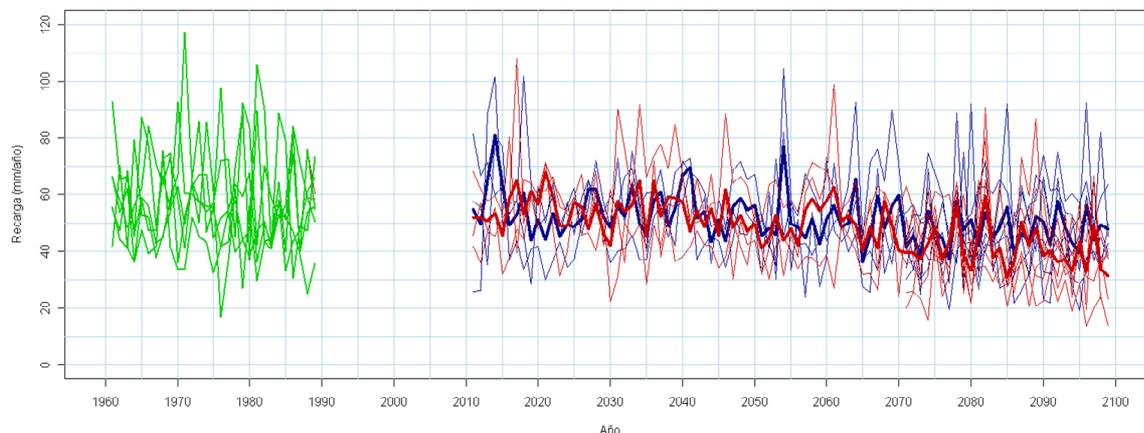


Figura 125. Series de REC anual en España. Periodo control (verde); A2 (rojo); B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

Los descensos de REC anual en España (figura siguiente) varían del 2% al 18% para el periodo 2011-2040 y del 5% al 27% para el periodo 2041-2070; si no se contemplara ECHAM4-FIC, las medias para esos periodos serían del 8% y 13% respectivamente. En el último periodo, hay una gran dispersión, con descensos de REC que oscilan entre el 3% y el 41%, siendo más acusadas en el escenario A2 (-27% de media) que en el B2 (-16% de media).

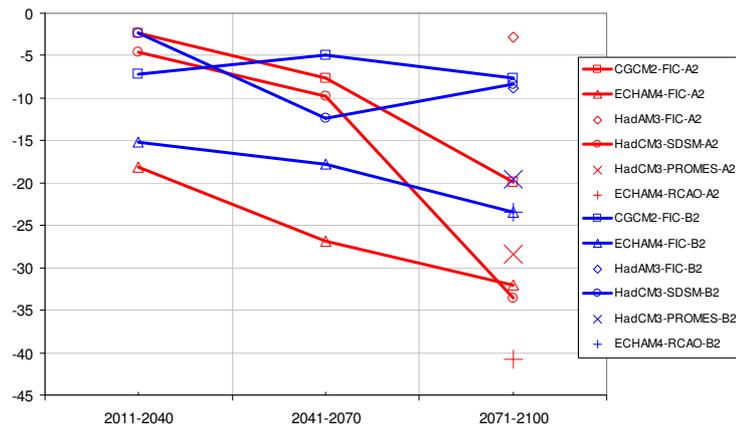


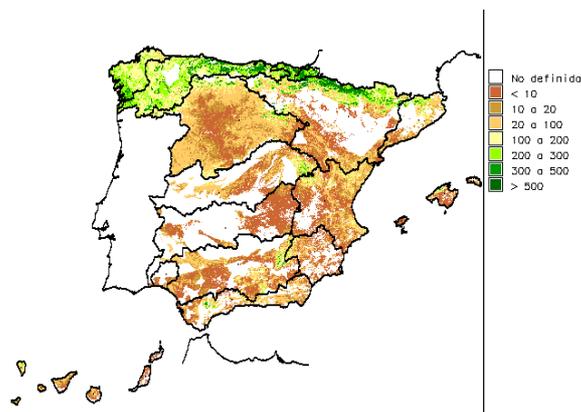
Figura 126. Δ REC anual (%) en España en periodos s. XXI

Los mapas de REC de la figura siguiente se han obtenido promediando las medias anuales, por periodo y escenario, del conjunto de proyecciones implementadas. Se distingue el conjunto de celdas no definidos como unidad hidrogeológica que, en la leyenda, aparecen con categoría “No definida”. Esta categoría también incluye el conjunto de celdas con REC media anual inferior a 1 mm. Las leyendas se han adaptado para mostrar variabilidad en valores bajos de REC que se dan en el valle del Duero y Ebro y mitad sur de la Península. En las zonas de montaña carbonatadas y en el norte de España se concentran los valores superiores a 100 mm/año de REC. El conjunto de mapas no permite apreciar cambios significativos entre los escenarios de emisiones A2 y B2 excepto en el periodo 2071-2100 con mayor REC en el B2. En el último periodo, la REC media de las Islas Canarias solamente representan los resultados de las proyecciones estadísticas ya que el proyecto PRUDENCE no aporta información de PRE o TEM.

Escenario emisiones A2

Escenario emisiones B2

1961-1990



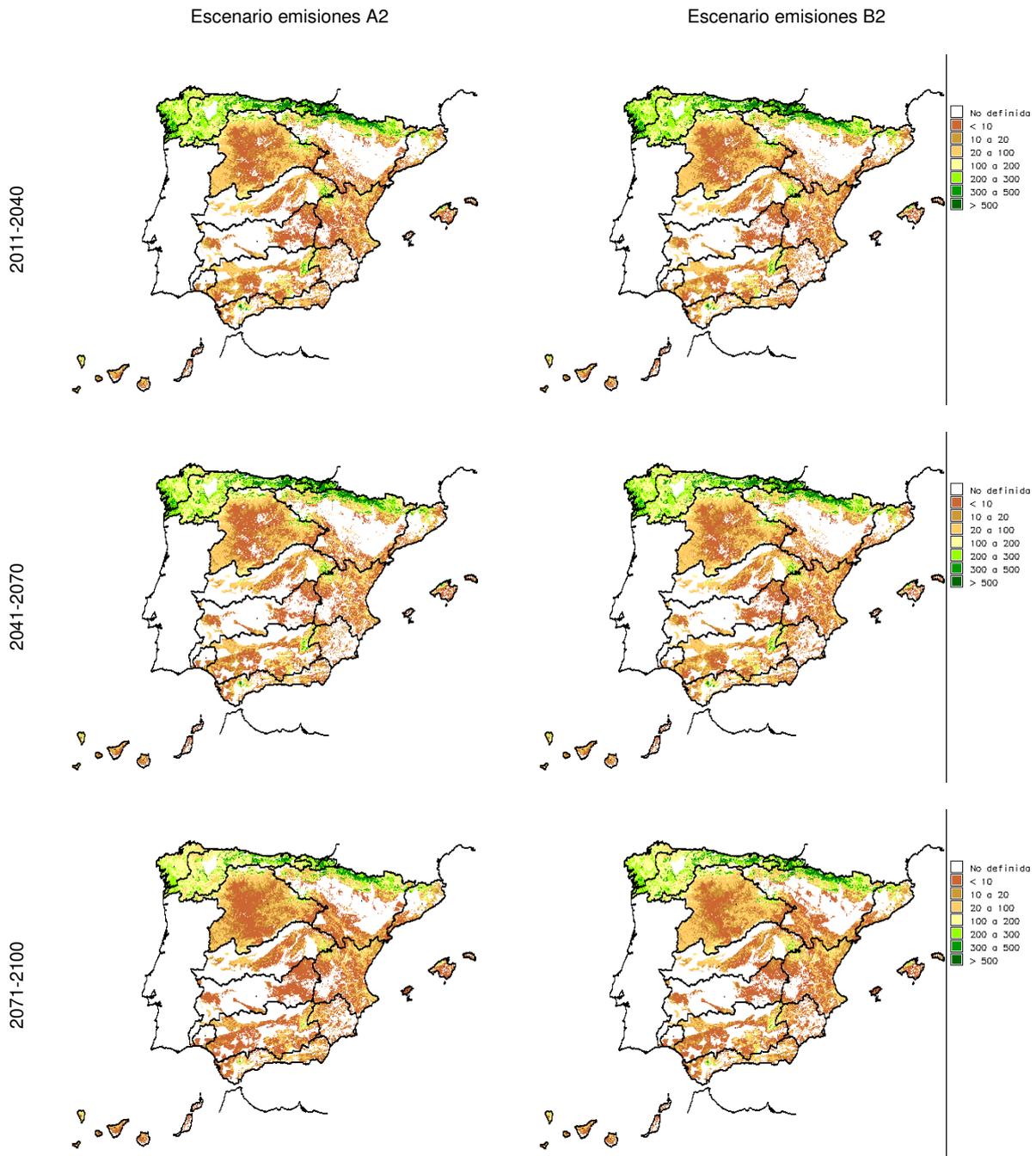


Figura 127. REC anual simulada para el periodo de control y por periodo del s. XXI

Los mapas de desviaciones de la REC respecto a la obtenida en el periodo de control (incluidos en el anexo y promediados en la siguiente figura) permiten apreciar mejor las diferencias entre los resultados de los escenarios A2 y B2. Las conclusiones son las mismas que se citaron anteriormente respecto a los valores más altos de la REC en B2. En todo caso hay que advertir que los mapas de desviaciones no dan una perspectiva clara en aquellas celdas con valores de REC bajos en los que pequeñas variaciones se hacen porcentualmente importantes. Esto ocurre en los valles de las grandes cuencas, así como en el centro y sureste de la Península.

En el 1<sup>er</sup> periodo del s. XXI, 2011-2040, se observan valores positivos de REC en la zona calcárea propia de la fachada mediterránea y descensos en la zona silíceo central y occidental. En el último periodo, el descenso de REC es generalizado en toda España.

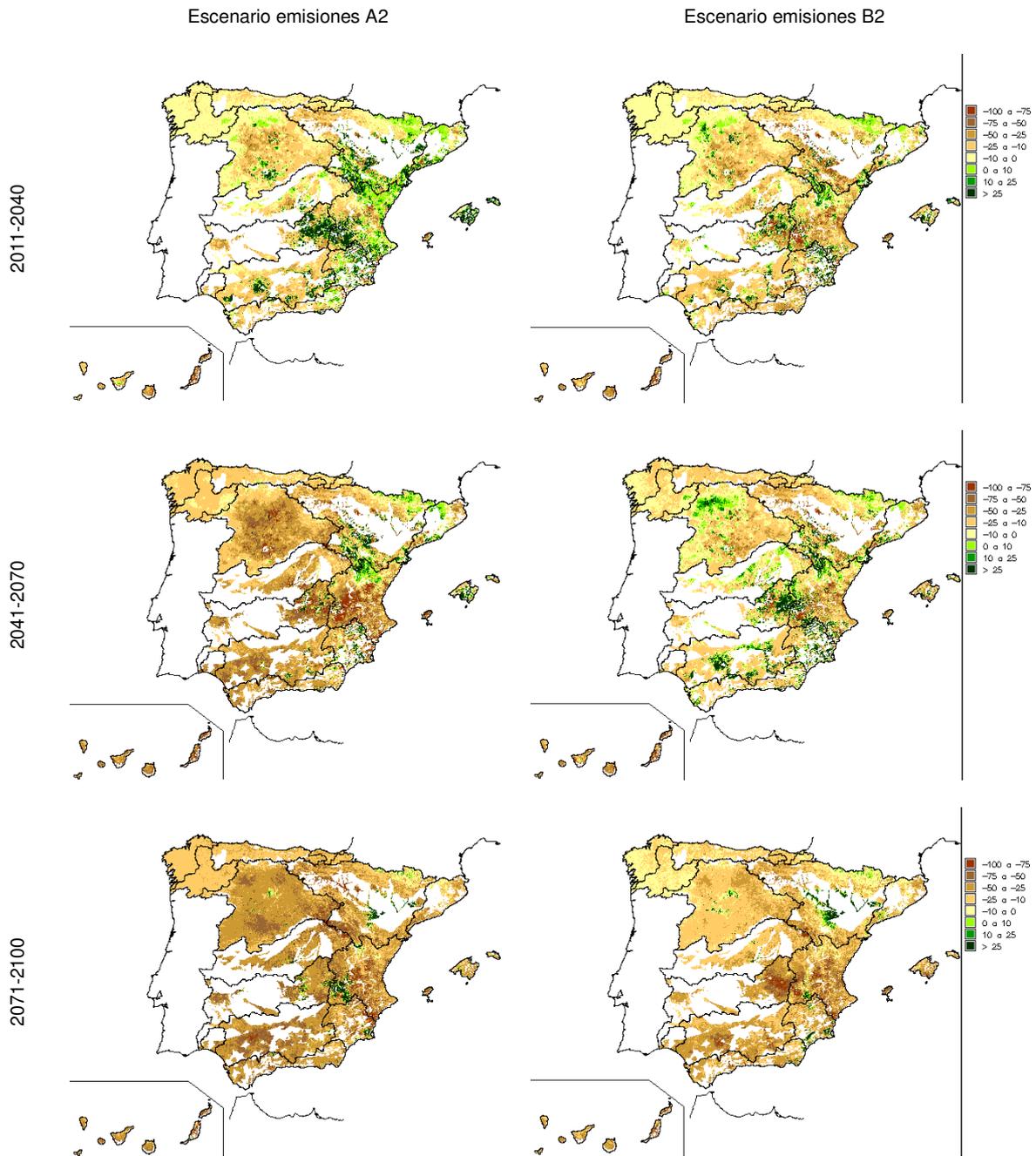


Figura 128.  $\Delta$  REC anual (%) por periodo del s. XXI respecto al periodo de control

En términos porcentuales, la disminución de la REC es acusada en Canarias, tanto en A2 como en B2. Al igual que con otras variables hidrológicas, la reducción de la REC es superior en la mitad sur de España que en la norte, siendo esas diferencias mayores en A2 que en B2 (tabla siguiente). Hay proyecciones que dan aumentos de REC en algunas DD.HH. durante el 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> periodos.

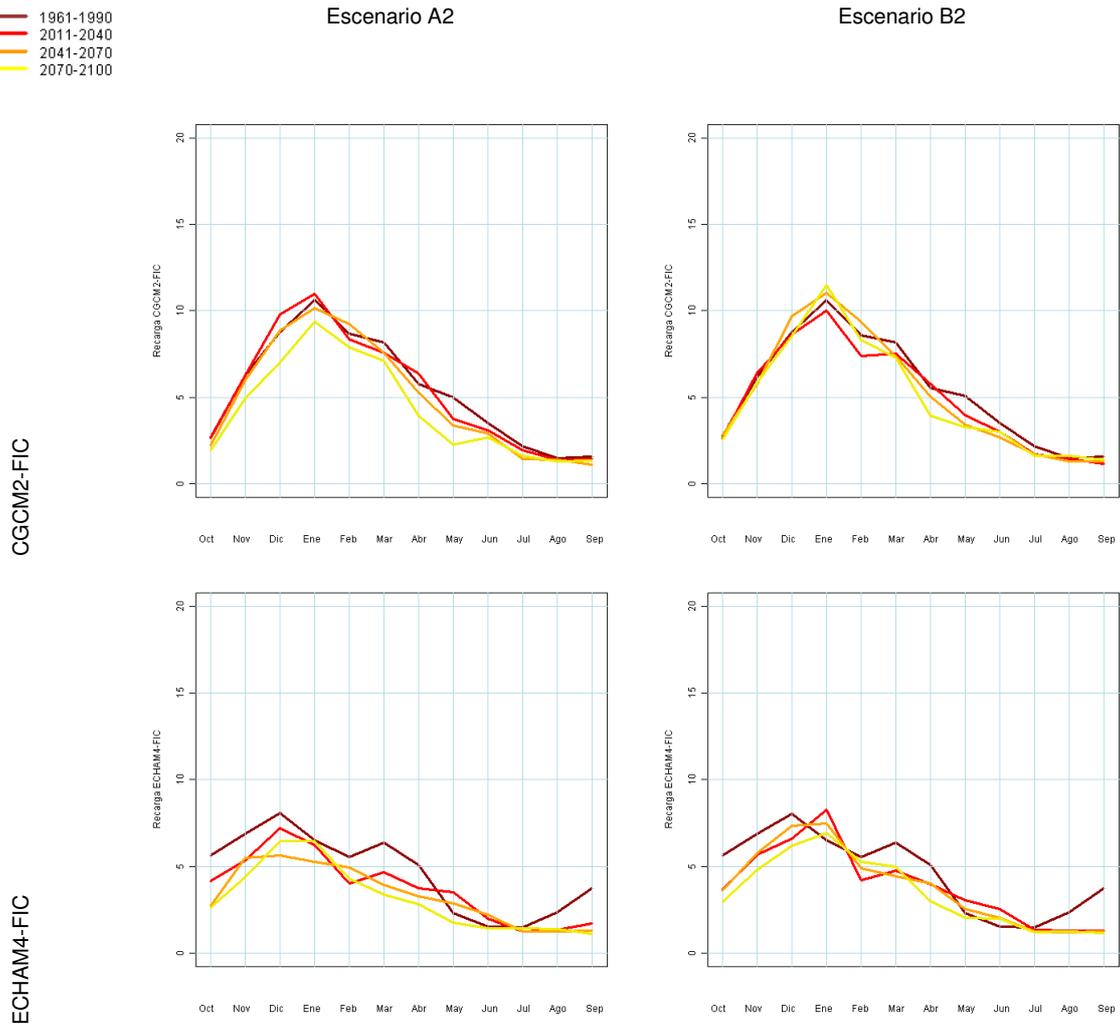
		Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	2011-2040	-2	-18		-5			-8	-7	-15			-2		-8
	2041-2070	-8	-27		-10			-15	-5	-18			-12		-12
	2071-2100	-20	-32	-3	-34	-28	-41	-27	-8	-24	-9	-8	-20	-23	-16
Cantábrico	2011-2040	-6	-14		-10			-10	-5	-11			-9		-8
	2041-2070	-5	-20		-17			-14	-6	-16			-20		-14
	2071-2100	-11	-32	-3	-36	-29	-43	-26	-2	-22	-10	-16	-21	-28	-16
Galicia-Costa	2011-2040	-4	-16		-5			-8	0	-11			-6		-6
	2041-2070	-5	-24		-8			-12	-6	-16			-10		-10
	2071-2100	-16	-30	0	-22	-19	-34	-20	-6	-21	-6	-8	-11	-17	-11
CI País Vasco	2011-2040	-4	-16		-5			-9	0	-11			-6		-7
	2041-2070	-5	-24		-8			-13	-6	-16			-10		-13
	2071-2100	-16	-30	0	-22	-19	-34	-27	-6	-21	-6	-8	-11	-17	-18
Miño-Sil	2011-2040	-2	-18		-4			-7	0	-14			-4		-5
	2041-2070	-5	-28		-5			-12	-5	-18			-8		-10
	2071-2100	-16	-34	2	-22	-18	-36	-21	-5	-23	-4	-4	-9	-19	-11
Duero	2011-2040	-2	-25		-1			-8	-8	-21		4			-8
	2041-2070	-13	-38		-2			-17	-8	-21		-4			-10
	2071-2100	-31	-39	5	-35	-24	-51	-33	-11	-26	-1	4	-17	-26	-14
Tajo	2011-2040	-4	-16		-5			-8	0	-11			-6		-11
	2041-2070	-5	-24		-8			-20	-6	-16			-10		-9
	2071-2100	-16	-30	0	-22	-19	-34	-39	-6	-21	-6	-8	-11	-17	-18
Guadiana	2011-2040	-6	-24		-4			-14	-16	-20		9			-12
	2041-2070	-16	-33		-10			-30	-7	-18		-9			-12
	2071-2100	-36	-36	-7	-38	-35	-31	-46	-18	-27	-10	1	-27	-15	-24
Guadalquivir	2011-2040	-5	-34		-2			-13	-22	-32		10			-15
	2041-2070	-17	-49		-15			-28	-5	-27		-14			-15
	2071-2100	-43	-48	-17	-43	-41	-33	-42	-23	-39	-21	-7	-29	-24	-25
CI Andalucía	2011-2040	-2	-29		-3			-12	-17	-31		4			-17
	2041-2070	-13	-43		-22			-29	-3	-25		-16			-15
	2071-2100	-37	-41	-23	-46	-41	-28	-40	-20	-36	-22	-16	-27	-26	-27
Segura	2011-2040	-2	-23		-2			-9	-24	-22		10			-13
	2041-2070	-9	-35		-10			-20	-2	-27		-12			-14
	2071-2100	-22	-38	-18	-33	-45	-21	-33	-13	-30	-19	-5	-25	-21	-21
Júcar	2011-2040	4	-9		-5			-3	-21	-15			-1		-12
	2041-2070	-8	-22		-13			-16	-3	-16			-15		-12
	2071-2100	-18	-21	-16	-45	-44	-21	-31	-14	-22	-19	-18	-34	-11	-23
Ebro	2011-2040	0	-15		-6			-7	-5	-11			-5		-7
	2041-2070	-3	-20		-10			-11	-2	-15			-16		-11
	2071-2100	-11	-25	2	-36	-27	-41	-24	-1	-19	-6	-12	-18	-25	-14
CI Cataluña	2011-2040	5	-4		-3			0	-7	-5			-7		-6
	2041-2070	0	-7		-5			-4	-2	-6			-14		-7
	2071-2100	-8	-7	-10	-28	-28	-26	-19	-9	-5	-16	-11	-24	-13	-14
Islas Baleares	2011-2040	-2	-18		6			-4	-16	-26			-1		-14
	2041-2070	-4	-32		-2			-14	-4	-27			-18		-19
	2071-2100	-15	-40	-22	-40	-25	-21	-30	-19	-33	-29	-10	-22	-11	-22
Canarias	2011-2040	-4	-34		-3			-18	-11	-30			-22		-25
	2041-2070	-9	-37		-37			-32	-7	-34			-32		-28
	2071-2100	-25	-41	-29	-55			-42	-15	-34	-28	-47			-35

**RECARGA SUBTERRÁNEA:** Desv. (%) de medias anuales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RAO (PRUDENCE-SMHI). Colores: verde >0%, amarillo -20% a 0%, rojo < -20%.

Figura 129.  $\Delta$  REC anual (%) por D.H., proyección y periodo

La descomposición media estacional de la REC en España aparece en las siguientes figuras. CGCM2-FIC presentan escasa variación alrededor de los resultados del periodo 1961-1990. En el escenario A2 aparece un sesgo indicativo de reducción de REC durante todas las estaciones. Como en otras variables, ECHAM4-FIC indican una caída importante desde el 1<sup>er</sup> periodo de análisis, 2011-2040, especialmente durante las estaciones de otoño y primavera, descensos mantenidos en el escenario B2. ECHAM4-RCAO, que también usa el MCGAO ECHAM4, presenta las mismas características. Finalmente, un peso importante del impacto parece trasladarse a las estaciones de primavera e inicio del verano (HadCM3-SDSM y HadCM3-PROMES).

- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

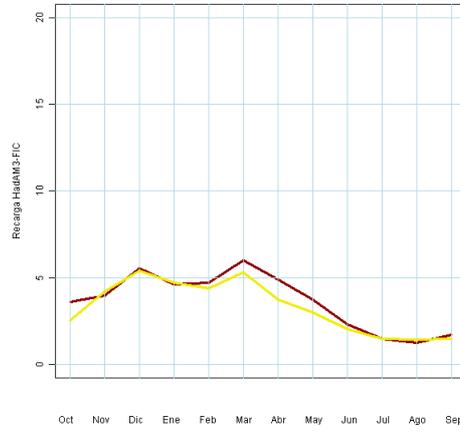
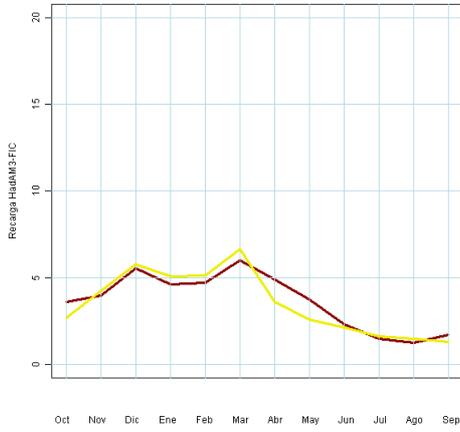


- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

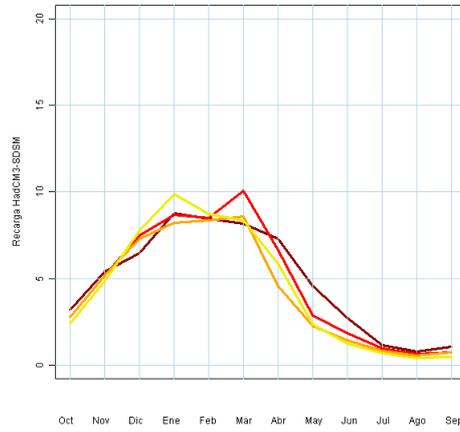
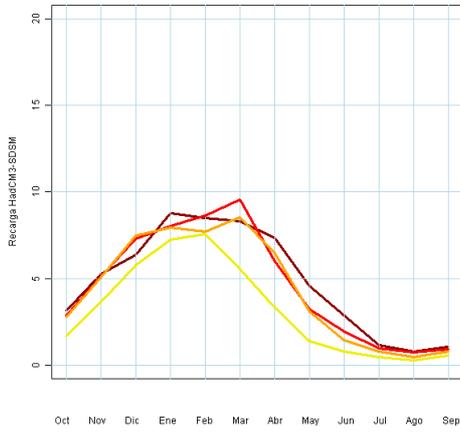
Escenario A2

Escenario B2

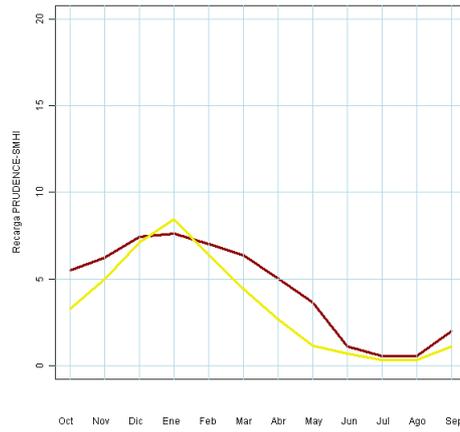
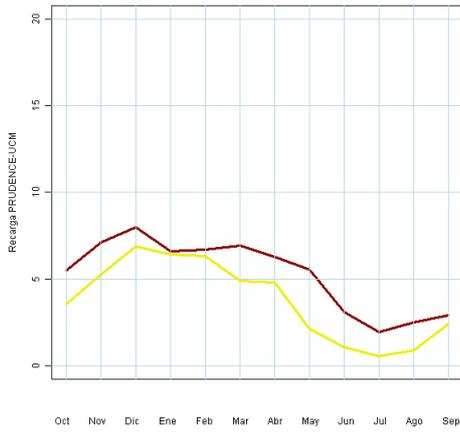
HadAM3-FIC



HadCM3-SDSM



ECHAM4-RCAO



■ 1961-1990  
 ■ 2011-2040  
 ■ 2041-2070  
 ■ 2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

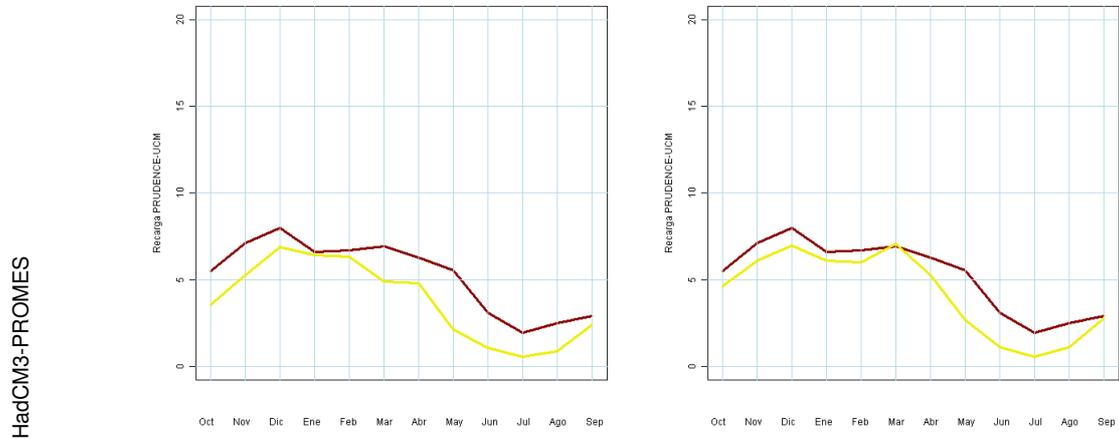


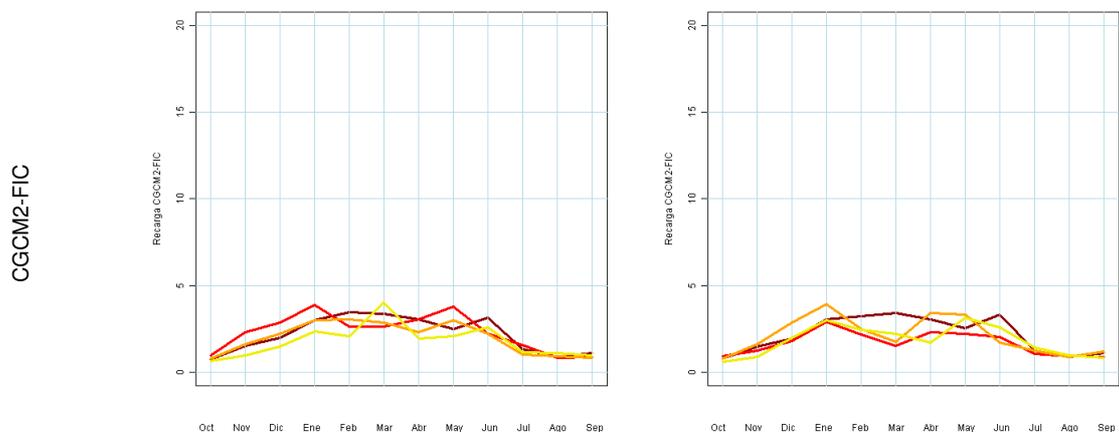
Figura 130. Ciclo estacional de la REC por proyección

Las gráficas anteriores se han elaborado con datos medios de España. Representan mejor a las áreas húmedas del norte y de montaña donde los excedentes son considerablemente mayores a los que se encuentran en los tramos medios y bajos de las principales cuencas. La siguiente figura se ha elaborado usando los datos del Júcar en la que la componente mediterránea es más pronunciada y exhibe diferencias respecto a los resultados anteriores. El orden de magnitud de la REC es un tercio menor que la media estimada para el territorio nacional. Las reducidas variaciones dan una apariencia de cambio en la estacionalidad de la REC y la imagen global del conjunto de cambios es confusa. En el escenario A2 y durante el periodo 2011-2040, CGCM2-FIC y ECHAM4-FIC dan dos puntas al inicio del invierno y final de primavera, HadCM3-SDSM describe una onda con máximo en primavera. Sin embargo, durante el último periodo, 2071-2100 los máximos se dan en primavera (CGCM2-FIC y HadAM3-FIC); en invierno (ECHAM4-FIC, HadCM3-SDSM y ECHAM4-RCAO); y en otoño (HadCM3-PROMES). Los impactos son menores en B2.

■ 1961-1990  
 ■ 2011-2040  
 ■ 2041-2070  
 ■ 2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

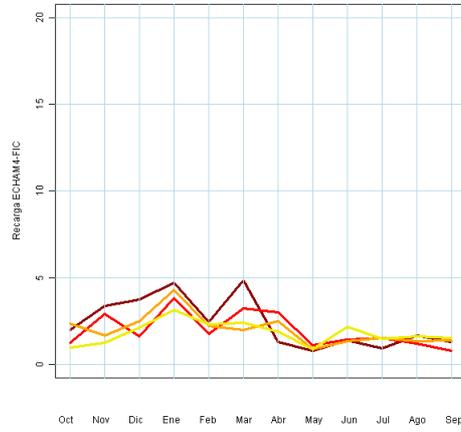
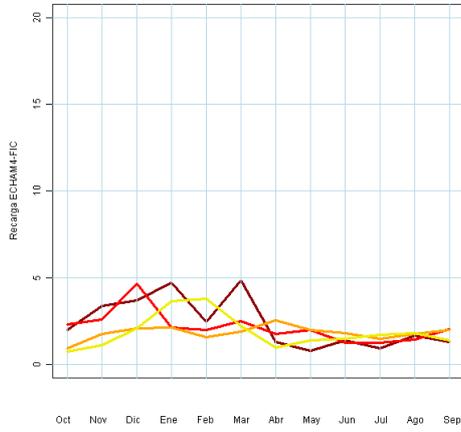


- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

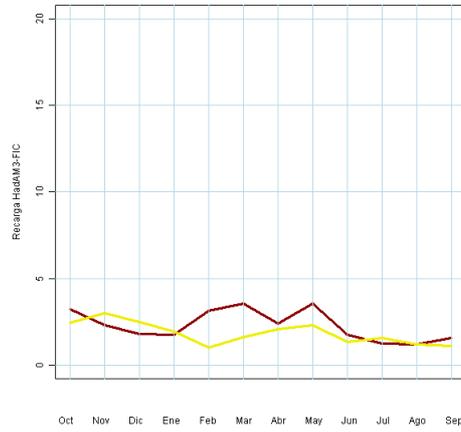
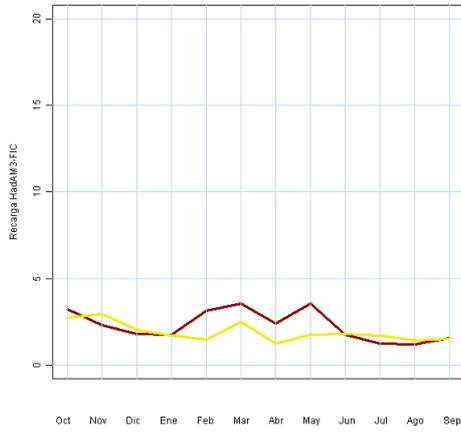
Escenario A2

Escenario B2

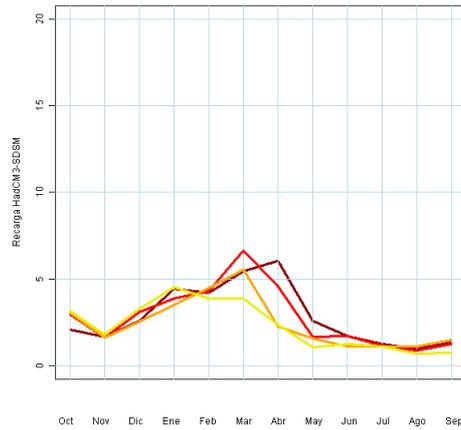
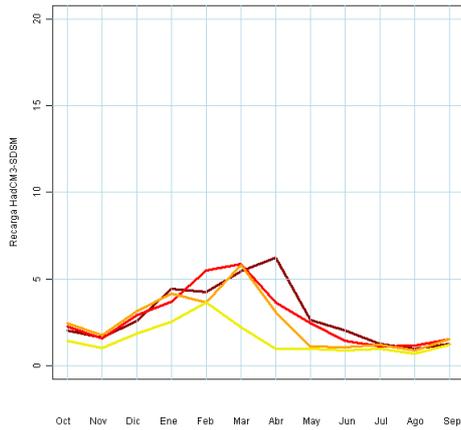
ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC



HadCM3-SDSM

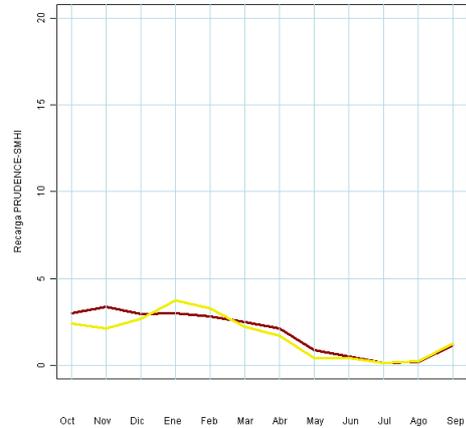
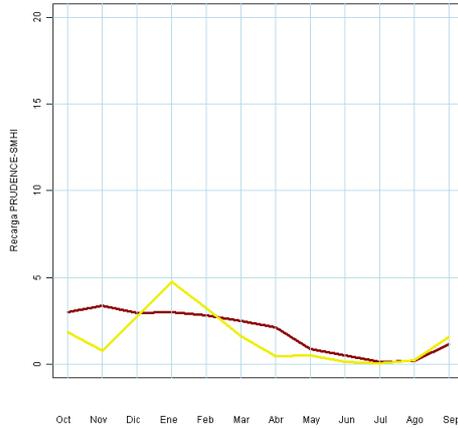


1961-1990  
2011-2040  
2041-2070  
2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

ECHAM4-RCAO



HadCM3-PROMES

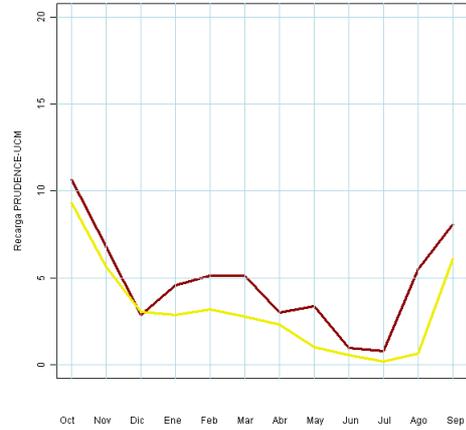
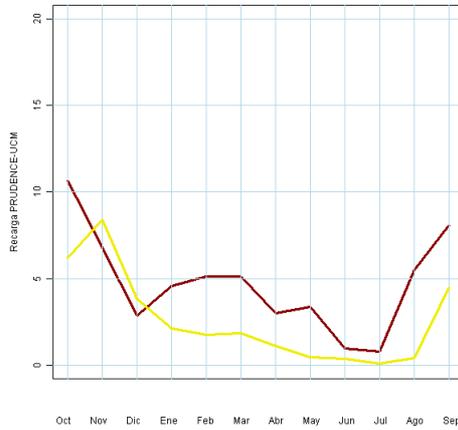


Figura 131. Ciclo estacional de la REC (mm) subterránea en el Júcar por proyección

La distribución estacional de las desviaciones de REC expresadas porcentualmente (tabla siguiente) refleja una destacable reducción en verano, consecuencia de su ya bajo valor.

		Escenario de emisiones A2							Escenario de emisiones B2						
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
<b>Anual</b>	2011-2040	-2	-18		-5			-8	-7	-15		-2			-8
	2041-2070	-8	-27		-10			-15	-5	-18		-12			-12
	2071-2100	-20	-32	-3	-34	-28	-41	-27	-8	-24	-9	-8	-20	-23	-16
<b>OND</b>	2011-2040	4	-19		5			-5	-1	-21		4			-7
	2041-2070	-3	-32		2			-13	2	-19		1			-7
	2071-2100	-21	-34	-3	-24	-23	-30	-24	-4	-31	-8	1	-14	-19	-14
<b>EFM</b>	2011-2040	-2	-19		3			-5	-9	-7		8			-3
	2041-2070	-1	-23		-5			-9	2	-9		0			-2
	2071-2100	-10	-24	11	-19	-13	-33	-16	0	-6	-4	7	-3	-10	-3
<b>AMJ</b>	2011-2040	-8	1		-24			-11	-11	4		-23			-11
	2041-2070	-19	-9		-26			-19	-21	-6		-43			-26
	2071-2100	-37	-32	-21	-62	-46	-73	-47	-26	-19	-20	-36	-38	-51	-33
<b>JAS</b>	2011-2040	-9	-39		-12			-27	-14	-43		-21			-33
	2041-2070	-22	-47		-32			-39	-14	2		-31			-36
	2071-2100	-22	-46	-6	-56	-48	-47	-37	-9	-50	-4	-45	-41	-46	-34

**RECARGA:** Desviaciones (%) de medias anuales y trimestrales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PRUDENCE-UCM; P = modelo global ECHAM4 y regionalización PRUDENCE-SMHI. Colores: verde >0%, amarillo -20% a 0%, rojo < -20%.

Tabla 25. Δ REC (%) estacional en España

## 6.5 Escorrentía

### 6.5.1 Resultados globales en España

La estimación de ESC o aportación específica (mm) es el resultado final de las sucesivas fases del ciclo hidrológico simuladas. Siguiendo el esquema del modelo de Témez (Témez, 1977), la ESC está básicamente condicionada por la PRE, por el umbral de escorrentía, almacenamiento y la capacidad de regulación del suelo, por las evapotranspiraciones potenciales y reales y por las características hidrodinámicas que condicionan la recarga y descarga de los acuíferos. En España, la distribución espacial de la ESC tiene gran variabilidad, desde los más de 500 mm/año que aparecen en territorios del norte a los escasos mm/año del valle del Ebro, áreas del sureste y centro de la Península o las islas Canarias orientales.

La serie temporal de valores de ESC anual agregados en España (Figura 132) permite apreciar que los escenarios A2 y B2 dan resultados similares durante el 1<sup>er</sup> periodo del siglo XXI. Conforme avanza el siglo XXI, el escenario A2 proporciona menores aportaciones, diferencia que se hace patente durante el periodo final, 2071-2100. La tendencia general es suavemente decreciente en cualquiera de los dos escenarios de emisiones.

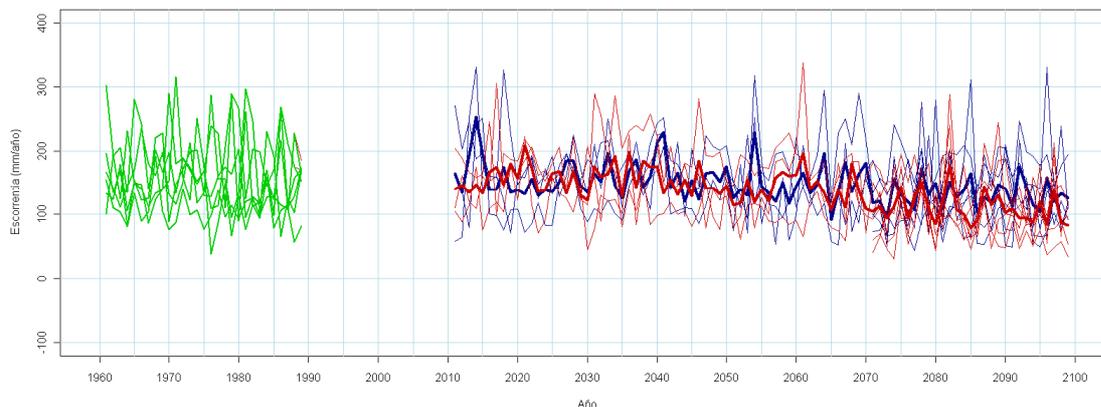


Figura 132 Series ESC anual en España. Periodo control (verde); A2 (rojo); B2 (azul). Trazo grueso: media de las proyecciones

La colección de diagramas caja de las ESC por proyección y periodo (Figura 133) describen la variación de propiedades estadísticas representativas, media y variabilidad. En el Anexo 2 se presentan los valores numéricos absolutos de diversos parámetros estadísticos, entre ellos la media y la desviación típica, para las series anuales promediadas en España y en cada D.H. Los valores absolutos presentan un sesgo inherente a los MCG y regionalización. Por ello, el índice de impacto es la desviación de la escorrentía de cada proyección respecto a la del periodo de control.

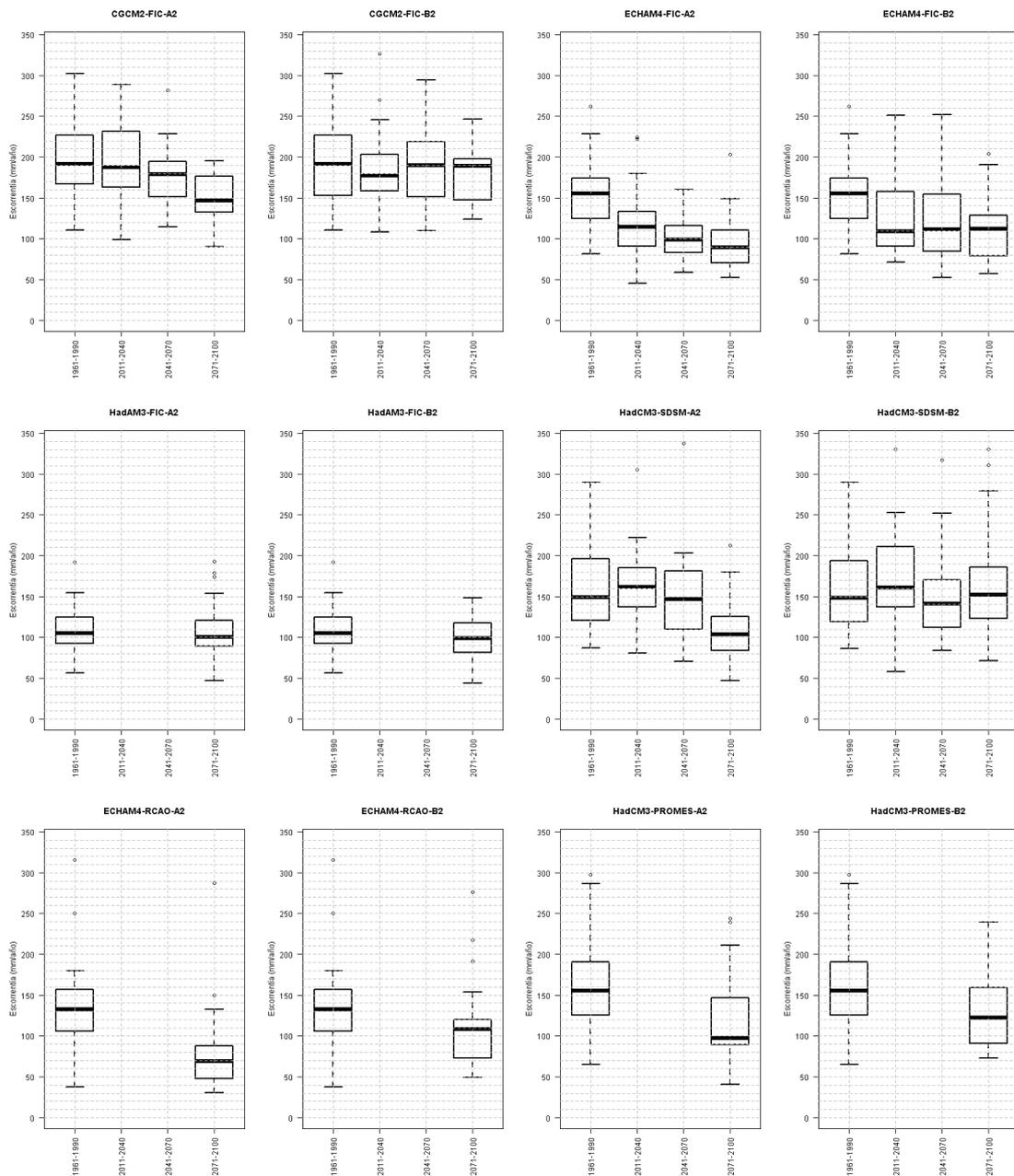


Figura 133. Diagramas de cajas de las proyecciones en ESC anual en España

Con carácter general, la media y la variabilidad disminuyen. La siguiente gráfica expresa los decrementos porcentuales medios por periodo de treinta años y de cada una de las proyecciones de este trabajo.

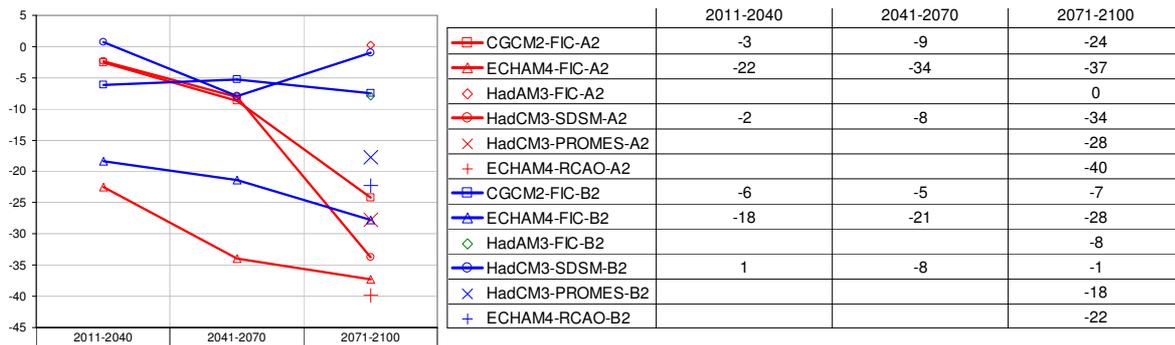


Figura 134.  $\Delta$  ESC anual (%) en España en periodos s. XXI

Esta figura permite distinguir las proyecciones que dan las desviaciones mínimas, máximas y las tendencias medias en España. Destacan los fuertes descensos estimados por el MCG ECHAM4, que reducen considerablemente la media en los periodos 2011-2040 y 2041-2070. Las  $\Delta$  ESC anual (%) del periodo 2011-2040 oscilan desde un incremento del 1% hasta un descenso del 22%, mientras que para el periodo 2041-2070 oscilan entre unos descensos del 5% al 34%. Finalmente, para el periodo 2071-2100, las reducciones de ESC van del 0% al 40%. Estos márgenes de variación determinados por las diferentes proyecciones son muy amplios y subrayan las incertidumbres asociadas a la simulación de los procesos atmosféricos.

### 6.5.2 Variabilidad espacial

La siguiente figura muestra los mapas medios de ESC del conjunto de proyecciones por periodo de análisis. Los resultados en el periodo de control para las proyecciones de escenarios de emisiones A2 y B2 son idénticos. No se aprecian diferencias entre estos escenarios hasta llegar al último periodo (2071-2100), durante el cual el escenario B2 produce un impacto menor en la mitad sur de la Península, especialmente en el centro y suroeste.

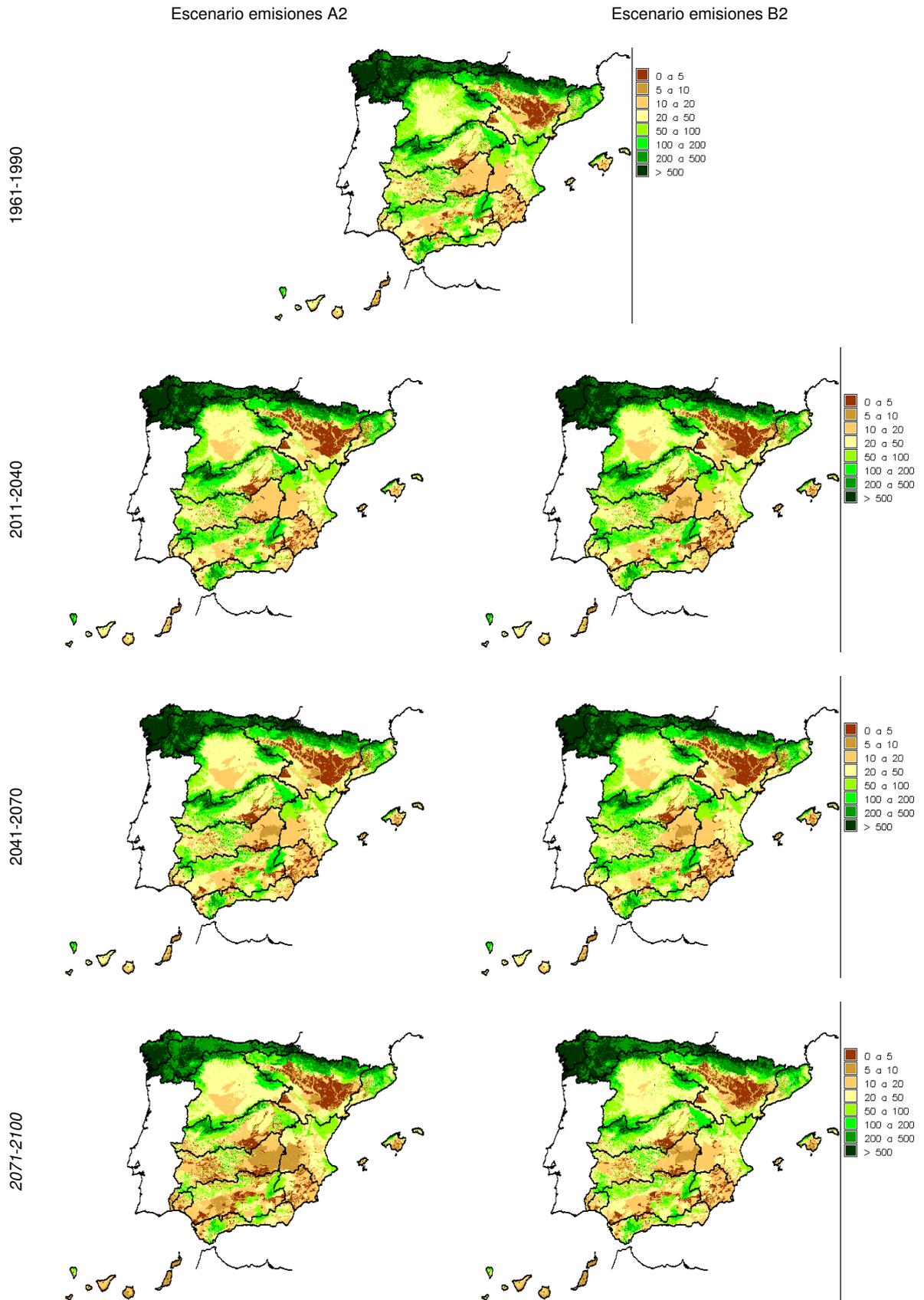


Figura 135. ESC (mm) anual del conjunto de proyecciones para periodo de control y s. XXI

Las diferencias de las distintas proyecciones se aprecian mejor en el anexo 1 y en las siguientes figuras, donde se muestran las desviaciones de cada proyección y periodo representadas como medias de estas desviaciones, máximas y mínimas de las desviaciones por celda y proyecciones de las que proceden para comprobar la correlación espacial.

En el periodo 2011-2040, hay importantes diferencias en las ESC simuladas por las distintas proyecciones. Por una lado, ECHAM4-FIC da descensos generalizados (salvo en la franja este y noreste peninsulares), mientras que HadCM3-SDSM da incrementos en una amplia zona occidental y Baleares. Por otro lado, las diferencias entre escenarios de emisiones A2 y B2 no son marcadas en este periodo y en esas dos proyecciones. Lo son en CGCM2-FIC.

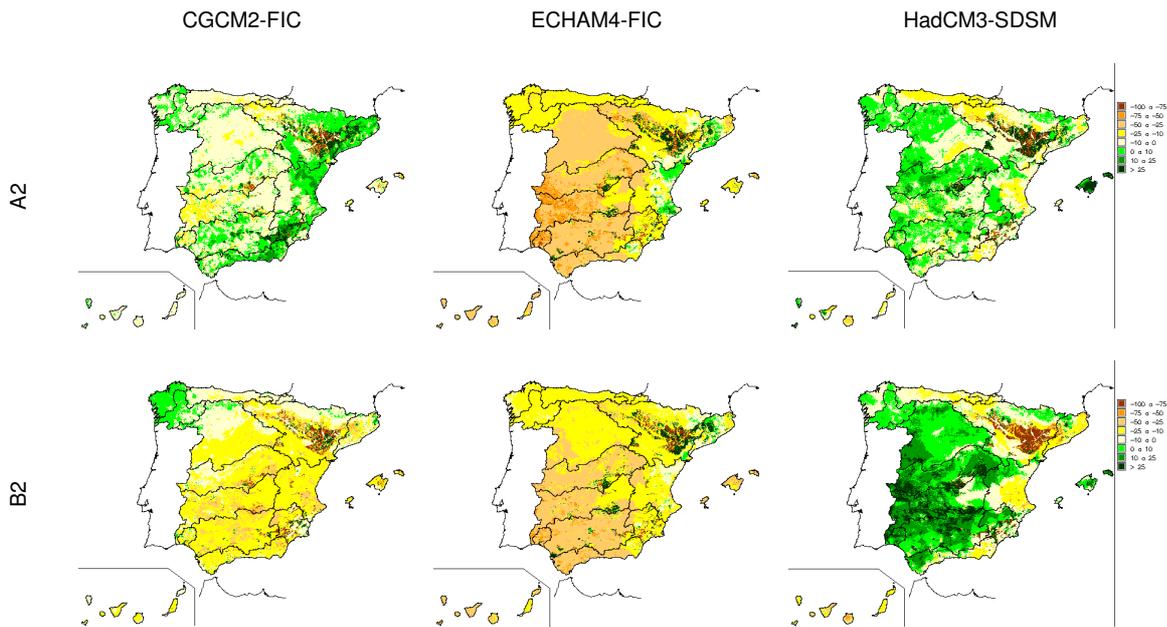


Figura 136.  $\Delta$  ESC anual (%) para 2011-2040 (A2 y B2)

Con respecto a las desviaciones de ESC de la media de las proyecciones en el periodo 2011-2040 y escenario de emisiones A2, hay reducción de ESC en prácticamente toda España, excepto en algunas áreas de la fachada mediterránea. En B2 se estiman decrementos generalizados del 10% al 25%, salvo en el oeste y noreste peninsular que son inferiores al 10%. Las menores desviaciones se dan en algunas zonas del cuadrante noroeste de la Península. Siempre resaltan las áreas de muy escasa ESC cuyas variaciones en términos porcentuales alcanzan valores muy altos, bien por pequeños decrementos, bien por aumentos respecto a valores de referencia muy bajos. Así ocurre en el valle central del Ebro y curso bajo del Cinca y Segre, en otras zonas del centro, y sureste Peninsular, así como en las Islas Canarias. En esos mapas, se han dejado en blanco aquellas zonas con ESC inferior a 5 mm.

Los resultados más optimistas (máximos) los da HadCM3-SDSM. No obstante, en zonas de costa y mediterráneas los que estiman mayores valores de ESC pasan a ser CGCM2-FIC (especialmente en A2) y ECHAM4-FIC. La proyección más pesimista es ECHAM4-FIC, excepto en zonas del Levante y valle del Ebro. Las proyecciones pésimas (mínimos) dan decrementos en un orden de magnitud inferior al de los máximos en la mayoría del territorio.

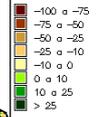
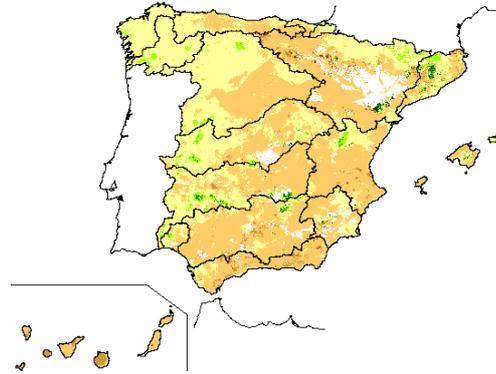
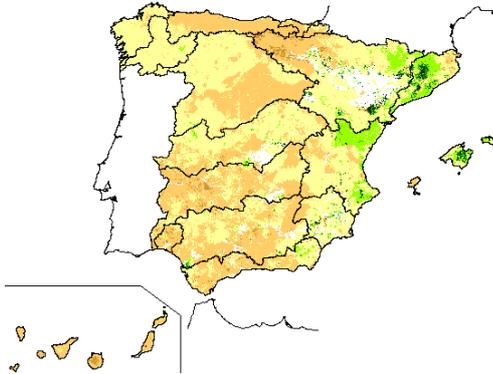
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

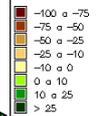
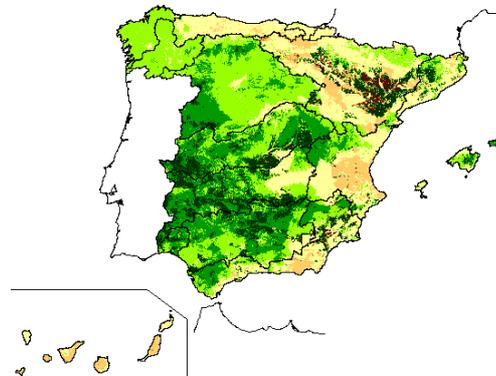
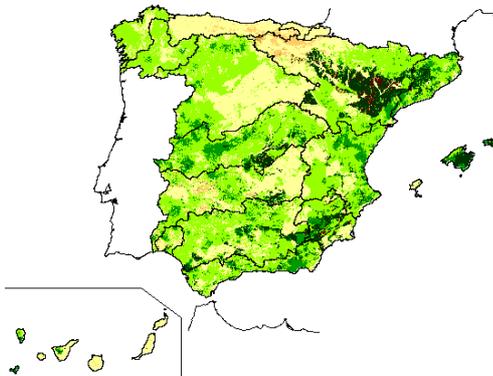
Escenario de emisiones A2

Escenario de emisiones B2

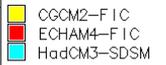
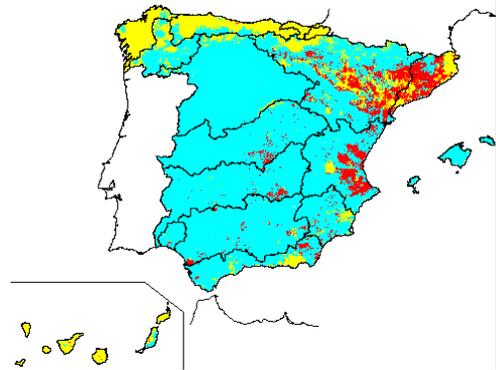
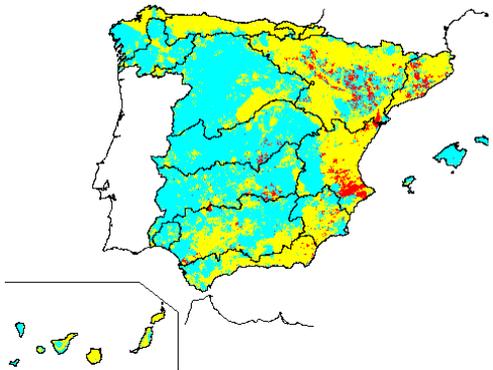
Media de desviaciones



Máximo de desviaciones



Proyecciones en máximo



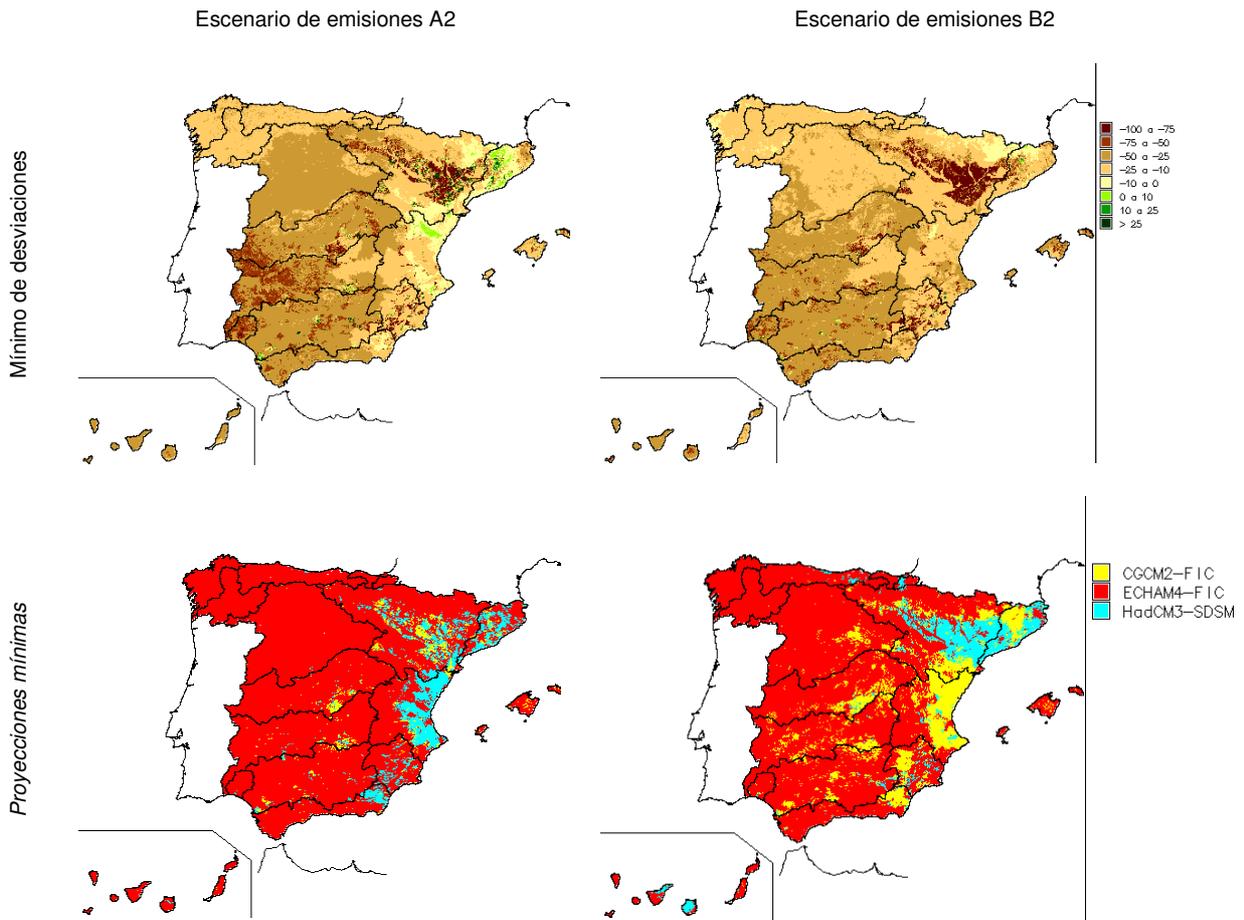
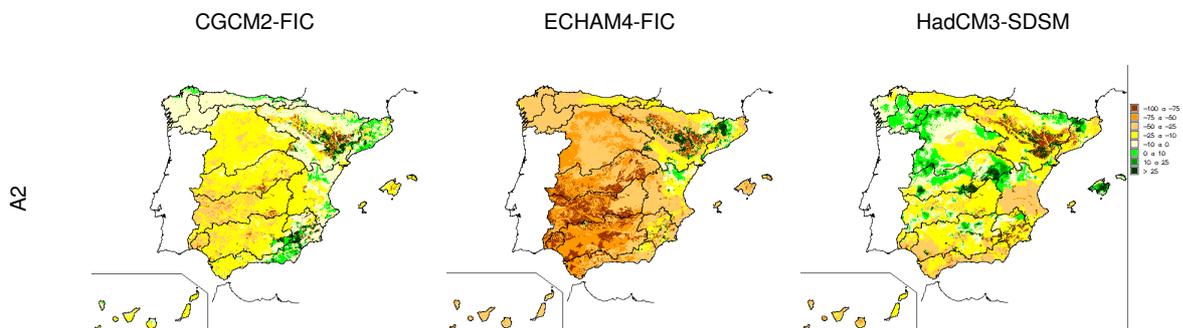


Figura 137.  $\Delta$  ESC anual (%) media, máxima y mínima para 2011-2040

Durante el periodo 2041-2070, las reducciones en A2 son ya más importantes que en B2 en todas las proyecciones. Los patrones son similares a los del periodo anterior. ECHAM4-FIC da descensos generalizados en toda España. Por el contrario, las otras dos proyecciones estiman todavía incrementos de ESC en amplias zonas de España, especialmente en el escenario de emisiones B2; CGCM2-FIC da incrementos en el sur y este peninsulares y HadCM3-SDSM en el noroeste, centro, Pirineo y Baleares.



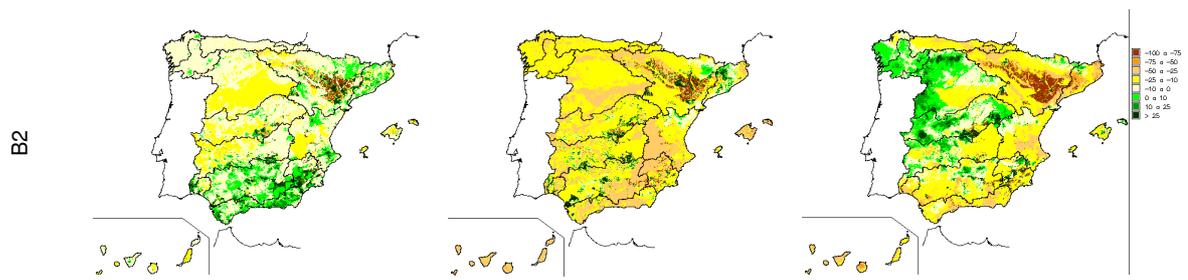
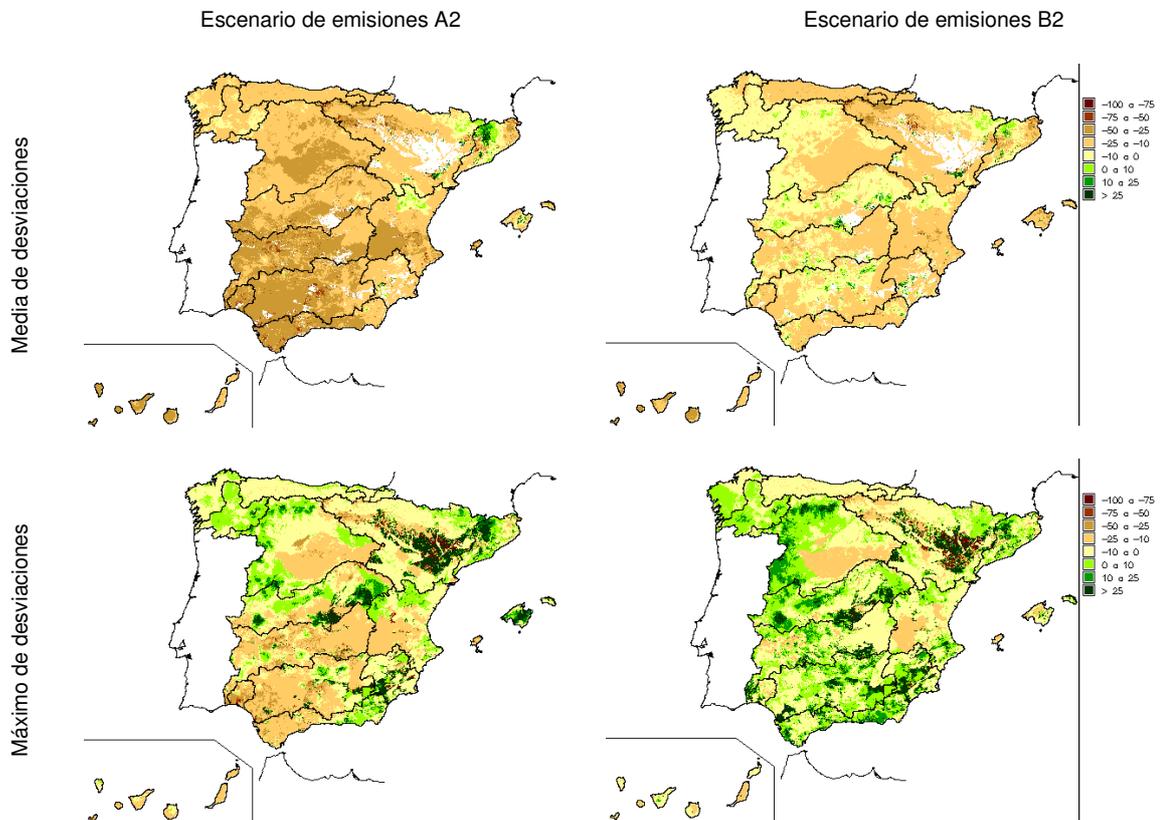


Figura 138.  $\Delta$  ESC anual (%) para 2041-2070 (A2 y B2).

Las medias muestran claramente la influencia de los valores mínimos. En los mapas de desviaciones máximas se comprueba la reducción de áreas con incrementos de ESC con respecto al periodo 2011-2040. Además, las desviaciones mínimas aparecen en el cuadrante suroeste de la Península, de mayor amplitud en el escenario A2 que en el B2. CGCM2-FIC predomina en cuanto a los valores máximos en áreas mediterráneas y de costa. ECHAM4-FIC sigue siendo la más pesimista.



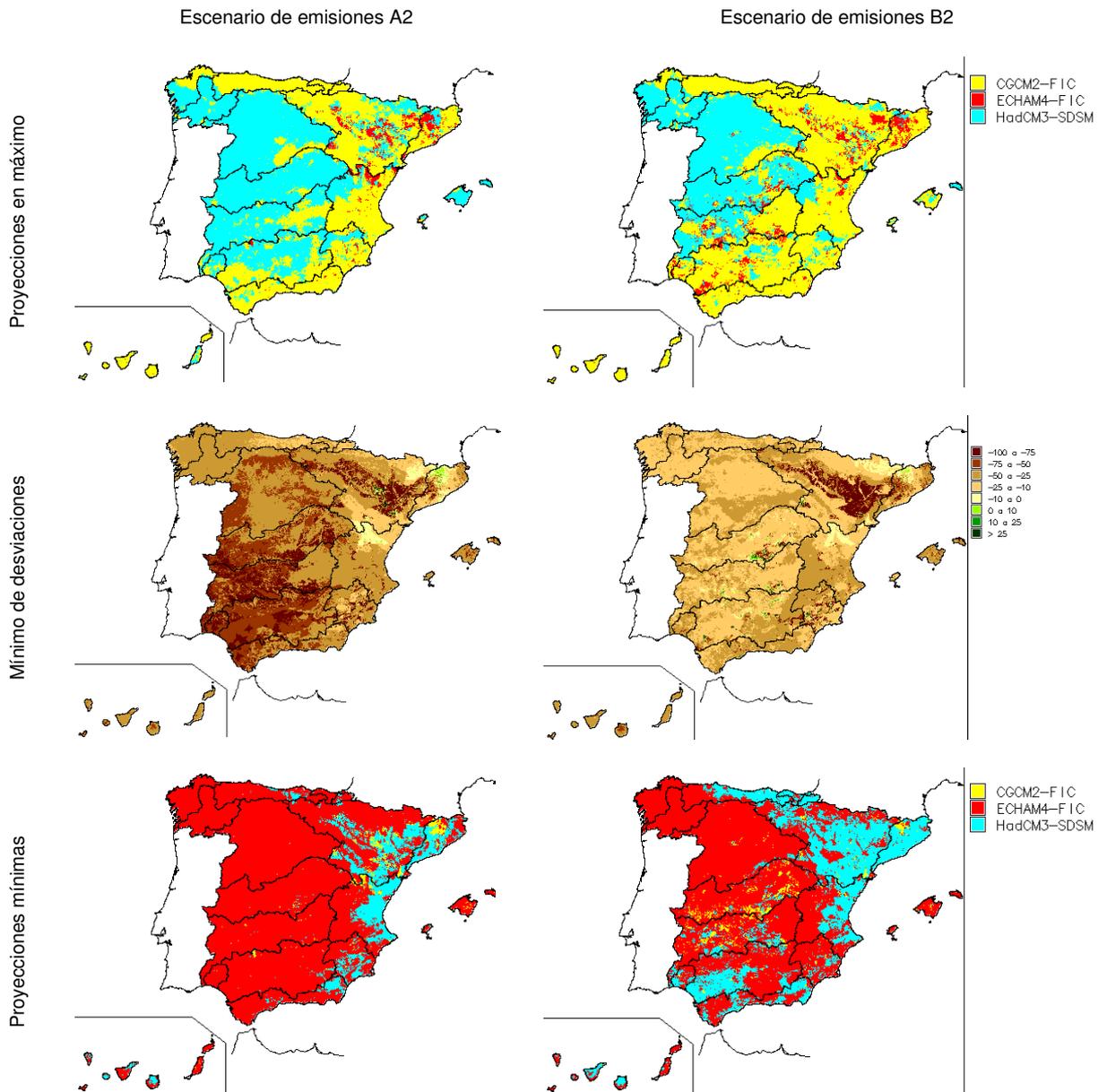


Figura 139.  $\Delta$  ESC anual (%) media, máxima y mínima para 2041-2070

Finalmente, en el periodo 2071-2100 se dispone de resultados de las 6 proyecciones (CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM más HadAM3-FIC y las PRUDENCE, ECHAM4-RCAO y HadCM3-PROMES). Predominan las estimaciones de reducción de ESC, especialmente en A2, pero todavía hay proyecciones que dan incrementos en amplias zonas, como HadCM3-SDSM-B2 en el oeste peninsular y Baleares y HadAM3-FIC-A2 en el norte peninsular. Esta última da mayores ESC que B2.

CGCM2-FIC

ECHAM4-FIC

HadAM3-FIC

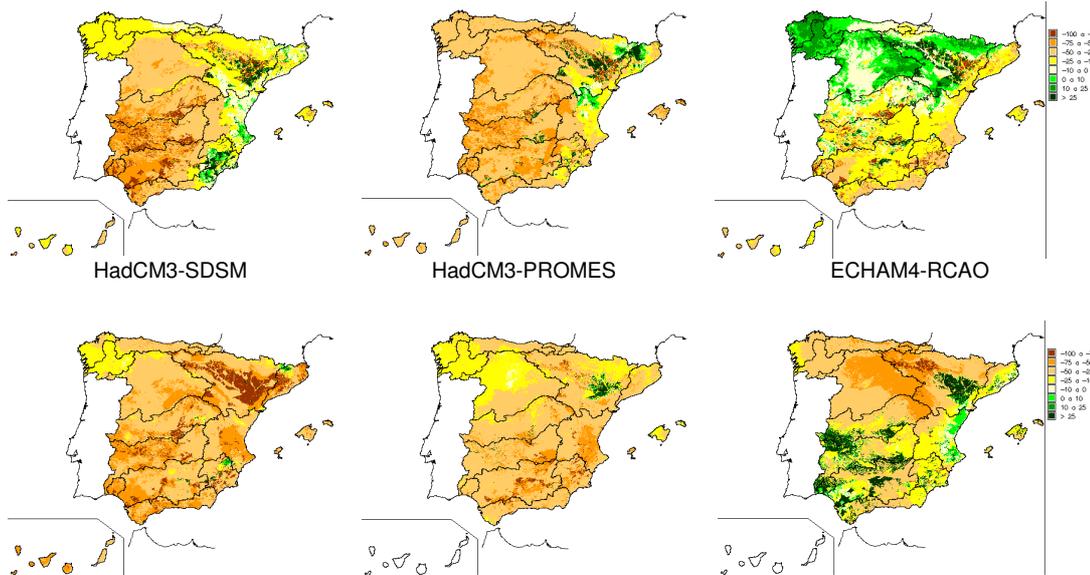


Figura 140.  $\Delta$  ESC anual (%) para 2071-2100 (A2)

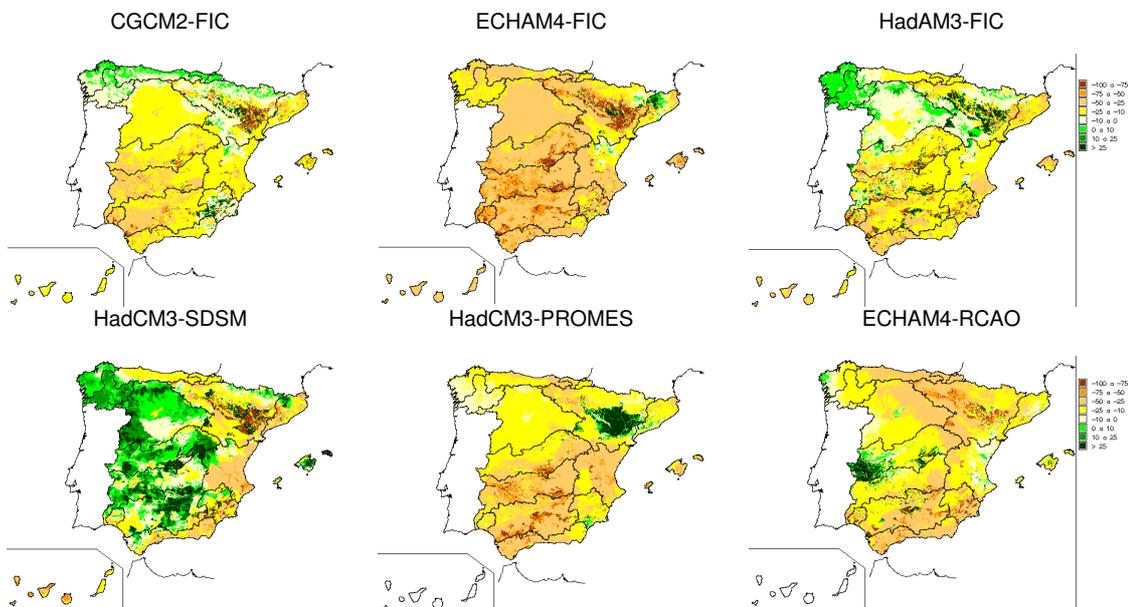
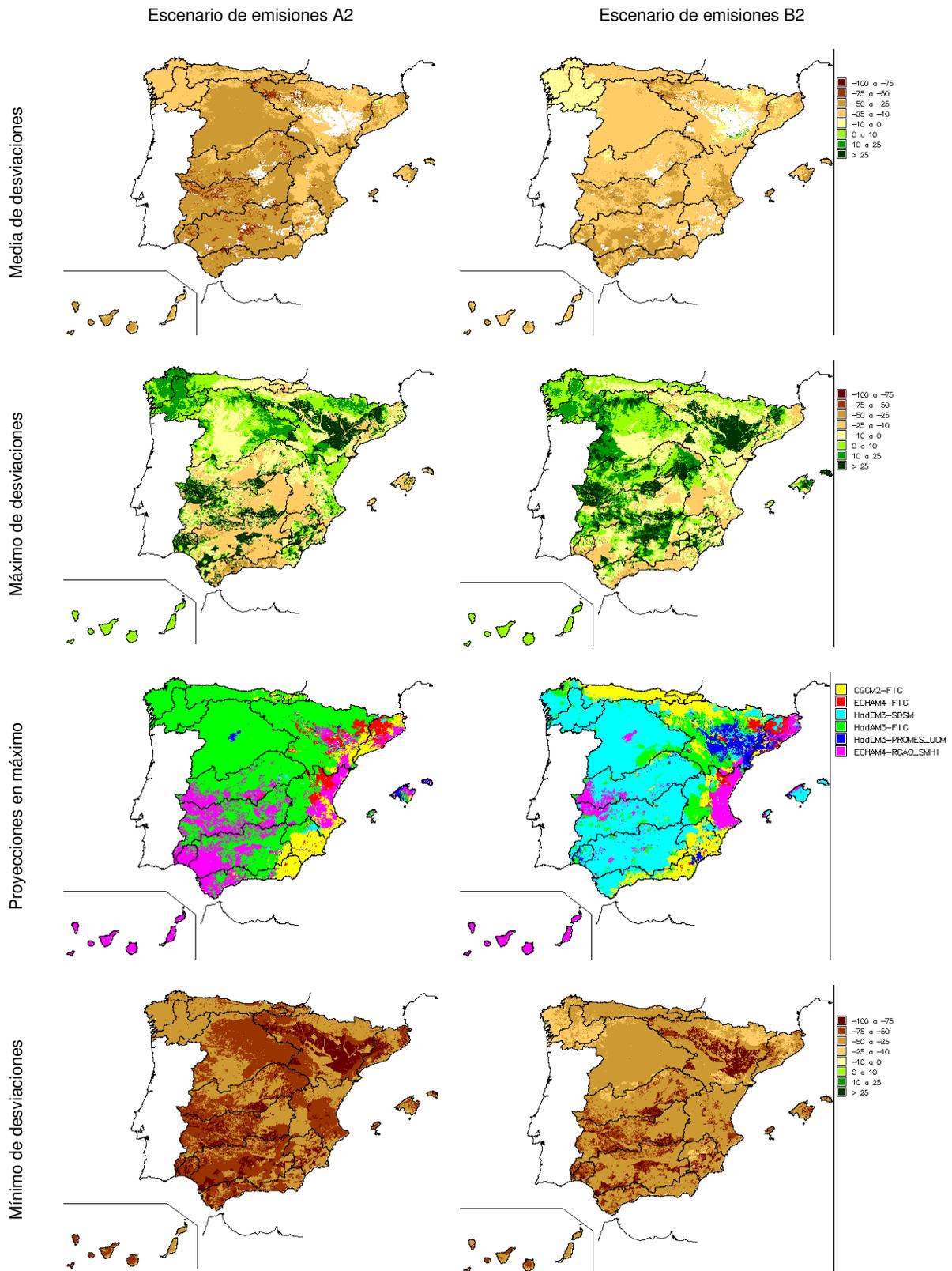


Figura 141.  $\Delta$  ESC anual (%) para 2071-2100 (B2)

La media de las 6 proyecciones muestra reducciones de ESC generalizadas. Son mucho más importantes en el escenario A2 que en el B2. Hay incrementos positivos algunas zonas áridas donde un pequeño incremento en valor absoluto supone un alto incremento porcentual. Los mapas de las estimaciones más pesimistas siguen siendo de un orden de magnitud superior al de los valores positivos en áreas de generación de recurso como el Pirineo, Miño y Sil y orla montañosa del Duero.

El modelo Hadley, en sus versiones HadAM3 y HadCM3, da las máximas ESC en gran parte de España. En escenario A2, ECHAM4-RCAO da los resultados más pesimistas en la submeseta norte y el Pirineo; ECHAM4-FIC da los peores valores en el noroeste, sierra de Gredos, de Cazorla y Sierra Nevada; CGCM2-FIC, en el suroeste; y las dos proyecciones del HadCM3 (SDSM y PROMES) en el área mediterránea. En el B2, las reducciones mayores las dan ECHAM4-FIC en la fachada atlántica, ECHAM-RCAO en Cantábrico y Pirineo y las tres derivadas de HadAM3 y HadCM3 en el arco mediterráneo.



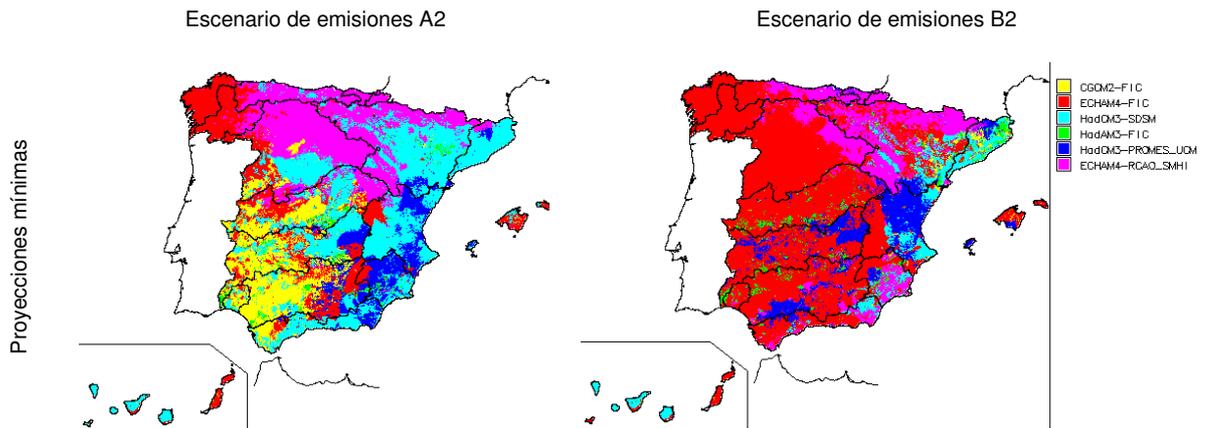


Figura 142.  $\Delta$  ESC anual (%) media, máxima y mínima para 2071-2100

En los siguientes mapas se muestran las desviaciones de las aportaciones estimadas en las masas de agua para cada uno de los 3 periodos futuros de 30 años del siglo XXI con relación a las simulaciones para 1961-90. Se han representado los valores medios de todas las proyecciones, separándose las del escenario de emisiones A2 de las del B2. Las masas de agua sobre las que se ha hecho el análisis son aquellas que tienen una cuenca vertiente igual o superior a 10 km<sup>2</sup> y un caudal igual o superior a 100 l/s en régimen natural.

Para el periodo 2011-2040 y A2 la reducción media es del 10% al 25% en Cantábrico, País Vasco y Ebro occidental, determinando ésta una reducción de la APN en el tramo medio del río Ebro. En las cuencas atlánticas, la reducción pasa del 0 a 10% en el norte al 10% al 25% hacia el sur. En la mitad oriental peninsular hay menores reducciones e incluso zonas con aumento de ESC, como en el Pirineo oriental, C.I. de Cataluña y norte y sur de la cuenca del Júcar. El escenario climático B2 es similar al A2, e incluso con mayor descenso de ESC en la zona este y sureste peninsular y en Baleares.

En el periodo 2041-70 en A2 hay una clara polaridad N-S, con reducciones del 25% al 50% en amplias zonas del sur de la Península y de las cuencas del Tajo y Júcar, así como en el centro del Duero y en el oeste del Ebro. La situación del escenario B2 se parece a las de el periodo 2011-2040, si bien con reducciones algo mayores al oeste del Ebro y en Baleares. Destacan los incrementos en algunos ríos de las Cuencas Internas de Cataluña.

En el periodo 2071-2100 y escenario A2 se dan las mayores reducciones de ESC, con valores medios del 25% al 50%, salvo en el NO de España y en el Pirineo central y oriental. La reducción es especialmente intensa en el sur y centro de España; los ríos Duero, Tajo, Júcar, Segura y Ebro con reducciones del 30% al 40%, los ríos Guadiana y Guadalquivir con reducciones del 40%, e incluso algunos ríos del sur sobrepasando reducciones el 50%. El escenario climático B2 es mucho menos pesimista que el A2, con una clara polaridad N-S. Los ríos de Galicia-Costa y Miño-Sil tienen las menores reducciones (0% a 10%), mientras que en los de la mitad sur peninsular, Baleares y Ebro occidental se dan las mayores reducciones (20% al 30%).



Figura 143.  $\Delta$  APN (%) en la red hidrográfica. 2011-2040, A2



Figura 144.  $\Delta$  APN (%) en la red hidrográfica. 2011-2040, B2



Figura 145.  $\Delta$  APN (%) en la red hidrográfica. 2041-2070, A2



Figura 146.  $\Delta$  APN (%) en la red hidrográfica. 2041-2070, B2



Figura 147.  $\Delta$  APN (%) en la red hidrográfica. 2071-2100, A2



Figura 148.  $\Delta$  APN (%) en la red hidrográfica. 2071-2100, B2

### 6.5.3 Estacionalidad

La descomposición estacional de desviaciones de ESC se muestra en las tablas siguientes. La ESC de los escenarios A2 se reduce paulatinamente en invierno, pero en B2 sube en el periodo 2071-2100. En otoño cae la media en 2071-2100 para A2. Los incrementos de otoño e invierno en las proyecciones HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM son debidos a incrementos en PRE.

		Escenario de emisiones A2						Escenario de emisiones B2							
		CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
Anual	2011-2040	-3	-22		-2			-8	-6	-18		1			-8
	2041-2070	-9	-34		-8			-16	-5	-21		-8			-11
	2071-2100	-24	-37	0	-34	-28	-40	-28	-7	-28	-8	-1	-18	-22	-14
OND	2011-2040	5	-28		6			-8	1	-28		2			-10
	2041-2070	-6	-42		-1			-19	0	-27		5			-9
	2071-2100	-28	-42	-3	-31	-31	-32	-30	-5	-40	-8	-2	-16	-22	-17
EFM	2011-2040	-2	-14		5			-3	-7	-2		12			1
	2041-2070	-3	-24		-4			-8	2	-8		4			0
	2071-2100	-15	-25	18	-19	-9	-30	-15	2	-4	1	18	-3	-7	2
AMJ	2011-2040	-9	-11		-21			-14	-10	-10		-17			-13
	2041-2070	-19	-26		-17			-20	-22	-17		-36			-26
	2071-2100	-38	-42	-19	-58	-40	-66	-44	-28	-28	-20	-25	-31	-46	-29
JAS	2011-2040	-11	-41		-14			-24	-16	-42		-16			-27
	2041-2070	-23	-48		-26			-33	-19	-46		-29			-32
	2071-2100	-29	-49	-8	-55	-48	-55	-41	-18	-50	-12	-34	-36	-41	-32

**ESCORRENTÍA:** Desviaciones (%) de medias anuales y trimestrales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PRUDENCE-UCM; P = modelo global ECHAM4 y regionalización PRUDENCE-SMHI. Colores: verde >0%, amarillo -20% a 0%, rojo <-20%.

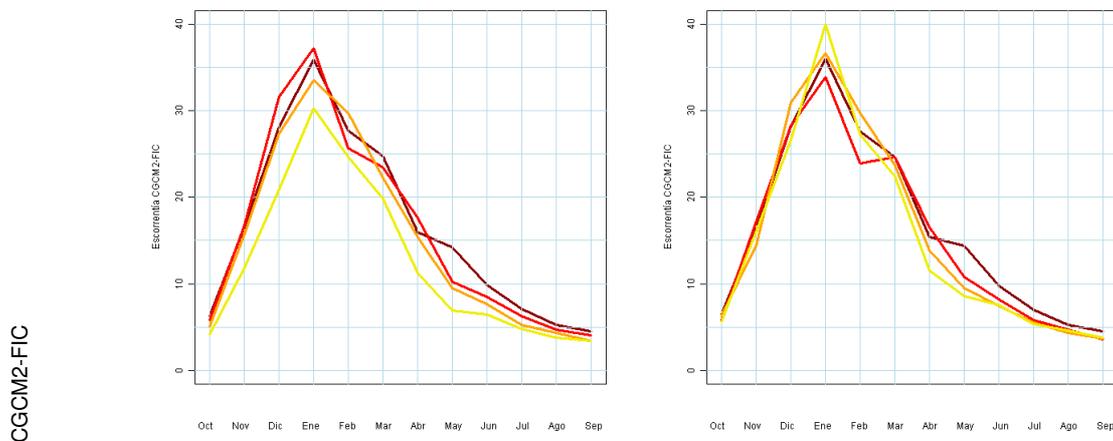
Tabla 26. Δ ESC (%) en España

Las siguientes figuras muestran los ciclos estacionales en valores absolutos. Las diferencias son en general más pronunciadas en otoño y primavera, aunque HadCM3-SDSM muestra una desviación importante también en invierno. Los resultados en B2 dan menos variación que los A2. CGCM2-FIC mantiene mayor regularidad en la evolución del ciclo hidrológico.

- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

Escenario A2

Escenario B2

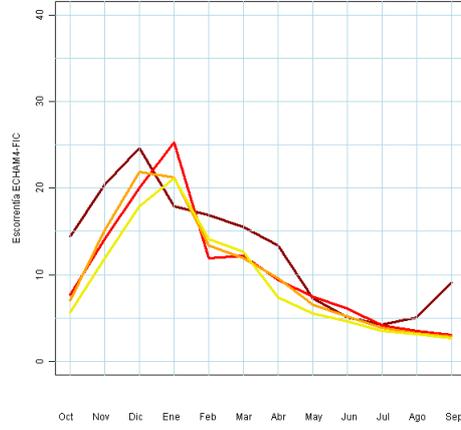
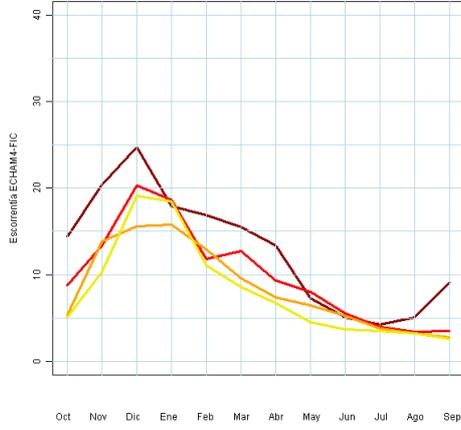


- 1961-1990
- 2011-2040
- 2041-2070
- 2070-2100

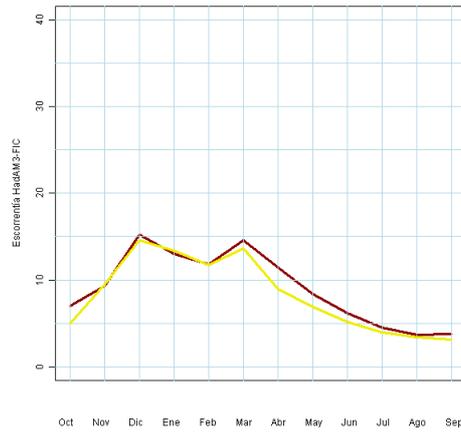
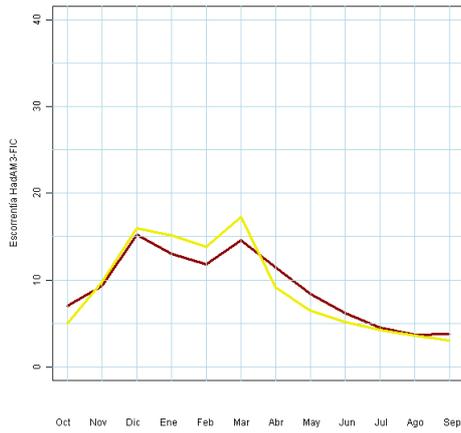
Escenario A2

Escenario B2

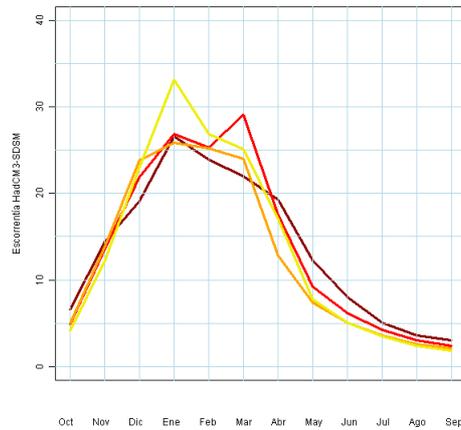
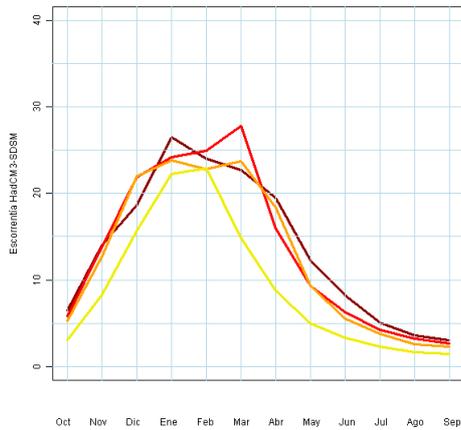
ECHAM4-FIC



HadAM3-FIC



HadCM3-SDSM



— 1961-1990  
— 2011-2040  
— 2041-2070  
— 2070-2100

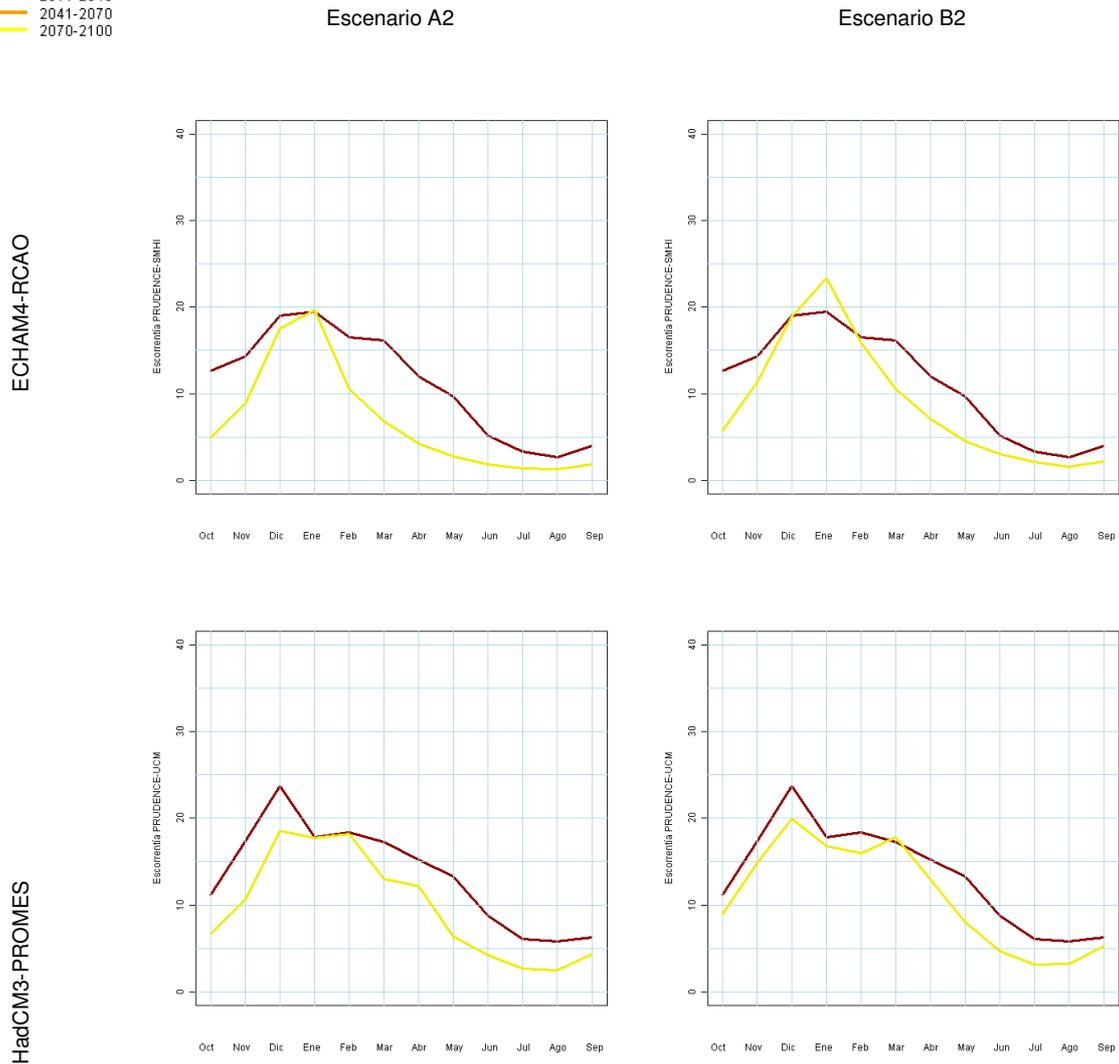


Figura 149. Ciclo estacional ESC (mm) por proyección y periodo

#### 6.5.4 Agregación por DD.HH.

En la tabla siguiente se muestran las  $\Delta$  ESC anual (%) por periodo para cada D.H. Los descensos más intensos se dan en el último periodo para el conjunto de proyecciones y para el escenario de emisiones A2. ECHAM4-FIC es singularmente pesimista desde el periodo 2011-2040, mientras que CGCM2-FIC sigue dando, como en las PRE, decrementos más bajos en las cuencas del sur y la fachada mediterránea. Hay también diferencias en los resultados relacionados con HadAM2-FIC y HadCM3-SDSM. El escenario B2 de ésta última da incrementos de ESC en la fachada atlántica y mitad norte de la Península. Las proyecciones PRUDENCE solamente dan resultados a partir de 2071 y son pesimistas.

Hay que destacar los fuertes descensos de ESC en las DD.HH. del suroeste, escenario A2, para 2071-2100, con descensos medios del conjunto de las proyecciones superiores al 40% en Gadiana, Guadalquivir, C.I. de Andalucía y Canarias. En el otro extremo, las DD.HH. del norte y noreste presentan las menores reducciones. En el escenario B2, estas reducciones de ESC son inferiores.

		Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2							
		CGCM	ECHAM	HadAM	HadCM	HadCM	ECHAM	Med	CGCM	ECHAM	HadAM	HadCM	HadCM	ECHAM	Med
España	2011-2040	-3	-22		-2			-8	-6	-18		1			-8
	2041-2070	-9	-34		-8			-16	-5	-21		-8			-11
	2071-2100	-24	-37	0	-34	-28	-40	-28	-7	-28	-8	-1	-18	-22	-14
Cantábrico	2011-2040	-6	-20		-11			-13	-5	-15		-8			-10
	2041-2070	-4	-27		-17			-16	-6	-22		-19			-16
	2071-2100	-13	-40	-1	-38	-31	-44	-29	-1	-28	-12	-13	-20	-28	-17
Galicia-Costa	2011-2040	-1	-20		-1			-6	2	-13		-2			-3
	2041-2070	-4	-31		-4			-12	-5	-21		-1			-8
	2071-2100	-18	-36	11	-22	-16	-29	-19	-2	-23	4	6	-8	-9	-5
CI País Vasco	2011-2040	-6	-18		-11			-12	-5	-14		-10			-10
	2041-2070	-2	-24		-20			-16	-5	-21		-23			-16
	2071-2100	-9	-40	-8	-39	-41	-52	-30	2	-28	-20	-17	-31	-36	-20
Miño-Sil	2011-2040	-1	-21		1			-6	0	-15		2			-3
	2041-2070	-6	-34		0			-12	-4	-22		1			-7
	2071-2100	-19	-38	11	-20	-17	-34	-21	-2	-25	3	11	-8	-15	-6
Duero	2011-2040	-3	-25		1			-8	-7	-21		5			-7
	2041-2070	-13	-41		-1			-17	-7	-23		0			-9
	2071-2100	-31	-40	4	-33	-23	-47	-31	-10	-29	-2	8	-16	-24	-13
Tajo	2011-2040	-3	-31		4			-8	-11	-28		11			-8
	2041-2070	-16	-48		-1			-19	-8	-23		1			-9
	2071-2100	-39	-41	-5	-38	-32	-40	-35	-16	-32	-10	7	-22	-17	-15
Guadiana	2011-2040	-7	-40		2			-12	-16	-34		16			-9
	2041-2070	-23	-58		-11			-27	-9	-24		-4			-11
	2071-2100	-49	-48	-12	-48	-40	-25	-42	-24	-40	-15	4	-32	-16	-20
Guadalquivir	2011-2040	-2	-36		0			-11	-21	-34		13			-13
	2041-2070	-18	-55		-16			-28	-2	-25		-12			-12
	2071-2100	-48	-49	-20	-45	-44	-29	-43	-23	-43	-24	0	-33	-28	-24
CI Andalucía	2011-2040	-1	-33		-1			-12	-16	-35		6			-16
	2041-2070	-15	-50		-24			-30	-2	-26		-17			-15
	2071-2100	-43	-44	-27	-50	-42	-25	-41	-23	-40	-25	-14	-29	-30	-27
Segura	2011-2040	-1	-25		-1			-10	-22	-24		10			-13
	2041-2070	-10	-39		-11			-21	-2	-28		-11			-14
	2071-2100	-23	-39	-22	-35	-48	-21	-33	-14	-33	-22	-5	-23	-28	-21
Júcar	2011-2040	1	-11		-4			-5	-21	-17		-1			-12
	2041-2070	-11	-28		-14			-18	-5	-20		-14			-13
	2071-2100	-21	-24	-18	-46	-45	-21	-32	-16	-27	-20	-18	-34	-14	-24
Ebro	2011-2040	-2	-19		-7			-9	-7	-15		-5			-9
	2041-2070	-6	-26		-12			-14	-5	-19		-17			-13
	2071-2100	-17	-31	3	-40	-30	-46	-28	-4	-25	-9	-11	-17	-29	-16
CI Cataluña	2011-2040	6	-4		-3			0	-9	-5		-8			-7
	2041-2070	-2	-5		-6			-4	-2	-6		-19			-9
	2071-2100	-11	-3	-13	-34	-30	-29	-21	-13	-5	-18	-14	-20	-18	-16
Islas Baleares	2011-2040	-5	-21		11			-4	-19	-31		0			-15
	2041-2070	-9	-39		1			-15	-8	-31		-18			-20
	2071-2100	-20	-44	-24	-42	-22	-21	-31	-25	-39	-32	-6	-25	-13	-23
Canarias	2011-2040	-7	-37		-4			-18	-15	-34		-24			-25
	2041-2070	-16	-41		-37			-32	-11	-36		-35			-28
	2071-2100	-31	-44	-30	-57			-41	-22	-37	-29	-47			-34

**ESCORRENTÍAS:** Incrementos (%) de medias anuales. Títulos de columnas: A = Escenario de emisiones A2; B = Escenario de emisiones B2; C = modelo global CGCM2 y regionalización FIC; E = modelo global ECHAM4 y regionalización FIC; H = modelo global HadAM3 y regionalización FIC; S = modelo global HadCM3 y regionalización SDSM; U = modelo global HadCM3 y regionalización PROMES (PRUDENCE-UCM); P = modelo global ECHAM4 y regionalización RAO (PRUDENCE-SMHI). Colores: verde >0%, amarillo -20% a 0%, rojo < -20%.

Tabla 22.  $\Delta$  ESC anual (%) por D.H., proyección y periodo (%)

Estos resultados son afines a las desviaciones de PRE media. La siguiente tabla muestra las desviaciones de ambas variables, PRE y ESC del periodo 2011-2040 respecto al 1961-1990 por D.H. Las desviaciones medias en España se cifran entorno al 5% al 6% (PRE) y 9% y 8% (ESC) en A2 y B2 respectivamente. Estos valores medios están influenciados por las desviaciones fuertemente negativas de la proyección ECHAM4-FIC, con mayor influencia en cuencas atlánticas.

	Escenario de Emisiones A2					Escenario de Emisiones B2					Escenario de Emisiones A2					Escenario de Emisiones B2											
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB
España	0	-11		-3			-5	-4	-10		-3			-6	-3	-22		-2			-8	-6	-18		1		-8
Cantábrico	-4	-12		-7			-8	-3	-8		-5			-6	-6	-20		-11			-13	-5	-15		-8		-10
Galicia-Costa	-2	-14		-2			-6	1	-9		-3			-3	-1	-20		-1			-6	2	-13		-2		-3
CI País Vasco	-2	-9		-5			-6	-2	-6		-4			-4	-6	-18		-11			-12	-5	-14		-10		-10
Miño-Sil	-2	-15		-1			-6	0	-10		0			-3	-1	-21		1			-6	0	-15		2		-3
Duero	-1	-13		-4			-6	-4	-12		-3			-6	-3	-25		1			-8	-7	-21		5		-7
Tajo	0	-14		-2			-5	-5	-14		-1			-7	-3	-31		4			-8	-11	-28		11		-8
Guadiana	-1	-15		-3			-6	-7	-17		-1			-8	-7	-40		2			-12	-16	-34		16		-9
Guadalquivir	0	-17		-2			-6	-10	-17		1			-9	-2	-36		0			-11	-21	-34		13		-13
CI Andalucía	-1	-17		-3			-7	-9	-18		-2			-10	-1	-33		-1			-12	-16	-35		6		-16
Segura	6	-3		-2			0	-11	-7		-1			-6	-1	-25		-1			-10	-22	-24		10		-13
Júcar	5	0		-2			1	-9	-5		-4			-6	1	-11		-4			-5	-21	-17		-1		-12
Ebro	2	-7		-4			-3	-3	-6		-5			-4	-2	-19		-7			-9	-7	-15		-5		-9
CI Cataluña	4	1		-2			1	-3	0		-5			-3	6	-4		-3			0	-9	-5		-8		-7
Islas Baleares	-2	-6		-1			-3	-10	-10		-3			-7	-5	-21		11			-4	-19	-31		0		-15
Canarias	-4	-20		-4			-10	-9	-17		-15			-14	-7	-37		-4			-18	-15	-34		-24		-25

Tabla 27.  $\Delta$  PRE anual (%) (izda) y  $\Delta$  ESC anual (%) (dcha) por D.H. Periodo 2011-2040 respecto al 1961-1990

Desde el punto de vista de la planificación hidrológica, el Reglamento de Planificación Hidrológica (RD 907/2007) y, más concretamente, la Instrucción de Planificación Hidrológica (ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre) considera otros dos periodos de referencia distintos del 1961-1990: “Los balances se realizarán con las series de recursos hídricos correspondientes a los períodos 1940-2005 y 1980-2005, debiendo recogerse en el Plan las principales diferencias entre los resultados correspondientes a cada periodo”. En la mayor parte de España se puede considerar que el periodo 1961-1990 es de carácter húmedo ya que no incluye la sequía de la primera mitad de los años 90. Si se consideran los periodos 1940-2005 y 1980-2005, se comprueba la existencia de una disminución de PRE del 1% y 6% respectivamente. Esta disminución se traslada a las ESC en desviaciones del 3% y 13% respecto al periodo 1961-1990. En la siguiente figura se muestran las series de PRE y ESC en España obtenidas a partir de los datos observados y tratados mediante la aplicación del modelo SIMPA08; también se muestran las medias de ambas variables para cada uno de los periodos anteriormente mencionados. Se aprecia cómo la media de 1961-1990 es ligeramente superior a la de 1940-2005 y considerablemente superior a la de 1980-2005.

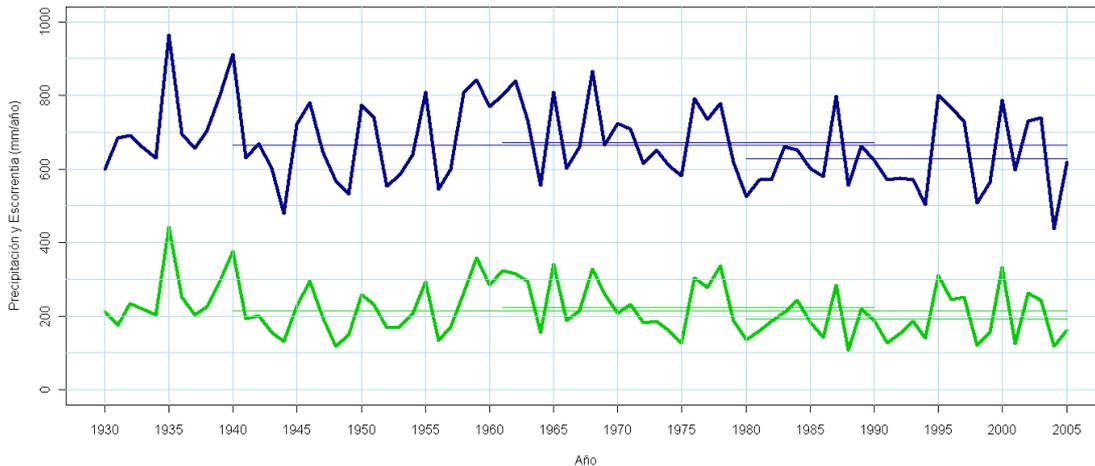


Figura 150. Series de PRE anual (azul) y ESC anual (verde) en España obtenidas mediante la aplicación del modelo SIMPA08. Medias por periodo superpuestas

El impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos se expresa como desviaciones de los valores medios a lo largo del s. XXI respecto a los correspondientes al periodo de control (1961-1990). La Instrucción de Planificación Hidrológica, IPH, (ORDEN ARM/2656/2008, de 10 de septiembre) añade una segunda consideración respecto al cambio climático ya que contempla que “Con objeto de evaluar las tendencias a largo plazo,

para el horizonte temporal del año 2027 el plan hidrológico estimará el balance o balances entre los recursos previsiblemente disponibles y las demandas previsibles correspondientes a los diferentes usos. Para la realización de este balance se tendrá en cuenta el posible efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos naturales de la demarcación ... El citado horizonte temporal se incrementará en seis años en las sucesivas actualizaciones de los Planes”.

Los párrafos anteriores indican la conveniencia de estimar la  $\Delta$  APN (%) del periodo 2011-2040 respecto a los periodos 1940-2005 y 1980-2005, ya que se ha considerado que la situación representativa del horizonte 2027 es la de la ventana de 30 años que la contiene (2011-2040). Para ello, se utiliza la relación de APN medias 1961-1990/1940-2005 y 1961-1990/1980-2005 de las simulaciones SIMPA08 y se traslada a los resultados obtenidos. Se entiende que si se fueran a utilizar estas desviaciones para la obtener series naturales del periodo 2011-2040, cualquiera de los dos coeficientes sería adecuado siempre que la serie cuya media se va a transformar abarcara el periodo 1940-2005, si se utiliza la desviación respecto a la media de ese mismo periodo 1940-2005, o 1980-2005, si se utiliza la desviación respecto a la media de 1980-2005. Y como con cualquiera de las dos opciones, se deberían obtener resultados equivalentes en el periodo común, la serie 1940-2005 sería siempre más desfavorable que la más corta 1980-2005. Por tanto, los estadísticos que en este capítulo se exponen solamente tienen interés para destacar el carácter de la serie 1980-2005 respecto a la 2011-2040.

Una estimación preliminar de las  $\Delta$  APN (%) por D.H. para sucesivas revisiones de planes, puede obtenerse mediante interpolación lineal utilizando los datos de las tablas siguientes que muestran las desviaciones medias en los periodos 2011-2040 y 2041-2070.

	Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2							Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	1	-11	-2				-4	-3	-10		-2			-5	0	-20		1			-6	-3	-16		4		-5	
Cantábrico	-4	-12	-7				-8	-3	-9		-6			-6	-5	-19		-9			-11	-4	-14		-7		-8	
Galicia-Costa	-3	-15	-3				-7	0	-10		-4			-4	-1	-19		0			-7	3	-13		-2		-4	
CI País Vasco	-3	-10	-6				-6	-3	-7		-5			-5	-6	-18		-11			-11	-4	-14		-10		-9	
Miño-Sil	-1	-15	-1				-6	0	-10		0			-3	1	-19		3			-5	3	-13		4		-2	
Duero	0	-13	-3				-6	-3	-11		-3			-6	-1	-23		3			-7	-4	-19		8		-5	
Tajo	1	-13	-1				-5	-4	-14		0			-6	0	-29		7			-7	-9	-26		14		-7	
Guadiana	2	-12	0				-3	-3	-14		2			-5	2	-34		12			-6	-7	-28		28		-2	
Guadalquivir	2	-15	1				-4	-7	-15		4			-6	5	-31		8			-6	-15	-30		21		-8	
CI Andalucía	2	-15	-1				-5	-7	-16		0			-8	8	-27		8			-4	-8	-29		15		-7	
Segura	6	-3	-2				0	-11	-7		0			-6	3	-22		-4			-5	-19	-21		15		-8	
Júcar	4	0	-2				1	-9	-5		-4			-6	3	-9		-3			-3	-20	-16		1		-12	
Ebro	4	-6	-3				-2	-1	-4		-4			-3	3	-16		-3			-5	-3	-11		0		-5	
CI Cataluña	3	0	-3				0	-4	-1		-6			-4	6	-5		-3			0	-9	-5		-8		-7	
Islas Baleares	-10	-14	-9				-11	-17	-18		-11			-15	-25	-37		-12			-25	-36	-45		-21		-34	
Canarias	-8	-23	-8				-13	-13	-20		-19			-17	-12	-40		-8			-20	-19	-37		-28		-28	

	Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2							Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2						
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	7	-5	3				1	2	-5		4			0	12	-11		12			-4	8	-6		16		6	
Cantábrico	2	-7	-2				-2	3	-3		0			0	3	-12		-2			-4	4	-7		1		-1	
Galicia-Costa	2	-11	1				-3	5	-6		1			0	5	-14		6			-1	9	-8		4		2	
CI País Vasco	1	-6	-2				-3	1	-3		-1			-1	-1	-13		-6			-7	1	-9		-5		-4	
Miño-Sil	5	-9	5				0	7	-4		6			3	12	-10		14			5	13	-4		15		8	
Duero	3	-10	0				-2	0	-8		1			-2	10	-15		14			3	6	-11		19		5	
Tajo	9	-6	7				4	4	-6		8			2	21	-14		30			13	11	-11		39		13	
Guadiana	10	-6	8				4	4	-7		10			2	25	-19		37			14	13	-12		55		19	
Guadalquivir	11	-8	9				4	0	-8		12			2	27	-17		30			13	3	-15		46		11	
CI Andalucía	9	-8	6				2	0	-10		7			-1	21	-19		21			8	3	-21		30		4	
Segura	12	3	3				6	-6	-2		5			-1	19	-10		19			9	-7	-9		33		6	
Júcar	9	5	2				5	-4	0		0			-1	16	3		10			10	-10	-5		14		0	
Ebro	8	-2	1				2	2	-1		0			1	10	-10		5			2	4	-4		7		2	
CI Cataluña	5	2	-1				2	-2	1		-4			-2	13	1		3			6	-3	1		-2		-1	
Islas Baleares	1	-3	2				0	-7	-7		0			-5	-2	-18		15			-2	-17	-29		4		-14	
Canarias	0	-17	-1				-6	-5	-14		-12			-10	-4	-35		0			-13	-12	-31		-21		-22	

Tabla 28.  $\Delta$  PRE anual (%) (izda) y  $\Delta$  ESC anual (%) (dcha) por D.H. Periodo 2011-2040 respecto al 1940-2005 (superior) y al 1980-2005 (inferior)



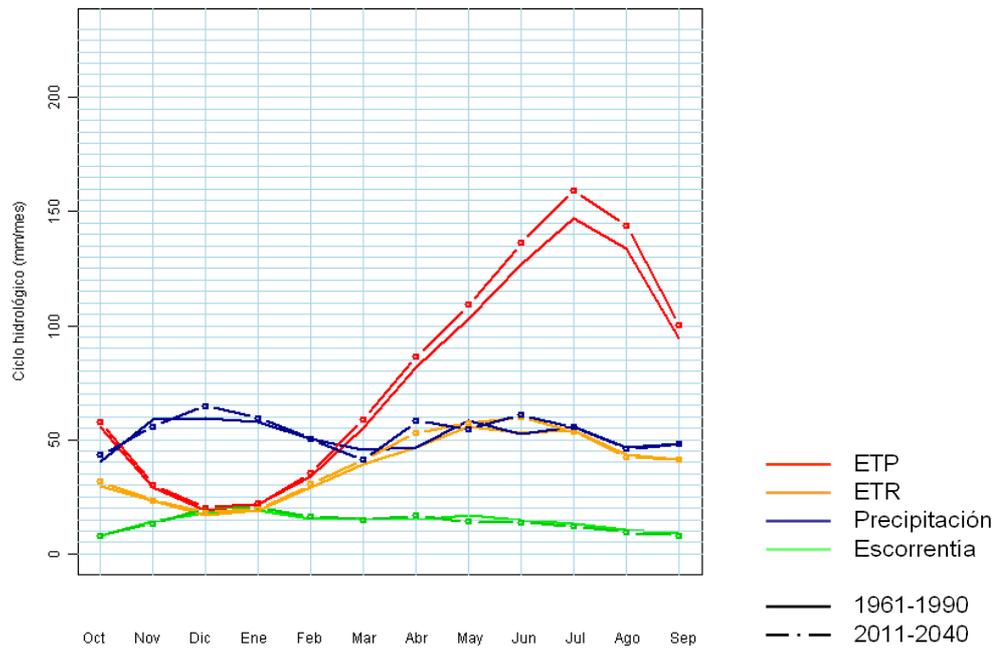


Figura 151. Series medias mensuales en la D.H. del Ebro (mm). Escenario A2

De la misma manera que se exponían las desviaciones anuales respecto a los tres periodos considerados en planificación hidrológica, los correspondientes en versión estacional se exponen en las siguientes tablas.

	Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2						Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2												
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med			
España	5	-13	6				-1	0	-17	5			-5	5	-28	6			-8	1	-28	2			-10						
Cantábrico	-7	-4	5				-2	-2	-1	0			-1	-11	-17	4			-10	-4	-14	-5			-8						
Galicia-Costa	2	-9	7				0	6	-8	-3			-2	2	-29	9			-8	8	-27	-7			-9						
CI País Vasco	-7	-1	3				-2	-2	5	1			1	-13	-19	-4			-14	-7	-13	-9			-10						
Miño-Sil	1	-12	10				-1	3	-12	1			-3	1	-31	13			-8	4	-29	-2			-10						
Duero	5	-17	5				-2	1	-17	2			-5	11	-32	7			-6	4	-30	2			-9						
Tajo	9	-22	6				-3	1	-25	6			-7	20	-43	5			-8	5	-43	11			-12						
Guadiana	10	-23	5				-3	2	-28	7			-8	29	-50	-1			-13	9	-50	19			-14						
Guadalquivir	10	-25	7				-5	-3	-33	14			-10	27	-45	-5			-15	-5	-54	27			-19						
CI Andalucía	11	-23	5				-5	-1	-34	12			-11	25	-43	-5			-15	1	-55	26			-21						
Segura	23	-5	7				6	-2	-25	16			-5	5	-26	2			-10	-16	-41	19			-16						
Júcar	19	0	5				7	-4	-19	9			-5	9	5	-1			4	-15	-25	11			-11						
Ebro	2	-4	3				0	-3	-4	3			-2	0	-16	4			-5	-5	-13	0			-7						
CI Cataluña	10	16	3				9	-9	4	6			0	14	16	10			13	-18	5	9			-2						
Islas Baleares	4	-2	10				5	-5	-14	11			-1	8	-6	37			15	-9	-34	20			-5						
Canarias	-5	-25	12				-10	-2	-28	12			-11	-8	-46	19			-22	-9	-45	5			-23						

	Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2							Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2																			
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB
España	-7	-4		9			2	-2	-1		6			-1	-12	-18		3			-9	-5	-14		-6			-8													
Cantábrico	0	-11		4			-2	3	-10		-5			-4	-2	-32		5			-10	-4	-30		-10			-12													
Galicia-Costa	-11	-5		-1			-6	-6	0		-3			-3	-20	-25		-11			-19	-13	-20		-16			-16													
Ci País Vasco	-3	-16		5			-4	-1	-15		-3			-7	-5	-35		6			-11	-3	-34		-8			-15													
Miño-Sil	-1	-19		2			-5	-2	-20		-1			-8	5	-36		2			-10	-1	-34		-3			-13													
Duero	6	-24		3			-5	-1	-27		3			-8	15	-45		1			-10	1	-45		7			-13													
Tajo	9	-24		4			-3	1	-29		6			-7	31	-49		0			-6	10	-50		2			-6													
Guadiana	13	-24		9			-1	-1	-31		16			-6	37	-41		2			-1	2	-51		36			-4													
Guadalquivir	-13	-21		7			0	1	-33		15			-6	33	-39		2			-1	8	-52		35			-3													
Ci Andalucía	29	-1		13			14	4	-21		22			1	20	-16		16			7	-4	-32		36			0													
Segura	21	3		8			11	-1	-17		12			-2	19	15		8			14	-7	-18		21			-1													
Júcar	6	1		8			5	1	0		8			3	8	-10		12			4	2	-6		8			1													
Ebro	13	18		5			12	-7	6		8			2	15	17		11			14	-17	6		10			0													
Ci Cataluña	5	-2		11			5	-5	-13		12			-2	11	-4		40			16	-6	-32		23			-5													
Islas Baleares	-17	-34		-2			-18	-15	-37		-2			-18	-35	-62		-16			-38	-36	-61		-26			-41													
Canarias	-1	-18		0			-7	-6	-22		-1			-10	-2	-33		-1			-12	-5	-33		-4			-14													

	Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2							Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2																			
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB
España	-9	-6		3			-4	-4	-2		-1			-2	-14	-20		1			-11	-7	-16		-8			-10													
Cantábrico	5	-6		9			3	9	-6		0			1	5	-27		13			-3	11	-25		-4			-6													
Galicia-Costa	-13	-7		-3			-8	-8	-2		-6			-5	-23	-28		-15			-22	-17	-23		-20			-20													
Ci País Vasco	-1	-12		10			0	3	-12		1			-3	2	-30		14			-5	5	-29		-1			-9													
Miño-Sil	-1	-21		0			-7	-4	-21		-3			-10	1	-38		-2			-13	-4	-36		-7			-16													
Duero	0	-28		-3			-10	-7	-31		-3			-13	7	-49		-6			-16	-6	-49		-1			-19													
Tajo	-7	-25		2			-5	-1	-30		4			-9	27	-50		-3			-9	8	-51		17			-9													
Guadiana	8	-26		5			-4	-5	-34		11			-9	24	-46		-8			-10	-7	-55		24			-13													
Guadalquivir	-10	-24		4			-3	-2	-35		11			-9	23	-44		-6			-9	-1	-56		24			-11													
Ci Andalucía	25	-4		9			10	0	-24		18			-2	8	-24		5			-4	-13	-39		22			-10													
Segura	26	7		12			15	3	-14		16			2	29	24		17			23	1	-11		31			7													
Júcar	9	3		11			8	4	2		11			6	19	0		24			14	13	4		19			12													
Ebro	10	16		3			10	-9	4		6			0	12	14		8			12	-19	4		8			-2													
Ci Cataluña	3	-3		10			3	-6	-15		10			-3	12	-3		42			17	-5	-31		25			-4													
Islas Baleares	-4	-24		13			-5	-1	-28		14			-5	-8	-47		18			-12	-10	-45		5			-17													
Canarias	6	-13		6			0	1	-16		5			-3	5	-29		6			-6	1	-29		2			-9													

Tabla 30.  $\Delta$  PRE anual (%) (izda) y  $\Delta$  ESC anual (%) (dcha) por D.H. Periodo 2011-2040 respecto a 1961-1990 (superior); 1940-2005 (media); 1980-2005 (inferior). Otoño

	Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2							Escenario de Emisiones A2							Escenario de Emisiones B2																			
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB
España	-4	-12		3			-4	-7	1		6			0	-2	-14		5			-3	-7	-2		12			1													
Cantábrico	7	-20		-8			-7	2	-11		1			-3	5	-24		-11			-10	-1	-13		1			-4													
Galicia-Costa	-1	-10		6			5	2	24		13			11	0	7		7			-4	1	22		13			9													
Ci País Vasco	9	-22		-10			-9	5	-16		-3			-5	5	-27		-16			-14	0	-19		-6			-9													
Miño-Sil	2	10		7			5	1	26		17			12	2	5		9			5	1	20		18			10													
Duero	-5	2		7			1	-6	13		12			5	-3	-12		14			1	-6	-1		22			4													
Tajo	-10	-1		8			-1	-12	8		11			1	-12	-10		16			-2	-18	2		21			-1													
Guadiana	-12	-9		5			-5	-13	3		8			-2	-19	-22		12			-8	-26	-2		20			-5													
Guadalquivir	-8	-12		4			-5	-16	1		4			-4	-9	-28		9			-6	-28	-12		12			-9													
Ci Andalucía	-10	-15		2			-7	-15	-2		-1			-6	-11	-26		7			-8	-23	-13		2			-12													
Segura	-9	-33		-1			-16	-21	-15		-5			-13	-2	-34		5			-11	-24	-25		11			-13													
Júcar	-10	-30		0			-13	-16	-14		-3			-10	1	-26		6			-7	-22	-24		5			-13													
Ebro	-2	-22		-1			-8	-4	-10		2			-4	4	-23		-1			-6	-1	-12		7			-2													
Ci Cataluña	-5	-36		2			-13	1	-17		-2			-6	2	-39		10			-8	2	-25		3			-6													
Islas Baleares	-7	-34		1			-14	-9	-24		-2			-12	-9	-46		9			-14	-17	-41		-2			-19													
Canarias	-2	-20		-14			-13	-8	-13		-36			-20	-1	-40		-9			-19	-9	-38		-35			-30													

	Escenario de Emisiones A2												Escenario de Emisiones B2															
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
-2005																												
España	10	-17	-5				-4	9	-8		4			0	10	-20	-6				5	5	-9		6			1
Cantábrico	4	13	19				9	5	28		16			17	3	10					7	4	25		16			15
Galicia-Costa	14	-18	-6				-3	10	-12		1			0	11	-23	-11				-8	5	-15		-1			-4
Ci País Vasco	4	12	10				9	3	29		19			17	3	6					6	2	21		20			14
Miño-Sil	1	8	14				8	0	20		19			13	4	-6					7	1	5		30			12
Duero	-6	3	13				3	-8	12		16			7	-8	-6					2	-14	6		27			6
Tajo	-9	-6	8				-3	-11	6		11			2	-16	-19					-6	-23	2		25			1
Guadiana	-3	-8	10				0	-11	6		10			2	2	-20					1	-19	-2		25			2
Guadalquivir	-6	-12	6				-4	-11	2		3			-2	-2	-18					-1	-15	-4		13			-2
Ci Andalucía	-8	-32	0				-13	-20	-13		-3			-12	6	-29					-3	-17	-19		20			-5
Segura	-9	-30	1				-13	-16	-14		-2			-11	10	-19					2	-15	-17		15			-6
Júcar	-3	-24	-3				-10	-5	-12		1			-5	5	-22					-5	1	-11		8			-1
Ebro	-1	-33	5				-10	4	-14		2			-3	7	-36					-5	7	-21		8			-2
Ci Cataluña	-10	-36	-2				-16	-12	-26		-5			-15	-15	-49					-21	-22	-45		-8			-25
Islas Baleares	-9	-26	-21				-18	-15	-20		-40			-25	-16	-49					-29	-22	-48		-45			-38
Canarias	-7	-14	0				-7	-10	-2		3			-3	-6	-17					-7	-10	-5		8			-2
-2005																												
España	32	-1	13				15	26	10		25			20	37	0				17	18	30	14		32			25
Cantábrico	13	23	19				18	14	39		26			26	15	22					20	16	40		29			29
Galicia-Costa	34	-4	10				13	29	4		19			17	33	-8					11	27	2		18			16
Ci País Vasco	7	15	13				12	6	32		23			20	8	11					11	6	27		25			19
Miño-Sil	27	35	42				35	25	51		49			42	35	21					38	30	36		68			45
Duero	16	27	38				27	13	38		42			31	14	17					27	6	32		57			32
Tajo	17	20	39				25	15	36		42			31	21	17					35	12	48		79			46
Guadiana	23	18	40				27	13	35		40			29	48	16					47	17	43		81			47
Guadalquivir	20	13	35				23	13	31		31			25	37	14					38	18	33		57			36
Ci Andalucía	13	-17	23				6	-2	6		18			8	39	-6					28	9	6		58			24
Segura	-5	-27	5				-9	-12	-10		2			-7	29	-5					20	0	-2		35			11
Júcar	7	-16	8				0	4	-3		11			4	24	-8					12	19	5		28			18
Ebro	12	-24	19				2	18	-3		15			10	20	-28					7	20	-11		22			10
Ci Cataluña	-6	-33	2				-12	-9	-23		-1			-11	-12	-47					-18	-20	-43		-5			-23
Islas Baleares	6	-13	-8				-5	-1	-7		-31			-13	8	-36					-12	-3	-35		-31			-23
Canarias	2	-6	10				2	-1	8		13			7	5	-8					3	0	6		21			9

Tabla 31. Δ PRE anual (%) (izda) y Δ ESC anual (%) (dcha) por D.H. Periodo 2011-2040 respecto a 1961-1990 (superior); 1940-2005 (media); 1980-2005 (inferior). Invierno

	Escenario de Emisiones A2												Escenario de Emisiones B2															
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med
España	3	9	-19				-3	-2	11		-18			-4	-9	-11					-14	-10	-10		-17			-13
Cantábrico	-12	19	-15				-4	-7	20		-16			-3	-16	5					-12	-12	3		-19			-11
Galicia-Costa	-10	2	-25				-12	-3	8		-25			-8	-9	-13					-17	-2	-9		-24			-13
Ci País Vasco	-11	20	-7				-1	-7	18		-11			-1	-13	7					-5	-9	4		-12			-6
Miño-Sil	-6	2	-23				-11	-1	6		-22			-8	-8	-14					-15	-2	-14		-20			-12
Duero	4	1	-22				-7	0	2		-21			-7	-13	-20					-17	-13	-22		-13			-15
Tajo	6	10	-24				-4	2	12		-23			-5	-7	-7					-15	-12	-13		-15			-13
Guadiana	6	18	-25				-3	-2	20		-23			-4	-14	0					-20	-12	-4		-1			-7
Guadalquivir	3	22	-22				-1	-6	27		-17			-1	-14	-14					-15	-21	-12		4			-10
Ci Andalucía	4	42	-21				4	-7	54		-16			3	-6	6					-8	-17	14		-8			-7
Segura	11	41	-12				10	-13	41		-6			3	-2	-16					-8	-26	-10		6			-10
Júcar	9	22	-12				4	-9	21		-13			-3	-1	-10					-9	-25	-4		-9			-13
Ebro	10	-2	-14				-2	2	1		-15			-4	-4	-21					-14	-11	-17		-16			-14
Ci Cataluña	9	-5	-12				-3	4	-5		-14			-5	7	-20					-13	-5	-19		-26			-17
Islas Baleares	-1	30	-17				2	-13	22		-18			-5	-7	23					-4	-29	6		-18			-16
Canarias	-1	67	-9				12	-13	93		-17			10	-2	-23					-12	-14	-17		-28			-19



10-2005	Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2						Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2								
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB
España	-11	-29	-15				-20	-15	-36	-21			-26	-10	-40	-12			-21	-15	-41	-15			-24		
Cantábrico	-9	-45	-14				-28	-13	-44	-15			-29	-14	-52	-22			-29	-15	-50	-26			-30		
Galicia-Costa	-29	-68	-35				-54	-25	-64	-30			-51	-19	-69	-19			-36	-12	-66	-21			-33		
Ci País Vasco	-4	-37	-6				-19	-9	-36	-7			-21	-9	-33	-13			-18	-8	-31	-21			-20		
Miño-Sil	-28	-66	-33				-51	-26	-65	-29			-49	-14	-63	-17			-31	-9	-60	-16			-29		
Duero	-16	-41	-28				-30	-20	-47	-34			-35	-11	-44	-8			-21	-15	-44	-6			-22		
Tajo	-14	-37	-26				-27	-18	-45	-32			-34	-15	-60	-14			-30	-22	-65	-7			-31		
Guadiana	-14	-34	-23				-26	-17	-47	-29			-35	-3	-58	-8			-23	-8	-64	-1			-24		
Guadalquivir	-12	-37	-21				-26	-19	-46	-30			-35	-10	-43	-9			-21	-18	-45	-4			-22		
Ci Andalucía	-22	-47	-34				-38	-30	-57	-41			-47	-8	-48	-22			-26	-20	-54	-27			-34		
Segura	-2	5	-5				0	-6	-15	-11			-11	-1	-15	-5			-7	-20	-13	5			-9		
Júcar	-5	10	-4				1	-10	-5	-13			-10	-2	-4	-8			-5	-21	-9	-9			-13		
Ebro	-5	-5	-8				-6	-9	-14	-16			-13	-8	-13	-10			-11	-14	-18	-16			-16		
Ci Cataluña	-4	18	-3				4	-11	11	-12			-4	2	30	0			11	-13	24	-13			-1		
Islas Baleares	-10	-11	-11				-11	-16	-21	-18			-19	-34	-46	-36			-39	-40	-52	-45			-46		
Canarias	-15	-54	3				-28	-26	-54	-3			-32	-20	-34	-11			-22	-33	-27	-24			-28		

10-2005	Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2						Escenario de Emisiones A2						Escenario de Emisiones B2								
	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB	Med	CA	EA	HA	SA	UA	PA	Med	CB	EB	HB	SB	UB	PB
España	-7	-27	-12				-17	-11	-34	-18			-23	-1	-33	-2			-12	-5	-34	-5			-15		
Cantábrico	-4	-42	-10				-24	-9	-41	-11			-25	-5	-47	-14			-22	-6	-46	-19			-24		
Galicia-Costa	-27	-67	-33				-53	-23	-63	-27			-49	-14	-68	-15			-32	-6	-64	-16			-29		
Ci País Vasco	3	-32	1				-13	-2	-31	0			-15	-1	-27	-5			-11	0	-25	-14			-13		
Miño-Sil	-30	-67	-35				-52	-28	-66	-31			-50	-10	-61	-13			-28	-5	-58	-12			-25		
Duero	-17	-41	-29				-30	-20	-47	-35			-36	0	-37	2			-12	-5	-38	5			-13		
Tajo	-6	-31	-19				-21	-10	-46	-26			-28	-7	-50	9			-12	-2	-56	17			-14		
Guadiana	-8	-30	-18				-21	-12	-44	-25			-31	22	-46	17			-2	16	-55	26			-4		
Guadalquivir	-7	-33	-16				-22	-14	-43	-26			-31	13	-29	13			-1	2	-31	20			-3		
Ci Andalucía	-18	-45	-31				-35	-26	-55	-38			-44	11	-37	-6			-11	-4	-44	-12			-20		
Segura	0	6	-4				1	-5	-14	-10			-10	9	-7	4			2	-12	-5	14			-1		
Júcar	0	15	1				5	-6	-1	-9			-5	8	6	1			5	-12	1	11			-4		
Ebro	-1	-1	-3				-1	-5	-10	-12			-9	2	-4	-1			-1	-5	-9	-7			-7		
Ci Cataluña	-1	22	1				8	-9	14	-9			-1	15	47	13			25	-2	40	-2			12		
Islas Baleares	-5	-6	-5				-5	-11	-16	-13			-13	-7	-23	-9			-13	-16	-32	-22			-23		
Canarias	-1	-46	20				-16	-13	-46	13			-21	-14	-29	-4			-16	-28	-22	-19			-23		

Tabla 33. Δ PRE anual (%) (izda) y Δ ESC anual (%) (dcha) por D.H. Periodo 2011-2040 respecto a 1961-1990 (superior); 1940-2005 (media); 1980-2005 (inferior). Verano

### 6.5.5 Validación del método directo frente a la transformación delta

Tal como se expuso en el apartado 4.1, las PRE proyectadas para el periodo de control difieren de las observadas. Debido a que la generación de ESC es un proceso no lineal dependiente del valor de PRE, se planteó la posibilidad de utilizar el modelo hidrológico introduciendo directamente las PRE y temperaturas proyectadas o introduciendo unas PRE y temperaturas transformadas según el método delta (Hay et al, 2002; Leander et al, 2006; Akhtar et al, 2008) para corregir los sesgos de las variables (corrección del sesgo con un coeficiente de proporcionalidad entre los datos observados y los proporcionados en las proyecciones). Se ha optado, tal como se comenta en el capítulo de metodología, por utilizar el método directo utilizando el modelo hidrológico de SIMPA con las proyecciones climáticas sin transformar. De ese modo, el impacto del cambio climático se ha expresado como variaciones de recursos hídricos calculados para los periodos del siglo XXI con respecto a 1961-1990.

Con objeto de validar el método directo, se han comparado las desviaciones de ESC que darían el método directo y el método transformado delta utilizando en ambos casos la ley de Schreiber-Budyko (Arona, 2002). Esta ley es un modelo simplificado que estima la ESC en función de la PRE y de la ETP:

$$ESC = PRE \cdot e^{-\frac{ETP}{PRE}}$$

El modelo de Schreiber-Budyko es aplicable en la estimación de valores medios en periodos temporales dilatados y territorios suficientemente extensos de manera que se desprecian los términos de almacenamiento en la ecuación de balance hídrico. A diferencia del modelo de SIMPA, el modelo de Schreiber-Budyko no contempla la variabilidad estacional ni las disponibilidades de agua en el suelo para la evapotranspiración.

El modelo de Schreiber-Budyko se ha aplicado en diferentes estudios de impacto del cambio climático en los recursos hídricos (Gardner, 2009). En España, ya fue utilizado en el LBAE (MIMAM, 2000a) para hacer una primera evaluación del impacto del cambio climático en los

recursos hídricos y, anteriormente, en un análisis experimental realizado en cuencas españolas de distintas características climáticas e hidrológicas (Estrela et al., 1995).

Primeramente, se han comparado las ESC obtenidas con SIMPA en este informe con las que resultan de aplicar el modelo de Schreiber-Budyko, utilizando en ambos casos el método directo. Las figuras siguientes revelan las diferencias en términos absolutos (mm/año) y desviaciones (%) entre las ESC obtenidas mediante SIMPA y la formulación simplificada de Schreiber-Budyko.

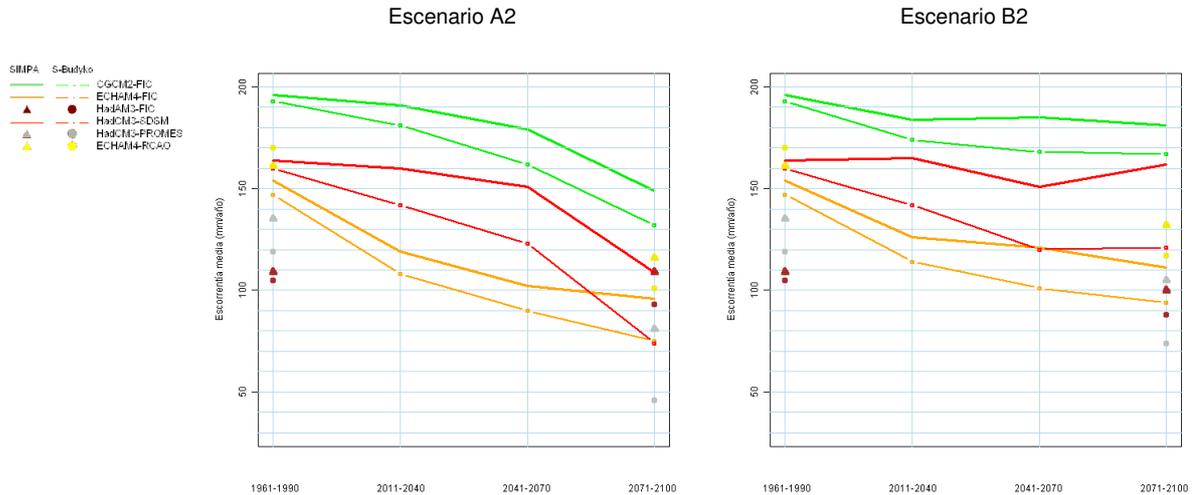


Figura 152. Descenso de ESC (mm) en España según SIMPA y Schreiber-Budyko

	$\Delta$ (%)	Escenario A2						Escenario B2					
		CGCM2-FIC-A2	ECHAM4-FIC-A2	HadAM3-FIC-A2	HadCM3-SDSM-A2	HadCM3-PROMES-A2	ECHAM4-RCAO-A2	CGCM2-FIC-B2	ECHAM4-FIC-B2	HadAM3-FIC-B2	HadCM3-SDSM-B2	HadCM3-PROMES-B2	ECHAM4-RCAO-B2
SIMPA	2011-40	-3	-22		-2			-6	-18		1		
	2041-70	-9	-34		-8			-5	-21		-8		
	2071-00	-24	-37	0	-34	-28	-40	-7	-28	-8	-1	-18	-22
Budyko	2011-40	-7	-26		-11			-10	-22		-11		
	2041-70	-16	-39		-23			-13	-31		-25		
	2071-00	-32	-49	-12	-54	-40	-61	-13	-36	-16	-24	-31	-38
Dif $\Delta$ %	2011-40	4	4		9			4	4		12		
	2041-70	8	5		15			8	9		17		
	2071-00	8	11	12	20	13	22	6	9	8	23	14	16

Tabla 34.  $\Delta$  (%) obtenidas mediante SIMPA y Schreiber-Budyko

El modelo de Schreiber Budyko estima menores ESC que el modelo de SIMPA. Esto es debido a que en las proyecciones del s. XXI se alcanzan altas tasas de ETP durante los meses secos, en los que no hay disponibilidad de agua en el suelo. El modelo de SIMPA realiza balances mensuales por lo que evalúa la disponibilidad de agua en el suelo y no aumenta las tasas de ETR cuando no hay disponibilidad de agua en el suelo. Sin embargo, el modelo de Schreiber-Budyko traslada la subida de ETP al año completo, aumentando la ETR y detrayendo esas cantidades de la ESC en función de la expresión exponencial de su fórmula. Consecuentemente, se comprueba que la formulación de Schreiber-Budyko infravalora la ESC sistemáticamente.

El términos de desviación porcentual respecto a los valores de ESC del periodo de control, 1961-1990, se comprueba que, en todos los casos (proyecciones y periodos), se obtienen mayores desviaciones en España con el modelo simplificado de Schreiber-Budyko que con

la aplicación del modelo mensual. La mayoría de las diferencias de desviaciones se mantienen por debajo del 10%. Durante el periodo 2011-2040 las diferencias de las desviaciones llegan, en el caso de HadCM3-SDSM-B2, al 12%. En el último periodo del siglo XXI, 2071-2100, se sobrepasa el 20% en tres proyecciones. Las mayores desviaciones obtenidas con Schreiber-Budyko son consecuencia del fuerte incremento de ETP en las proyecciones futuras.

Una vez analizadas sus limitaciones, se exponen los resultados de utilizar el modelo simplificado de Schreiber-Budyko para evaluar las diferencias de ESC entre ambas opciones, método directo o transformada delta. Para ello, se han obtenido valores de ESC anual para cada uno de los 4 periodos de estudio y para cada proyección climática según los dos métodos. Los resultados se desagregan por DD.HH. para distinguir cuencas de régimen húmedo y seco.

Las desviaciones de ESC obtenidas por el modelo de Schreiber-Budyko con el método directo son similares a las obtenidas con el método delta. En cuencas de escasa ESC, como por ejemplo las cuencas del Segura y Canarias, las diferencias porcentuales parecen más importantes. Se debe a que aunque las diferencias absolutas sean de escasos mm, resultan de un orden de magnitud comparable a la ESC total. Para apreciar este efecto, las tablas siguientes muestran diferencias porcentuales y diferencias absolutas.

Proyección	Escorrentías por Budyko. Diferencias en %												Escorrentías por Budyko. Diferencias absolutas (mm)												
	CA		EA		SA		CB		EB		SB		CA		EA		SA		CB		EB		SB		
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	
Opciones																									
2011-2040	Cantábrico	-8	-8	-22	-22	-13	-13	-7	-7	-16	-15	-12	-12	-54	-58	-155	-155	-88	-94	-45	-50	-116	-109	-77	-82
	Galicia-Costa	-5	-5	-25	-24	-6	-6	0	0	-17	-15	-7	-7	-53	-45	-220	-213	-54	-52	5	2	-148	-135	-62	-59
	CI País Vasco	-5	-6	-16	-17	-11	-11	-4	-5	-12	-12	-11	-11	-41	-45	-140	-126	-79	-79	-33	-37	-103	-87	-78	-79
	Miño-Sil	-5	-6	-28	-27	-6	-6	-3	-3	-21	-19	-5	-5	-46	-41	-171	-187	-40	-40	-23	-21	-127	-130	-33	-33
	Duero	-10	-10	-36	-35	-15	-15	-14	-14	-32	-31	-15	-15	-17	-16	-36	-55	-18	-23	-24	-22	-33	-48	-18	-23
	Tajo	-10	-10	-41	-37	-13	-13	-20	-20	-41	-37	-12	-12	-13	-14	-29	-54	-13	-18	-26	-28	-29	-54	-12	-17
	Guadiana	-17	-16	-52	-49	-19	-18	-29	-28	-53	-50	-15	-15	-9	-12	-14	-37	-7	-13	-15	-21	-14	-37	-6	-11
	Guadalquivir	-14	-11	-52	-48	-15	-13	-35	-33	-53	-48	-9	-9	-7	-11	-18	-49	-7	-13	-18	-33	-18	-48	-4	-9
	CI Andalucía	-14	-11	-52	-48	-13	-13	-30	-29	-52	-49	-11	-11	-6	-11	-17	-50	-4	-14	-12	-30	-17	-51	-4	-12
	Segura	-9	-2	-32	-27	-10	-14	-26	-36	-33	-31	-3	-7	-2	-1	-5	-10	-2	-5	-5	-13	-6	-11	-1	-3
	Júcar	1	2	-10	-9	-10	-12	-24	-28	-21	-20	-15	-16	0	2	-4	-8	-7	-10	-12	-24	-9	-17	-11	-14
	Ebro	-3	-3	-21	-20	-13	-13	-9	-10	-17	-16	-15	-15	-5	-6	-33	-41	-21	-27	-18	-20	-27	-33	-24	-32
	CI Cataluña	2	3	-4	-4	-8	-8	-11	-11	-6	-5	-15	-15	4	6	-7	-8	-14	-16	-19	-23	-9	-11	-27	-32
	Islas Baleares	-15	-11	-23	-20	-8	-8	-33	-30	-33	-30	-16	-15	-5	-10	-13	-17	-6	-7	-11	-25	-18	-26	-13	-13
	Canarias	-13	-11	-40	-45	-6	-9	-16	-18	-35	-39	-16	-29	-2	-3	-6	-14	-1	-3	-2	-6	-5	-12	-2	-9
ESPAÑA	-7	-7	-26	-27	-11	-12	-10	-12	-22	-24	-11	-12	-13	-13	-38	-54	-18	-23	-19	-24	-32	-47	-18	-23	

Tabla 35. Método directo y transformación delta.  $\Delta$  ESC anual (%) por Schreiber-Budyko. Periodo 2011-2040

Proyección	Escorrentías por Budyko. Diferencias en %												Escorrentías por Budyko. Diferencias absolutas (mm)												
	CA		EA		SA		CB		EB		SB		CA		EA		SA		CB		EB		SB		
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	
Opciones																									
2041-2070	Cantábrico	-8	-8	-31	-31	-25	-24	-9	-9	-26	-25	-27	-26	-57	-59	-220	-220	-162	-172	-61	-65	-183	-177	-175	-186
	Galicia-Costa	-10	-11	-39	-39	-13	-14	-9	-10	-28	-26	-12	-12	-109	-92	-353	-341	-126	-120	-100	-83	-247	-230	-108	-103
	CI País Vasco	-3	-4	-23	-24	-23	-22	-6	-6	-20	-20	-26	-26	-25	-28	-195	-176	-168	-168	-44	-46	-170	-149	-192	-193
	Miño-Sil	-13	-14	-45	-44	-13	-13	-10	-11	-32	-30	-13	-13	-113	-99	-278	-305	-87	-87	-85	-75	-198	-208	-88	-88
	Duero	-24	-25	-53	-52	-25	-26	-19	-20	-42	-40	-29	-29	-43	-40	-53	-81	-31	-40	-34	-31	-43	-63	-35	-46
	Tajo	-30	-30	-58	-55	-28	-27	-21	-21	-46	-42	-31	-31	-40	-43	-41	-80	-28	-40	-28	-30	-32	-61	-31	-45
	Guadiana	-42	-41	-68	-68	-42	-41	-30	-28	-56	-53	-42	-42	-22	-30	-18	-51	-16	-31	-16	-21	-15	-40	-16	-32
	Guadalquivir	-41	-37	-69	-67	-43	-42	-26	-23	-57	-52	-43	-42	-21	-37	-24	-67	-19	-42	-14	-24	-20	-52	-19	-42
	CI Andalucía	-39	-35	-67	-65	-44	-45	-26	-23	-54	-50	-40	-41	-16	-37	-22	-68	-15	-47	-10	-24	-17	-52	-14	-43
	Segura	-26	-28	-48	-45	-27	-33	-18	-19	-43	-42	-28	-34	-5	-10	-8	-16	-6	-12	-4	-7	-7	-15	-6	-12
	Júcar	-18	-18	-23	-22	-30	-31	-15	-15	-23	-23	-29	-31	-9	-15	-10	-19	-21	-27	-8	-13	-10	-20	-21	-27
	Ebro	-11	-12	-29	-28	-27	-27	-9	-10	-25	-24	-31	-31	-23	-24	-47	-58	-42	-55	-19	-20	-40	-49	-49	-65
	CI Cataluña	-8	-7	-7	-7	-18	-19	-8	-8	-8	-8	-25	-26	-13	-15	-12	-15	-32	-39	-14	-16	-13	-17	-46	-54
	Islas Baleares	-24	-20	-43	-39	-26	-25	-22	-18	-38	-35	-38	-37	-8	-17	-24	-34	-20	-22	-7	-15	-21	-30	-30	-32
	Canarias	-22	-22	-45	-53	-24	-47	-16	-16	-43	-47	-21	-39	-3	-7	-7	-16	-3	-14	-2	-5	-6	-15	-3	-12
ESPAÑA	-16	-18	-39	-41	-23	-25	-13	-14	-31	-32	-25	-27	-32	-35	-57	-80	-37	-49	-25	-28	-45	-62	-40	-53	

Tabla 36. Método directo y transformación delta.  $\Delta$  ESC anual (%) por Schreiber-Budyko. Periodo 2041-2070

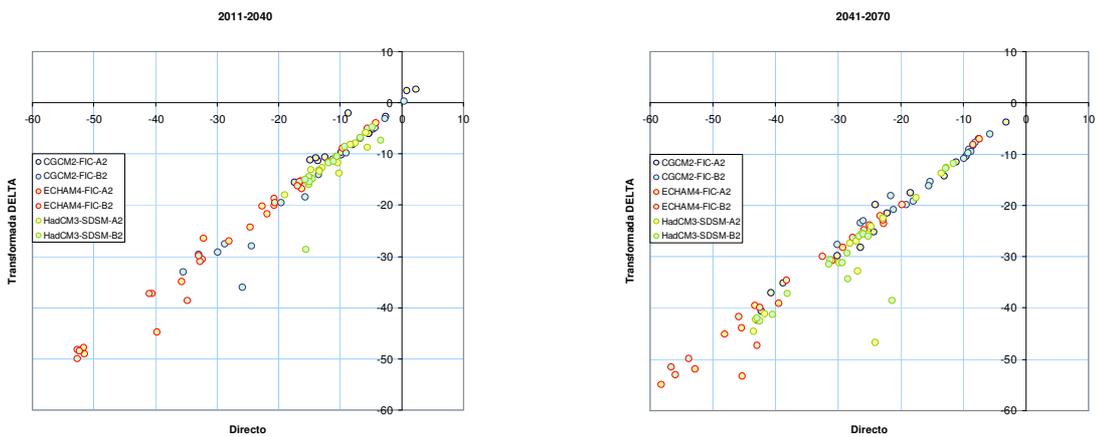
Proyección	Escorrentías por Budyko. Diferencias en %										Escorrentías por Budyko. Diferencias absolutas (mm)													
	CA		EA		HA		SA		UA		PA		CA		EA		HA		SA		UA		PA	
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
Opciones																								
2071-2100																								
Cantábrico	-19	-18	-46	-46	-8	-6	-51	-50	-36	-34	-61	-57	-125	-130	-329	-330	-39	-45	-332	-354	-186	-245	-301	-409
Galicia-Costa	-26	-28	-48	-48	-2	0	-38	-39	-26	-25	-51	-44	-294	-242	-432	-418	-12	-4	-356	-337	-192	-222	-238	-386
CI País Vasco	-10	-11	-38	-40	-11	-10	-45	-45	-42	-40	-64	-56	-77	-80	-332	-299	-65	-75	-334	-336	-202	-298	-215	-418
Miño-Sil	-29	-32	-55	-53	-4	-1	-41	-40	-28	-29	-57	-55	-254	-219	-334	-366	-15	-10	-278	-280	-197	-199	-333	-379
Duero	-43	-45	-61	-59	-15	-13	-62	-63	-43	-42	-72	-71	-77	-70	-61	-93	-11	-21	-77	-98	-72	-65	-96	-111
Tajo	-51	-51	-64	-60	-25	-23	-70	-69	-57	-57	-73	-73	-69	-75	-45	-87	-12	-34	-70	-101	-62	-83	-32	-107
Guadiana	-65	-65	-73	-72	-36	-38	-76	-80	-65	-72	-45	-81	-34	-49	-19	-54	-5	-28	-30	-60	-17	-54	-3	-61
Guadalquivir	-67	-65	-76	-73	-42	-42	-75	-80	-66	-74	-50	-76	-35	-66	-27	-74	-6	-42	-33	-80	-17	-75	-5	-77
CI Andalucía	-64	-63	-73	-70	-42	-46	-72	-79	-67	-73	-50	-69	-26	-66	-24	-73	-5	-48	-24	-82	-17	-76	-5	-72
Segura	-44	-41	-60	-58	-34	-35	-57	-64	-65	-63	-43	-54	-9	-15	-10	-21	-4	-13	-13	-23	-16	-23	-3	-20
Júcar	-32	-28	-33	-31	-30	-29	-62	-64	-60	-64	-57	-50	-16	-24	-14	-27	-14	-25	-44	-55	-55	-56	-15	-44
Ebro	-23	-24	-38	-36	-7	-8	-61	-61	-42	-42	-62	-63	-47	-49	-61	-75	-11	-16	-95	-125	-95	-86	-114	-130
CI Cataluña	-19	-18	-10	-10	-19	-20	-45	-47	-42	-47	-57	-50	-33	-38	-16	-21	-36	-42	-81	-97	-121	-99	-52	-104
Islas Baleares	-39	-34	-63	-59	-54	-47	-68	-67	-38	-45	-50	-54	-13	-29	-35	-50	-23	-40	-53	-57	-36	-38	-8	-46
Canarias	-37	-41	-57	-63	-14	-40	-41	-64					-5	-13	-8	-19	-1	-12	-5	-20	*	*	*	*
ESPAÑA	-32	-34	-49	-50	-11	-14	-54	-57	-40	-43	-61	-61	-62	-68	-71	-97	-12	-27	-86	-112	-70	-84	-74	-119

Tabla 37. Método directo y transformación delta.  $\Delta$  ESC anual (%) por Schreiber-Budyko. Periodo 2071-2100. Escenarios climáticos A2

Proyección	Escorrentías por Budyko. Diferencias en %												Escorrentías por Budyko. Diferencias absolutas (mm)											
	CB		EB		HB		SB		UB		PB		CB		EB		HB		SB		UB		PB	
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
Opciones																								
2071-2100																								
Cantábrico	-4	-4	-33	-33	-15	-12	-24	-23	-27	-25	-38	-36	-29	-30	-236	-236	-71	-89	-158	-167	-138	-182	-189	-256
Galicia-Costa	-7	-7	-33	-33	-7	-5	-8	-8	-18	-17	-26	-21	-76	-64	-297	-286	-37	-43	-72	-69	-132	-152	-122	-185
CI País Vasco	1	1	-26	-27	-18	-16	-23	-22	-33	-31	-45	-38	9	4	-227	-205	-109	-123	-168	-168	-156	-231	-149	-282
Miño-Sil	-9	-10	-39	-37	-10	-7	-8	-7	-19	-19	-31	-29	-77	-68	-236	-259	-35	-46	-51	-51	-132	-135	-182	-205
Duero	-21	-22	-47	-47	-16	-14	-28	-29	-35	-34	-46	-45	-37	-34	-47	-74	-11	-22	-35	-46	-59	-53	-62	-71
Tajo	-27	-27	-50	-48	-27	-23	-32	-32	-44	-44	-46	-44	-37	-40	-35	-70	-13	-34	-32	-47	-48	-64	-20	-64
Guadiana	-41	-40	-60	-60	-36	-35	-45	-46	-54	-56	-28	-52	-21	-30	-16	-45	-5	-26	-17	-34	-14	-42	-2	-39
Guadalquivir	-43	-40	-63	-62	-42	-41	-47	-48	-54	-57	-29	-49	-22	-40	-22	-62	-6	-41	-21	-48	-14	-57	-3	-49
CI Andalucía	-42	-41	-62	-60	-42	-44	-46	-50	-54	-55	-31	-46	-17	-42	-20	-63	-5	-45	-15	-52	-14	-57	-3	-48
Segura	-26	-28	-44	-44	-36	-35	-28	-38	-53	-49	-25	-27	-5	-10	-7	-16	-5	-13	-6	-14	-13	-18	-2	-10
Júcar	-18	-20	-22	-25	-32	-31	-40	-42	-52	-56	-28	-24	-9	-17	-10	-21	-15	-27	-29	-36	-47	-48	-7	-21
Ebro	-7	-7	-30	-30	-14	-13	-33	-34	-32	-32	-40	-41	-14	-15	-48	-63	-21	-27	-52	-69	-72	-65	-74	-85
CI Cataluña	-13	-13	-7	-9	-24	-24	-28	-30	-36	-41	-33	-28	-22	-26	-11	-18	-44	-50	-51	-62	-104	-86	-31	-59
Islas Baleares	-35	-31	-46	-43	-57	-51	-42	-41	-31	-36	-31	-33	-12	-26	-26	-37	-25	-43	-33	-35	-29	-31	-5	-28
Canarias	-22	-26	-46	-51	-20	-38	-23	-54					-3	-8	-7	-16	-2	-12	-3	-16	*	*	*	*
ESPAÑA	-13	-16	-36	-38	-16	-17	-24	-27	-31	-32	-38	-36	-26	-31	-53	-75	-17	-34	-38	-53	-54	-64	-45	-71

Tabla 38. Método directo y transformación delta.  $\Delta$  ESC anual (%) por Schreiber-Budyko. Periodo 2071-2100. Escenarios climáticos B2

Los gráficos de dispersión (figura siguiente) resumen la comparativa anterior. Muestran ajustes sobre la línea de 45°, lo que confirma la similitud de los resultados de ambos métodos.



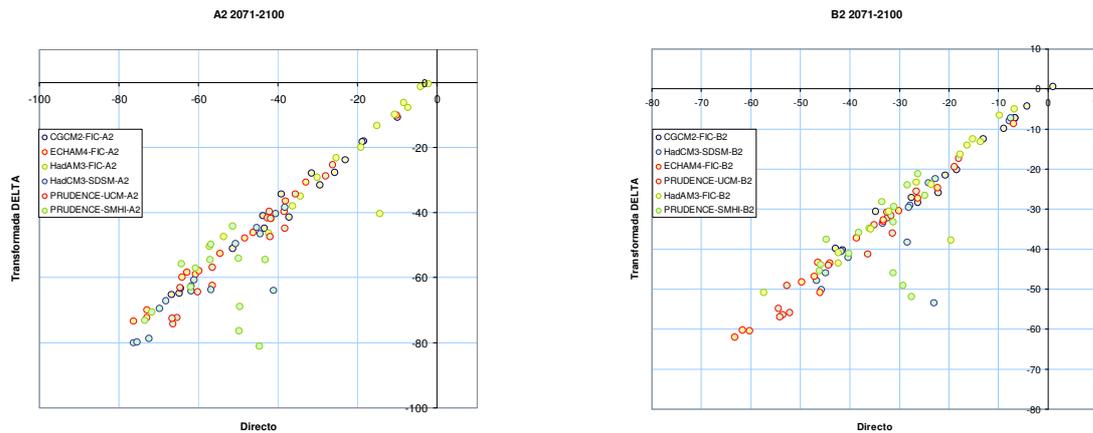


Figura 153. Método directo y transformación delta.  $\Delta$  ESC anual (%) por Schreiber-Budyko. Periodos 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100

En definitiva, aparentemente y para la mayoría de las cuencas, la escala en la que se han proporcionado los datos ya regionalizados (AEMET, 2008) conduce a resultados de desviaciones (%) similares, tanto si se aplica el método directo, como si se aplica una transformación para corrección de sesgo. Esta prueba solamente se basa en la utilización de los términos fundamentales de la ecuación de balance hídrico y en la aplicación de la fórmula simplificada de Schreiber-Budyko. Este último modelo trabaja únicamente con medias anuales, por lo que no se han comprobado las consecuencias del desajuste estacional de la PRE.

## 7 ANÁLISIS DE EVENTOS EXTREMOS

### 7.1 Análisis de precipitaciones máximas

#### 7.1.1 Metodología y objetivos

Las previsiones del VI Documento Técnico del IPCC (Bates et al, 2008) en latitudes medias similares a la que ocupa España indican como probable el aumento de la frecuencia e intensidad de los episodios de precipitación, así como una disminución de valores medios en verano. Según el documento referido, Christensen (2003), Giorgi et al (2004), Kjellström (2004) y Kundzewicz et al (2006) pronostican que a lo largo del siglo XXI habrá un aumento de la intensidad de los episodios de lluvia diaria que afectaría a áreas en las que disminuye la PRE media, como en Europa central o en el Mediterráneo. España se encuentra situada bajo el ámbito de influencia mediterránea y atlántica, lo que complica la elaboración de previsiones y el uso de los resultados de los MCGAO y regionalizaciones posteriores. Algunos autores destacan la presencia de mecanismos generadores de lluvia extrema que escapan a la escala de trabajo de los MCGAO. Sumner et al (2003) y Llasat (2001) indican que el impacto del cambio climático sobre la región mediterránea durante los veranos no es evidente, debido al fuerte componente de convectividad de la precipitación y a su gran variabilidad espacial.

El capítulo 4.2.3 se centró en el análisis cualitativo de cambios en las series de índices relacionados con extremos. En este apartado se expone la cuantificación en términos de cuantiles de PMX de cada proyección climática. Los cuantiles se han estimado en cada uno de los cuatro periodos de análisis de 30 años, 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100, y sobre los resultados de las proyecciones, en escenarios A2 y B2.

Esta cuantificación se aborda en dos fases. En primer lugar (apartado 7.1.2), se caracterizan leyes de frecuencia de PMX en las regiones consideradas por Ardiles y Ferrer (1994) (Figura 30). Para ello, a cada una de las series proyectadas en estaciones se le ha ajustado una función de distribución SQRT-ET máx y se le han calculado los cuantiles asociados a periodos de retorno entre 2 y 1000 años. Para obtener una serie de cuantiles regional, se han promediado los cuantiles de cada estación sin utilizar otro tipo de ponderación o factores reductores por simultaneidad de lluvia, ya que el interés se centra en la variación relativa de las distribuciones de frecuencia de distintos periodos en distintas regiones.

En una segunda fase (apartado 7.1.3) se ha ajustado a cada estación una ley de frecuencia que permitiera estimar el cuantil asociado al periodo de retorno de 100 años. Este cuantil se interpola y permite obtener mapas de desviaciones respecto al periodo de control. Permiten apreciar el impacto del cambio climático a escalas de mayor detalle que las distribuciones de frecuencia regionales consideradas anteriormente.

Los datos disponibles para el análisis de eventos extremos son las PMX procedentes de las estimaciones de cuatro modelos con regionalización FIC en 5.579 estaciones y SDSM en 2.320 estaciones. Las proyecciones CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM proporcionan series de PMX en distintos periodos temporales del siglo XXI (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) y en el periodo de control, 1961-1990.

La ley de frecuencias SQRT-ET máx (Etoh et al, 1987) ha sido utilizada en España para la elaboración del mapa de PMX en la España Peninsular (D.G.C., 1999) después de haber sido contrastada en diversos estudios como una de las más adecuadas para el análisis regional de eventos extremos, y concretamente de PMX (Ferrer Polo, 1992; Ferrer y Ardiles, 1994; Ferrer Polo, 1996). Actualmente se encuentra en revisión su utilización, debido a la reducida flexibilidad que supone el trabajar con únicamente dos parámetros. La función SQRT-ET máx depende de dos parámetros, escala  $\alpha$  y forma  $k$ :

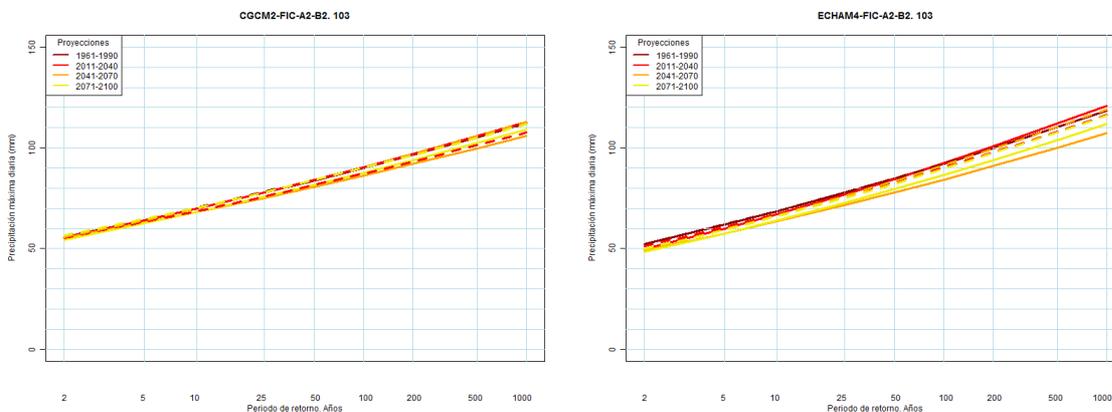
$$F(x) = e^{-k \cdot [(1 + \sqrt{\alpha \cdot x}) e^{-\sqrt{\alpha \cdot x}}]} \quad \text{donde } x \geq 0$$

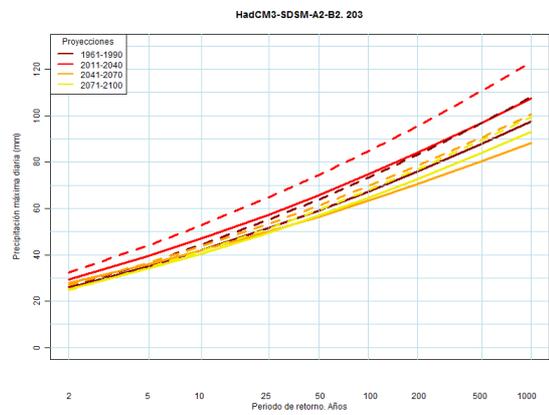
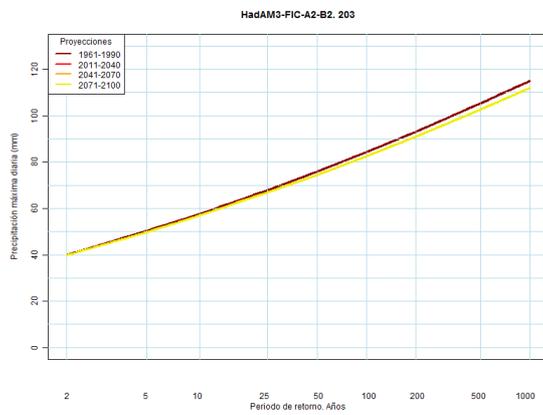
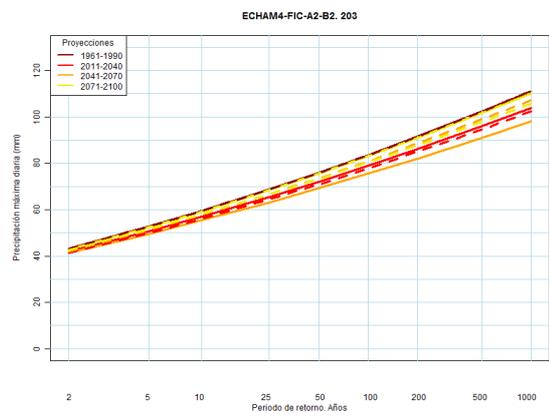
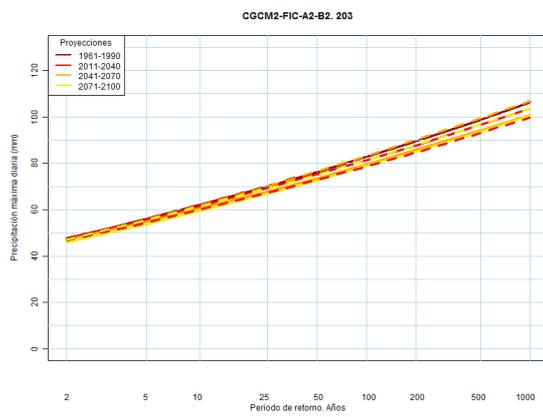
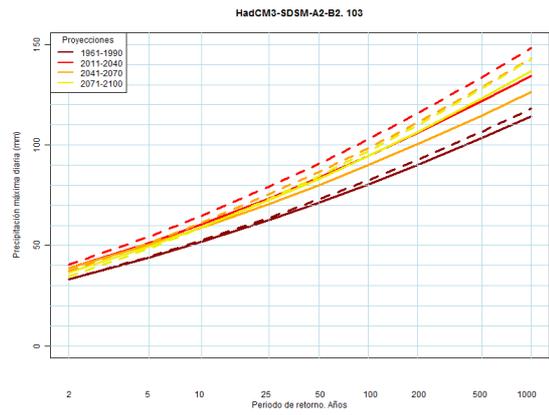
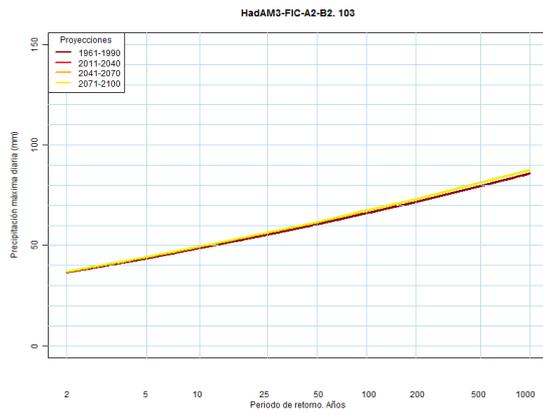
Los programas de ajuste en R utilizados proceden de Sáez (2009). El estudio se basa en la selección de las PMX de los escenarios regionalizados de cambio climático para España (AEMET, 2008). A diferencia de los estudios de Ardiles y Ferrer (1992, 1994 y 1996) no se han ajustado regionalmente los parámetros. Las PMX constituyen en sí mismas un elemento de diseño básico para la estimación de caudales máximos probables y del análisis del mecanismo generador de avenidas, desbordamientos e inundaciones. El conocimiento de la variación de la magnitud y frecuencia de la PMX proporciona un elemento de análisis del posible impacto del cambio climático en la ocurrencia de estos eventos extremos.

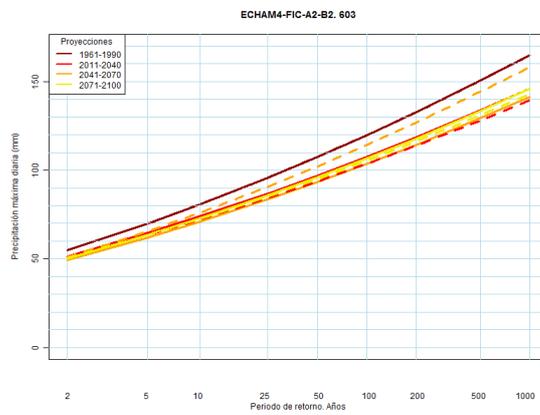
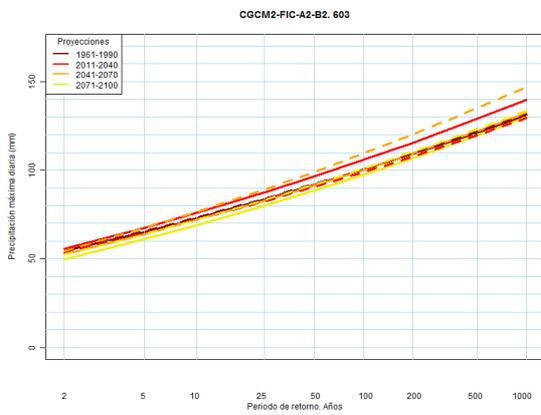
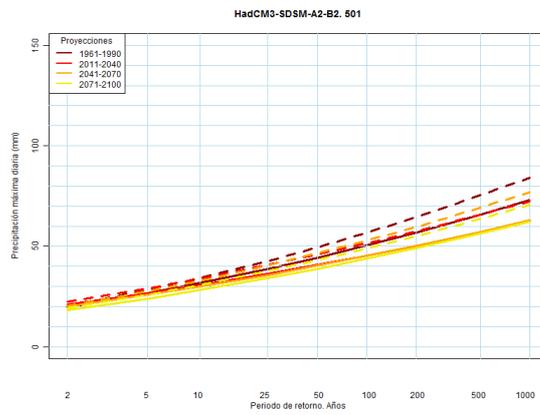
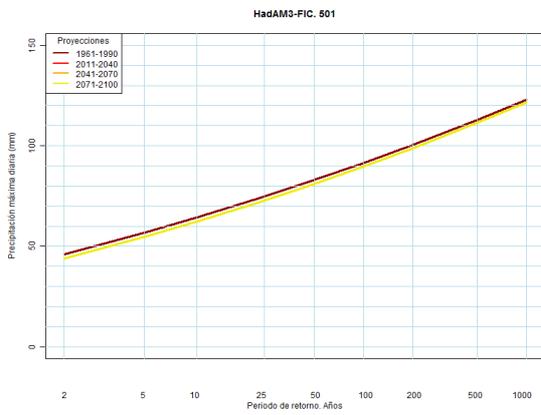
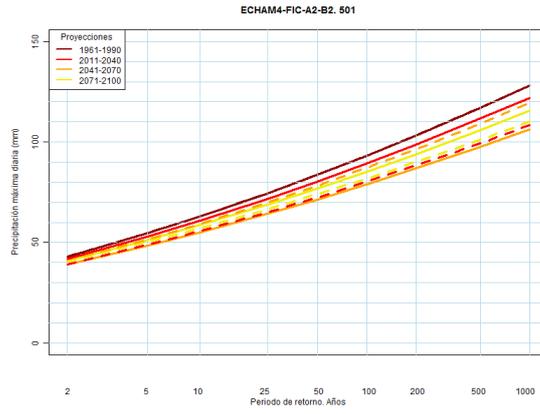
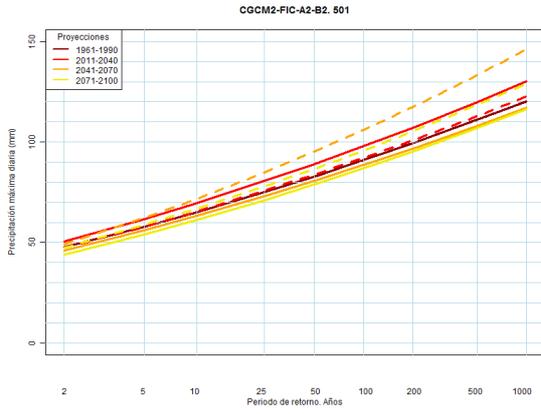
### 7.1.2 Leyes de frecuencia regional

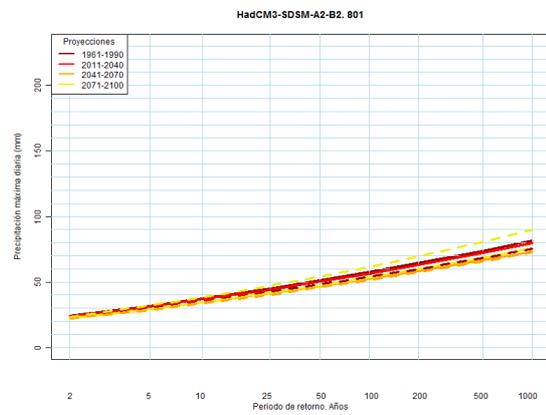
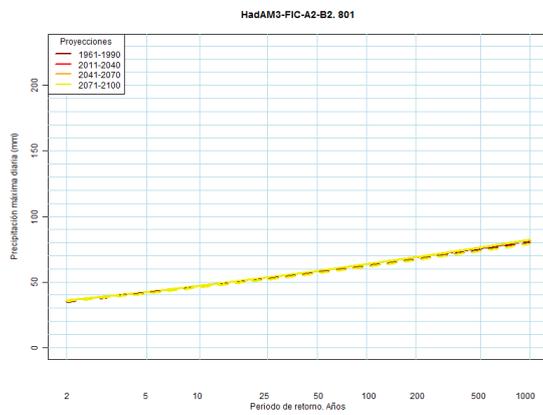
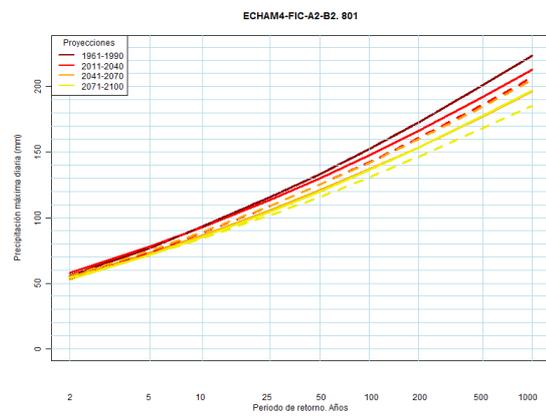
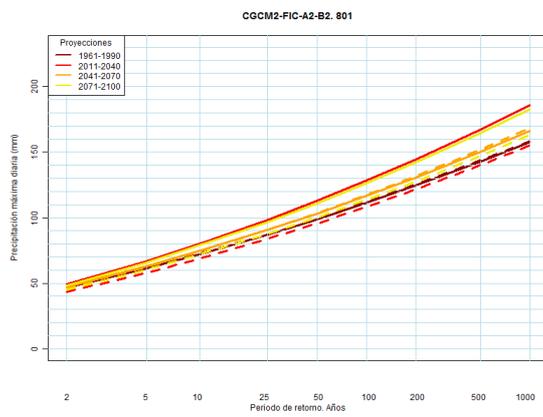
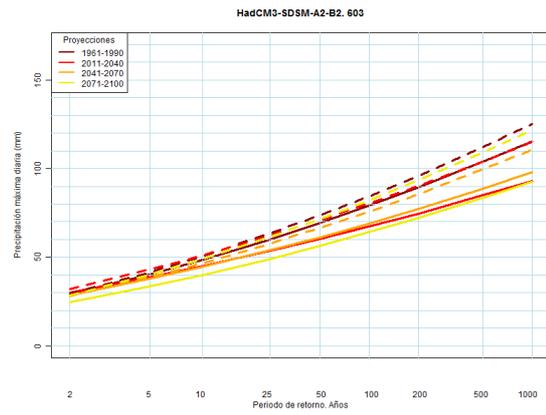
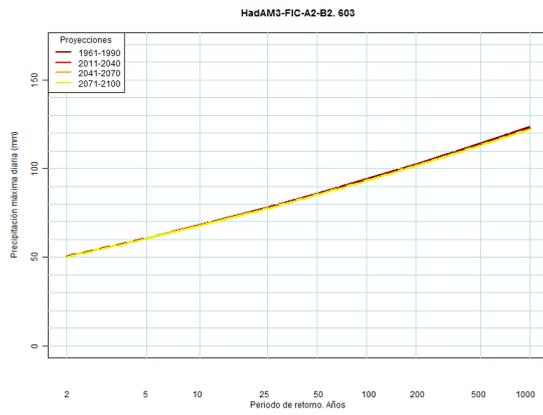
Las siguientes figuras muestran las distribuciones de frecuencia obtenidas a partir de series de cuantiles de PMX promediados regionalmente. En línea continua se representan las distribuciones de frecuencia de proyecciones en escenario A2; en discontinua, las de escenario B2. Se han distinguido los cuantiles por periodos para comprobar si hay o no aumento de las PMX. Las regiones representadas son la Cantábrica (0103), el Sistema Central (0203), la margen dcha. del Guadalquivir (0501), la atlántica sur (0603), el Levante (0801), el Pirineo central (0905) y la nororiental (1001).

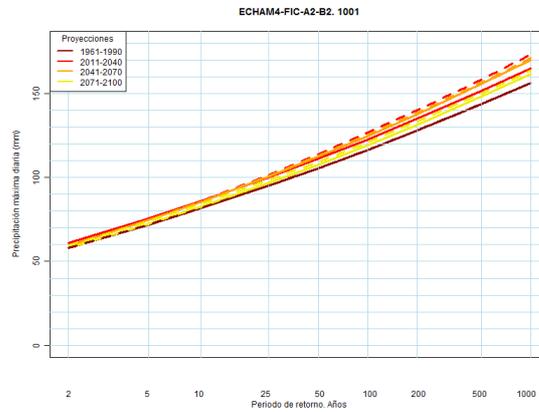
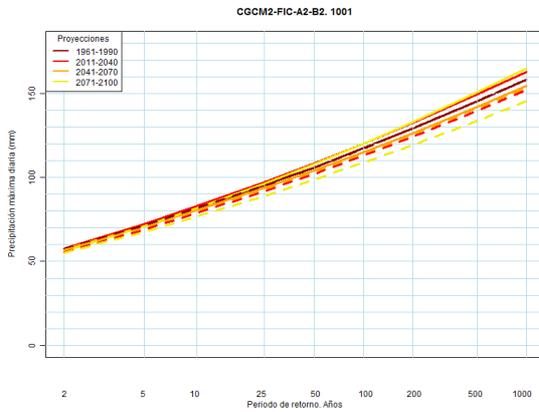
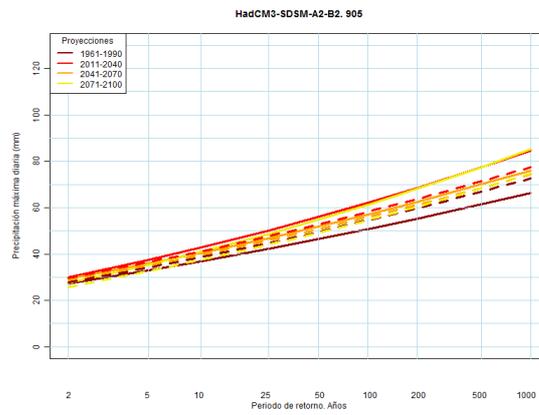
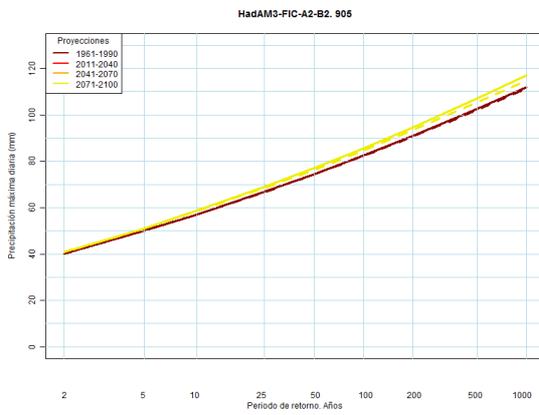
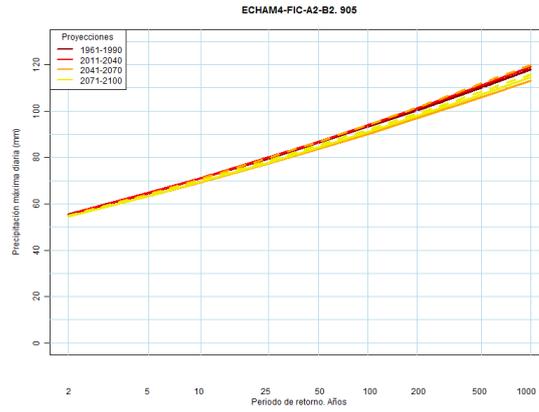
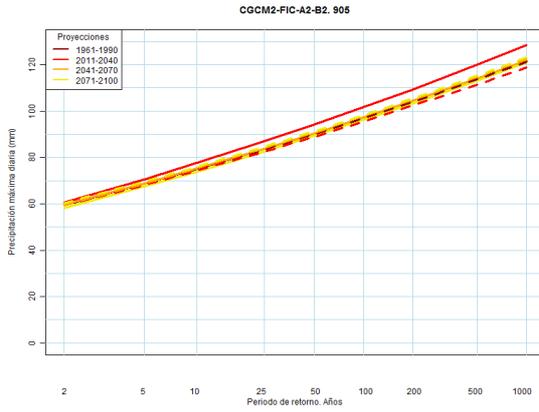
Como en el capítulo 4.2.3 se comprueba que, en contra de lo que cabría esperar, no aparece con claridad un signo evidente aumento en la magnitud o frecuencia de las lluvias máximas. Las siguientes figuras muestran la dificultad para distinguir los resultados entre periodos y escenarios, así como que las situaciones pesimistas no se dan durante el último periodo del siglo XXI ni en los escenarios A2 por lo que no siempre las medidas correctoras del escenario B2 inducirían a una disminución de la magnitud o frecuencia de los eventos extremos en los plazos de simulación disponibles.











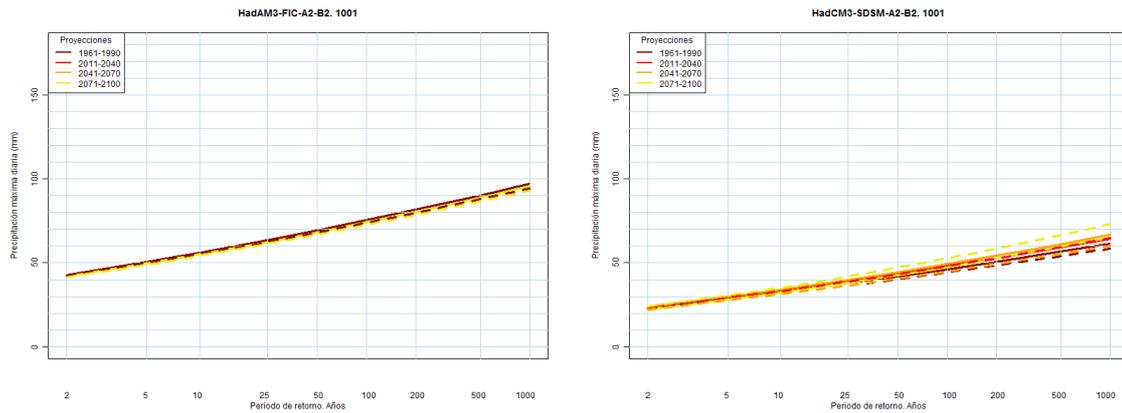
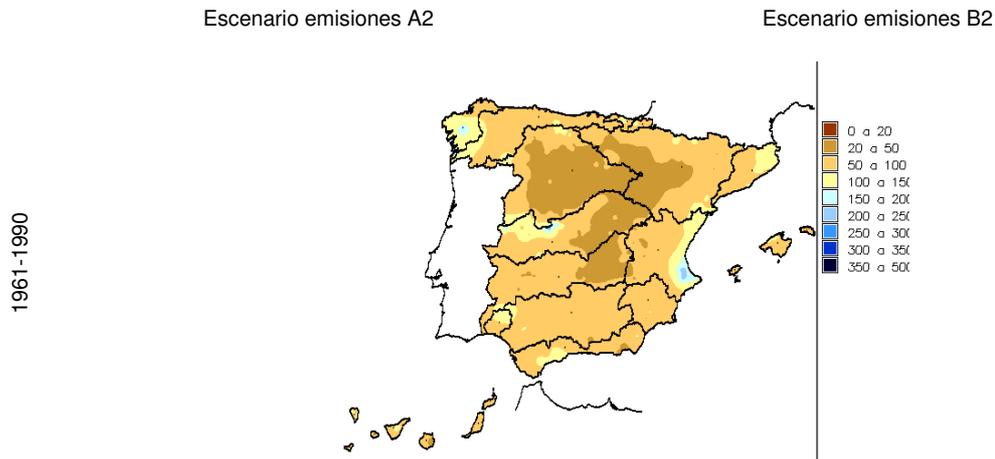


Figura 154. Distribuciones de frecuencia de PMX regional. Escenarios A2 (línea continua); B2 (línea discontinua)

Cabe señalar que HadAM3-FIC presenta una escasa variación en términos cuantitativos de los cuantiles de PMX entre los periodos considerados, mientras que las proyecciones que ofrecen mayor variabilidad son las ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM.

### 7.1.3 Mapas de precipitaciones máximas

Las figuras siguientes muestran la distribución espacial del cuantil de 100 años de periodo de retorno. Respecto al análisis anterior, la identificación de impactos no depende de la definición de regiones. Los mapas se han obtenido por interpolación de los cuantiles de cada estación. Para simplificar la exposición se ha promediado el mapa de cuantiles de las 3 ó 4 proyecciones disponibles para cada periodo. El objetivo es poder comparar los cambios respecto al periodo de referencia mediante mapas de desviaciones respecto al mapa de cuantiles estimado para el periodo de control, 1961-1990. Aparentemente no hay un cambio extendido de la PMX para un periodo de retorno de 100 años.



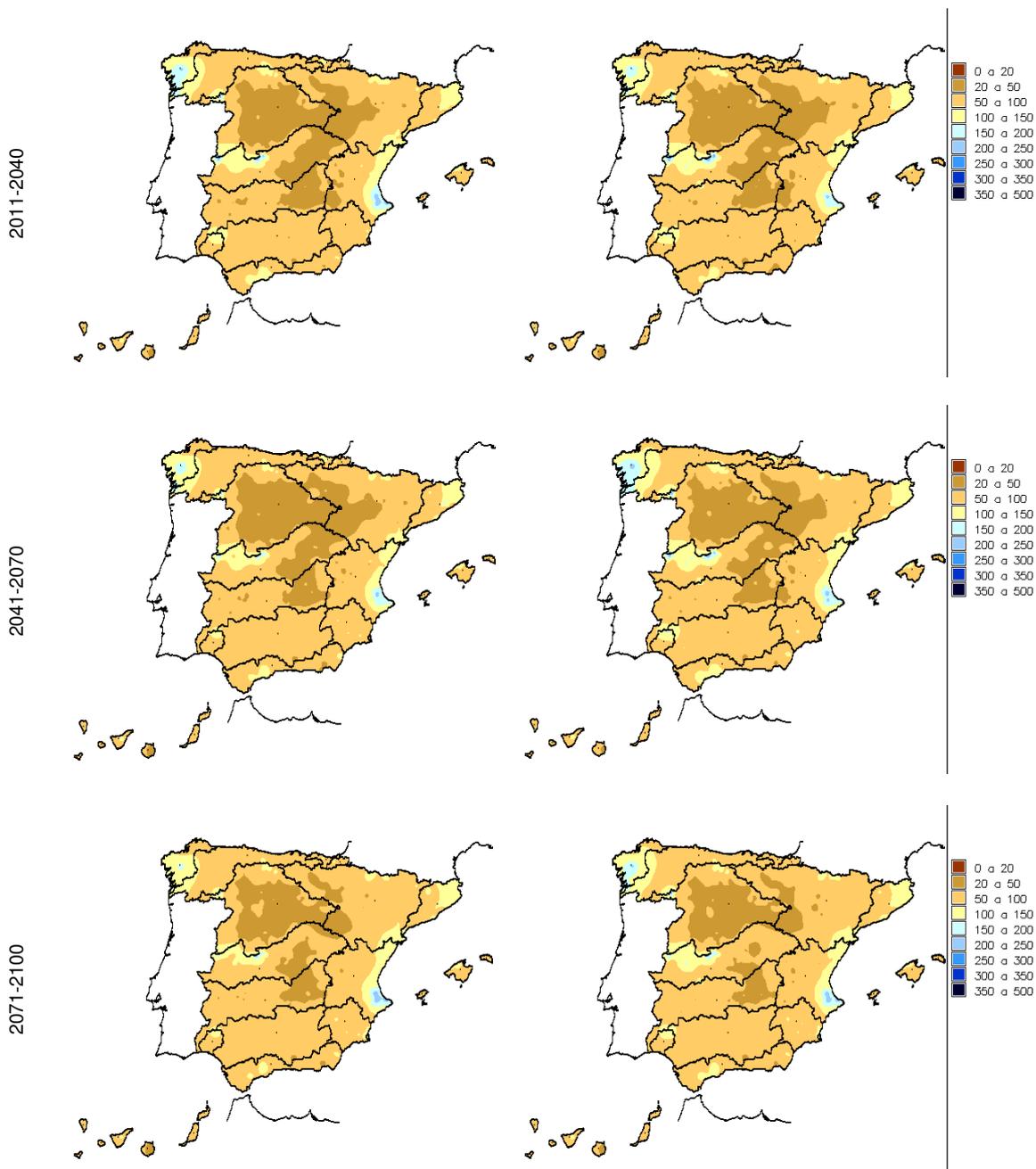


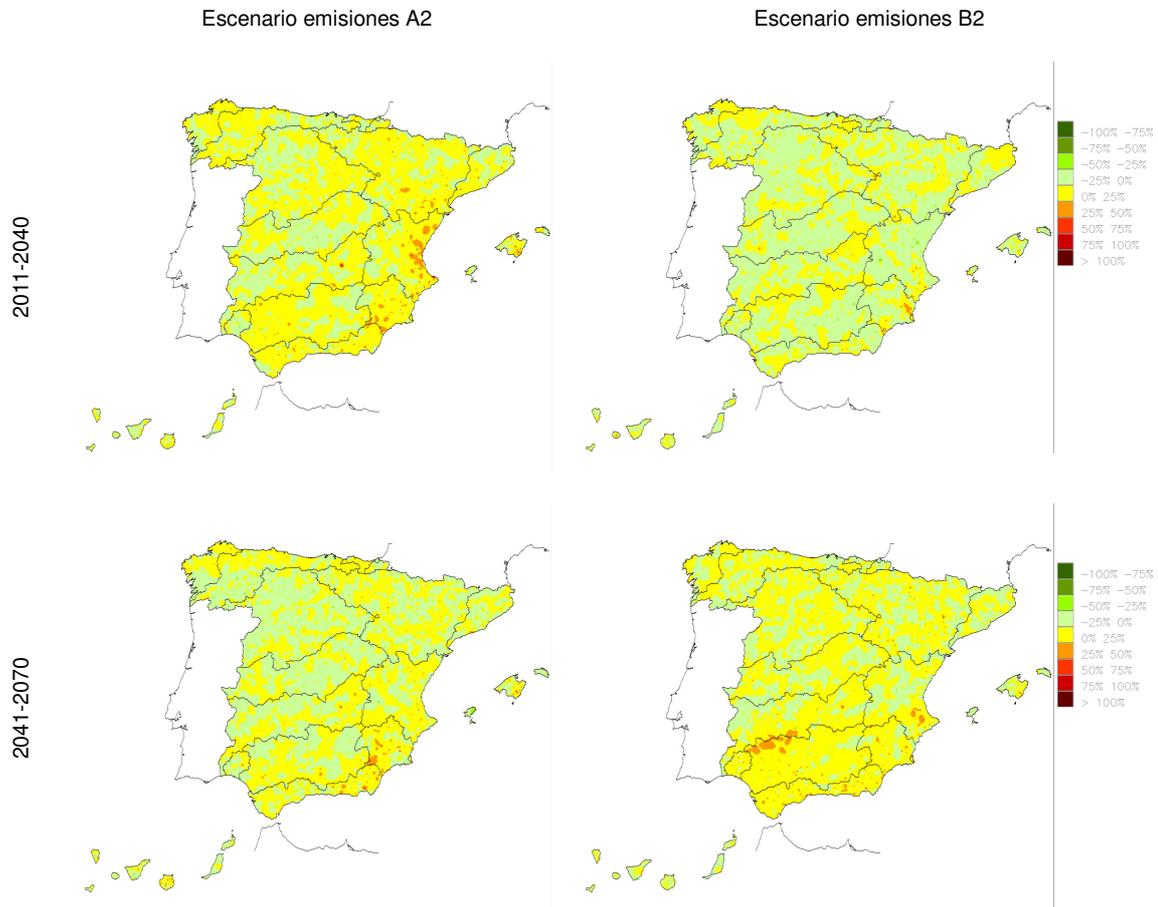
Figura 155. Mapas promedio del conjunto de proyecciones de PMX para un T de 100 años (mm)

Las figuras siguientes muestran las desviaciones de los mapas de cuantiles de periodo de retorno de 100 años respecto al correspondiente al periodo de control. Cada grupo de mapas corresponde a una proyección.

- El cuantil de 100 años de la PMX, CGCM2-FIC-A2 y periodo 2011-2040 aumenta en áreas dispersas de la costa mediterránea entre el 25 y 50%. Durante el siguiente periodo, 2041-2070, se reduce la extensión del aumento a zonas de la cuenca del Segura; finalmente, durante 2071-2100, hay aumento del cuantil de 100 años en el sureste mediterráneo y también en el valle del Ebro, área donde los cuantiles de referencia son reducidos y amplifican las desviaciones. En el escenario B2 y, predominantemente en el 2º y 3º periodo, hay áreas en las que se reducen

ligeramente los cuantiles de 100 años. En definitiva, CGCM2-FIC centra el impacto en el sureste y Levante Peninsular con suavización apreciable en el escenario B2

- En ECHAM4-FIC se observa menor variación de la PMX de 100 años de retorno. En los periodos 2011-2040 y 2041-2070 solo se aprecian puntos dispersos de aumento de PMX en las cabeceras del Tajo, Guadiana, Segura, Júcar y desembocadura del Ebro. En el periodo 2071-2100 el aumento en estas zonas es algo más evidente. Asimismo, en la cuenca del Duero parece aumentar el cuantil de PMX. Entre los escenarios no se observan diferencias apreciables
- En HadCM3-SDSM hay un claro aumento de las PMX en las cabeceras del Duero y Ebro en el periodo 2011-2040, así como en las cuencas de la submeseta norte cercanas a Portugal. En los dos últimos periodos, hay aumentos de PMX en la cuenca del Segura y cabeceras del Júcar y del Guadalquivir. En esta proyección hay diferencias notables entre los escenarios A2 y B2. En el escenario B2 los aumentos son mayores y llegan a sobrepasar en algunos puntos el 75%
- HadAM3-FIC solamente tiene series de lluvia en el último periodo del s. XXI y el impacto que muestran es el de un ligero aumento del cuantil de 100 años en la mitad norte de la Península



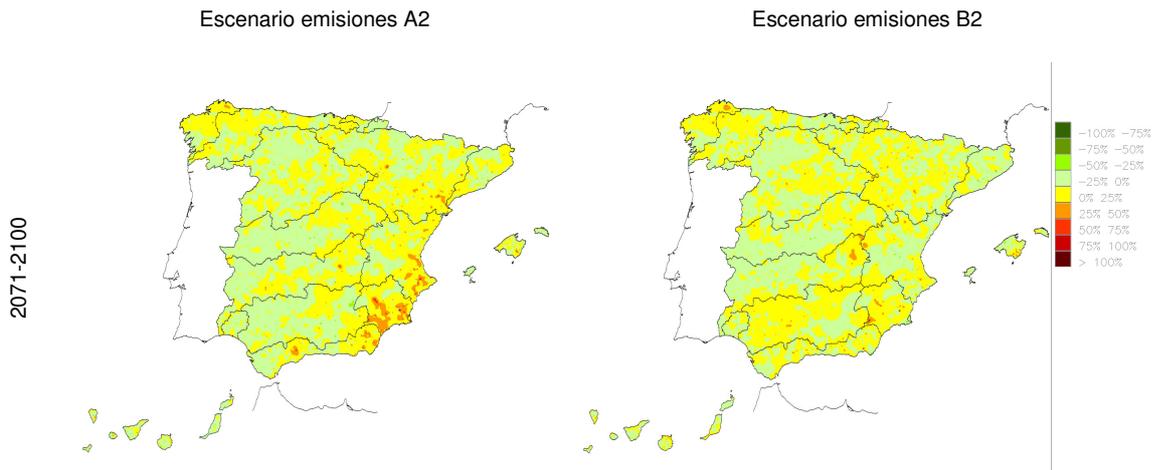
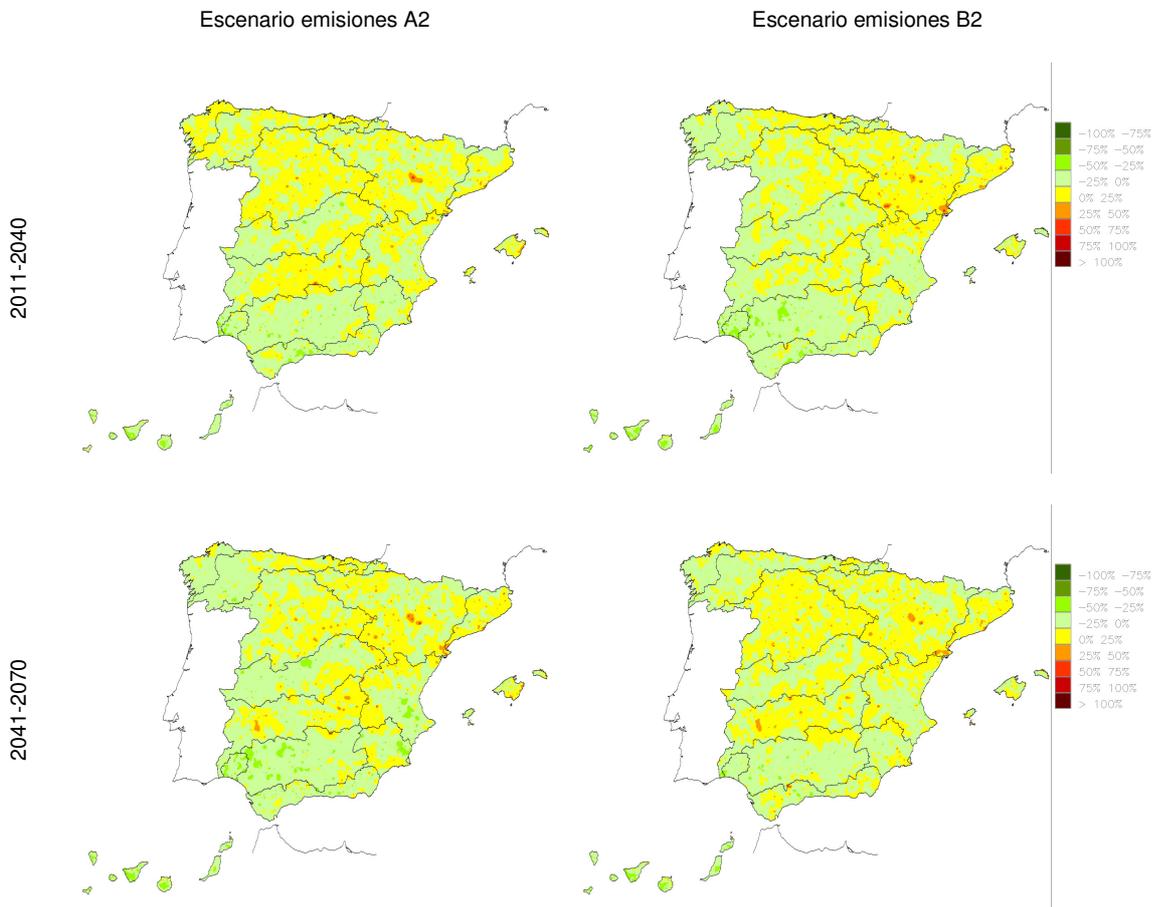


Figura 156. Mapas de  $\Delta$  (%) de los cuantiles de PMX respecto al 1961-1990 para un T 100 años. CGCM2-FIC



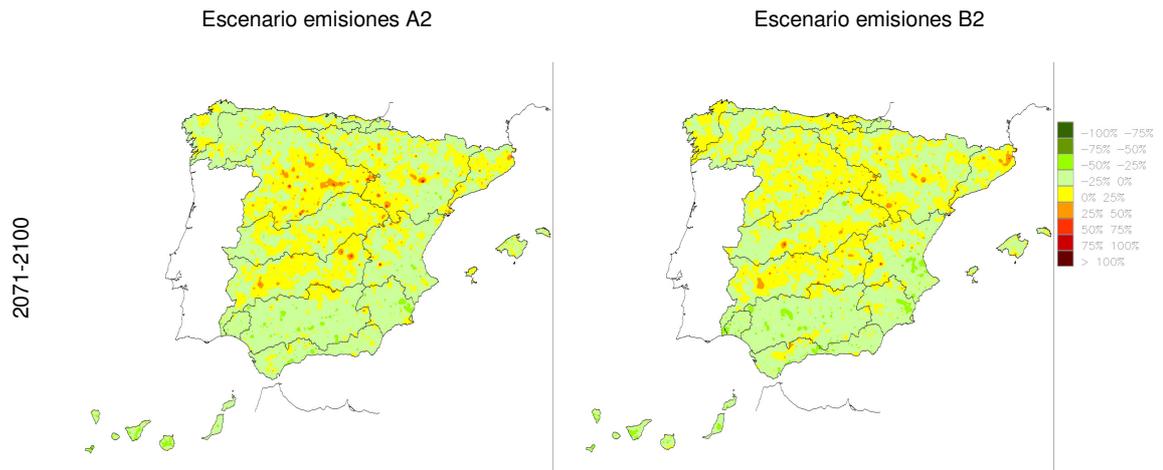
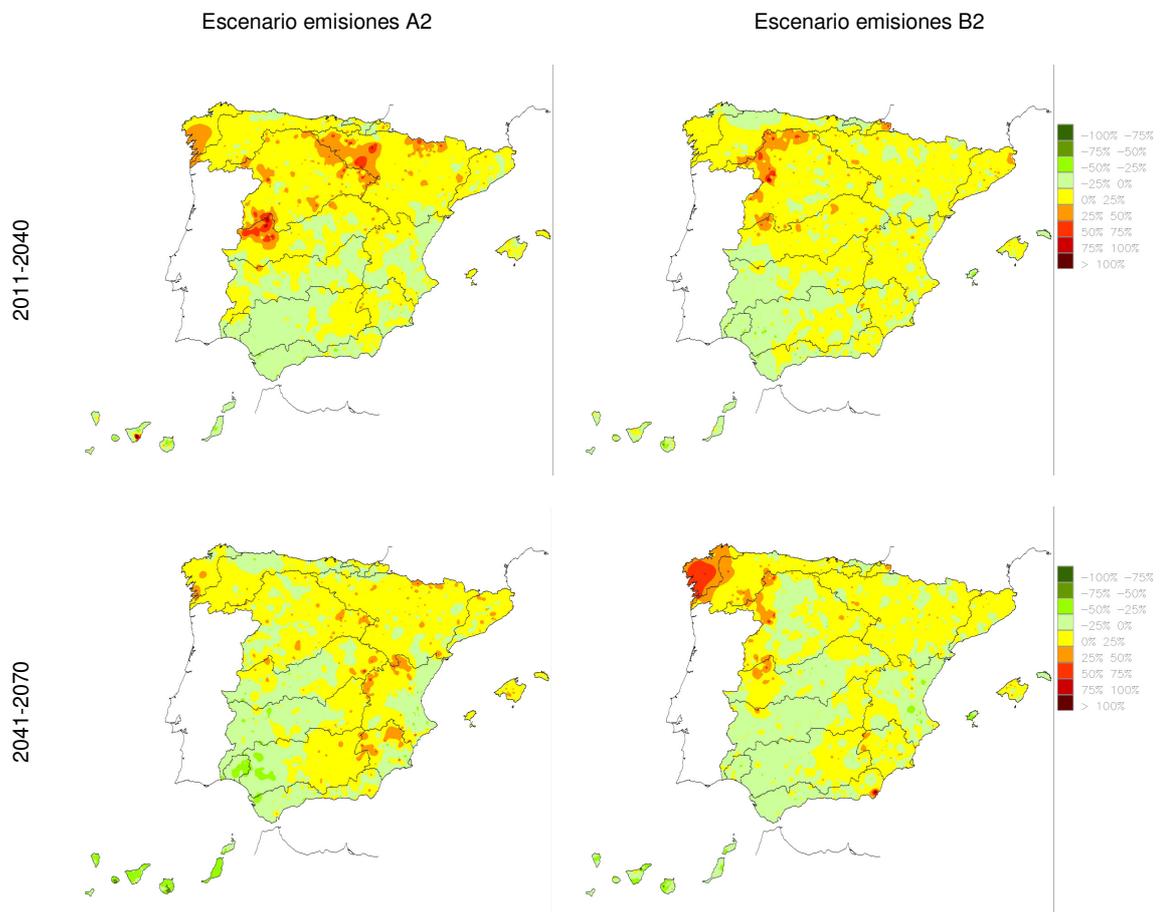


Figura 157. Mapas de  $\Delta$  (%) de los cuantiles de PMX respecto al 1961-1990 para un T 100 años. ECHAM4-FIC



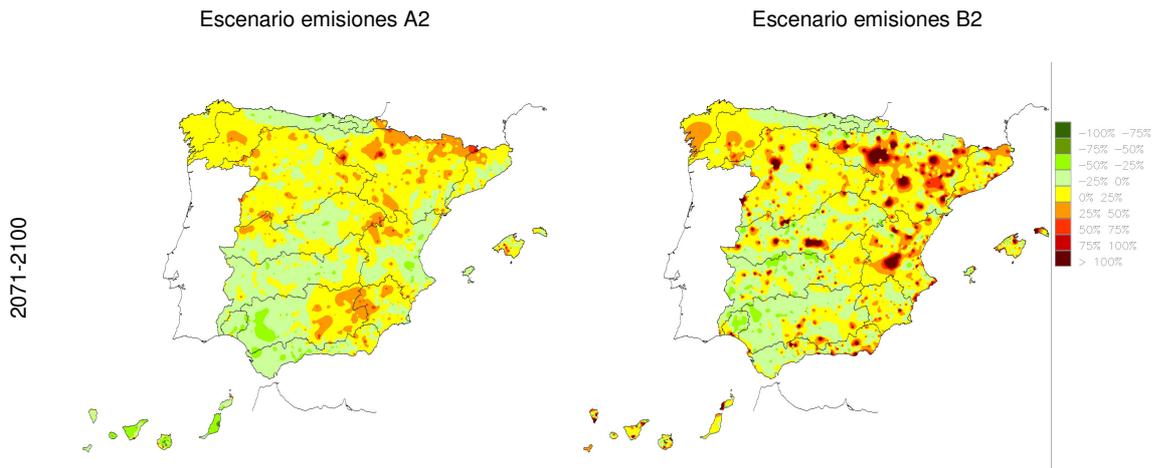


Figura 158. Mapas de  $\Delta$  (%) de los cuantiles de PMX respecto al 1961-1990 para un T 100 años. HadCM3-SDSM

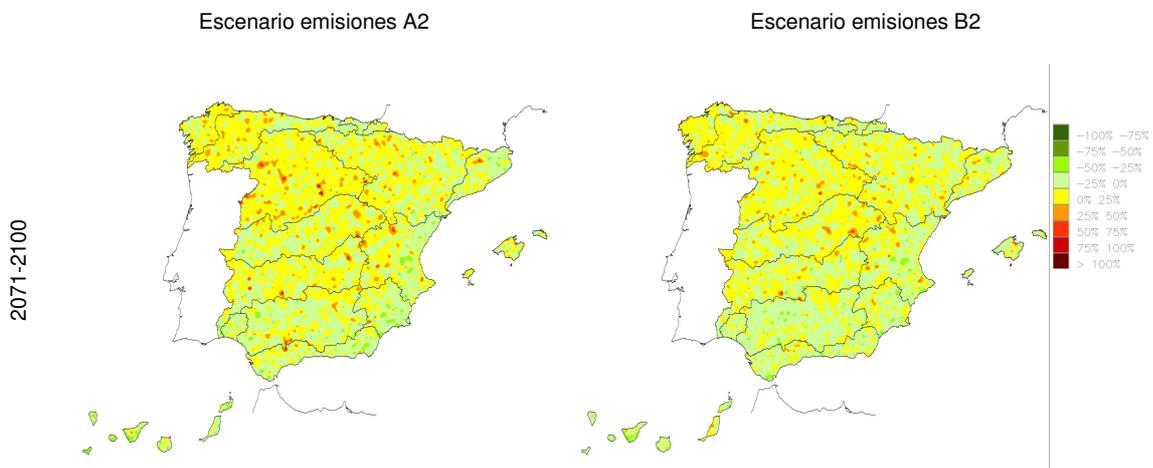


Figura 159. Mapas de  $\Delta$  (%) de los cuantiles de PMX respecto al 1961-1990 para un T 100 años. HadAM3-FIC

#### 7.1.4 Resultados finales

En el capítulo 4.2.3 se analizó el incremento de PMX de las series regionalizadas (AEMET, 2008) para el estudio del impacto climático en España. Previamente a la descripción de tendencias, ciclos y estacionalidad de las previsiones de los modelos atmosféricos, se realizó una comparación con datos históricos registrados en las estaciones meteorológicas de la AEMET.

Las proyecciones de las que se seleccionaron los máximos de este estudio son resultados de un conjunto de modelos de circulación global, CGCM2, ECHAM4, HadAM3 y HadCM3, y de procedimientos de regionalización estadística, método de análogos FIC para tres de ellos y regresión lineal para el último. El procedimiento de análogos FIC tendría ventajas teóricas sobre la regresión respecto a la aplicación a extremos ya que sería menos sensible al suavizado de información. Al comparar el conjunto de las proyecciones, se comprueba que las series SDSM de PMX son inferiores a las de las de las proyecciones FIC, pero los máximos son los mayores.

La comparación de series proyectadas y observadas en la red AEMET permite comprobar que las proyecciones infravaloran con carácter general medias y desviaciones típicas de las

PMX observadas; el coeficiente de asimetría no muestra este patrón tan claramente. Tampoco la evolución estacional de las proyecciones climáticas se ajusta a la observada en las estaciones AEMET. Sin embargo, el análisis de cambios estacionales entre las propias series proyectadas durante el s. XXI respecto a la de cada proyección climática durante el periodo de control, 1961-1990, no muestra ningún cambio aparente.

Los análisis de tendencia realizados sobre máximos diarios no permitieron identificar un crecimiento monótono de la PMX para el conjunto de regiones en España. Al contrario, en la mayoría de las regiones, las PMX tienen una componente decreciente. Únicamente en algunas regiones de la submeseta norte, Duero y Pirineo, se encuentran tendencias crecientes comunes al conjunto de proyecciones. Al combinar las PMX con la PRE total anual en términos del índice R95T para evaluar cambios en la torrencialidad del clima, aparece una componente creciente en una parte más extensa del territorio en la que disminuye la PRE anual. Queda fuera del alcance de este estudio estudiar las relaciones de este índice con la torrencialidad del clima en episodios menores a los diarios que son aquellos para los que se maneja información.

El análisis de series de 30 años del s. XXI se realizó explorando los cambios en localización y variabilidad y tst estadísticos de contraste de hipótesis. La localización, representada por la mediana, experimenta cambios regionales en función de la proyección, escenario y periodo, pero no se encuentra un patrón común al conjunto de proyecciones. La variabilidad se mantiene estacionaria en la generalidad de regiones y periodos, pero se indica la posibilidad de ser un resultado condicionado al suavizado que impone el uso de los modelos en la variabilidad de las series.

En el apartado inmediatamente anterior se aplicó la ley de frecuencia SQRT ET máx a series de PMX. Las discrepancias entre valores observados y proyectados añaden incertidumbre a cualquier tipo de conclusión que se pueda extraer de este análisis. Los cambios de las leyes de frecuencia regionales estimados para el s. XXI son reducidos. Las diferentes proyecciones no muestran un patrón común, aspecto que destaca en los mapas de desviaciones de periodo de retorno de 100 años. Por último, los escenarios B2 llegan a dar resultados pesimistas respecto a los A2. Conforme a las conclusiones del informe técnico del IPCC y los cambios en lluvia y temperatura, cabría esperar impactos más claros en el régimen de extremos.

## **7.2 Sequías**

### **7.2.1 Planteamiento metodológico**

Las sequías son eventos caracterizados por la reducción de PRE y del agua en cualquiera de las fases del ciclo hidrológico durante un periodo de tiempo. En función de la fase del ciclo en el que se da el déficit de agua, se definen sequías meteorológicas, agronómicas, subterráneas o hidrológicas. Las sequías son fenómenos recurrentes y, además de la frecuencia del evento, quedarían determinadas por la intensidad del déficit y la duración del periodo seco.

El estudio del impacto del cambio climático sobre las sequías se ha abordado en este estudio utilizando como variable la ESC promediada del conjunto de proyecciones simuladas por el modelo de recursos de SIMPA. Se han considerado series de treinta años de ESC de las principales DD.HH. A continuación, se ha implementado un modelo ARMA que generara series sintéticas de suficiente longitud para identificar sequías de duraciones de 2 a 5 años. Las sequías se definen como déficit respecto a la mediana de cada serie de treinta años.

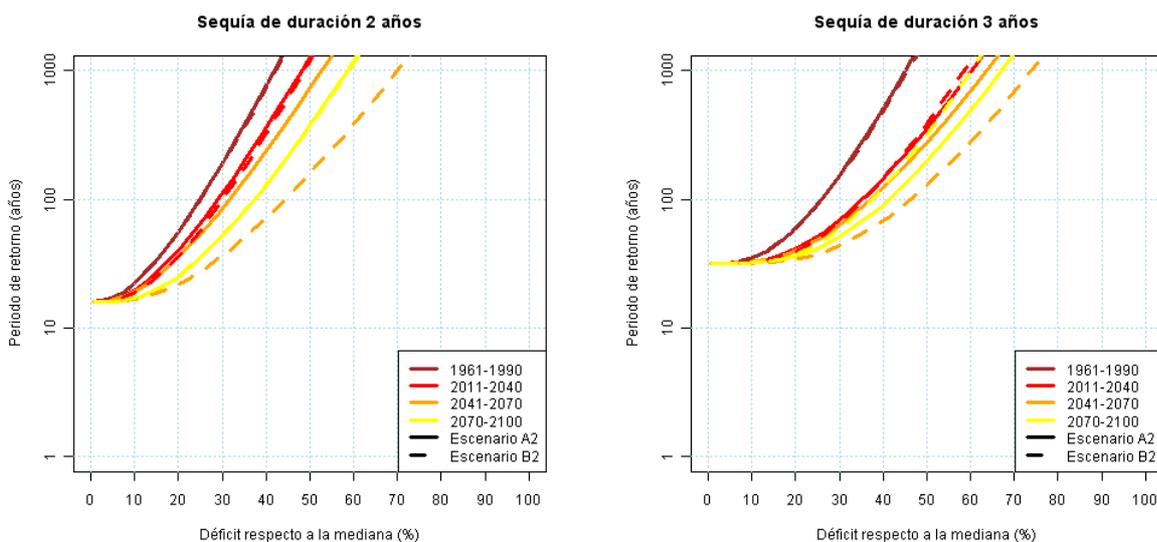
Una vez identificadas las sequías, se puede caracterizar su distribución de frecuencias y el periodo de retorno asociado a cada evento. El periodo de retorno se define como el número de años medio de interarribo entre dos sequías con una duración y un déficit acumulado

mayor que uno dado (Fernández y Salas, 1999a y 1999b). Considerando la duración y la magnitud del déficit de la sequía, se ha seleccionado finalmente un modelo bivariado basado en la composición de una distribución geométrica para la duración de las sequías y una función Gamma para la intensidad de las sequías (Salas et al, 2005). Se considera como hipótesis simplificadora que las dos variables anteriores son independientes y que la distribución producto representa la distribución de frecuencias de las sequías.

Finalmente, se representan los resultados en gráficas compuestas, para cada duración de sequía entre 2 y 5 años, por el déficit respecto a la mediana (%) en abscisas y el logaritmo del periodo de retorno en ordenadas. Las ocho curvas se refieren a la distribución de frecuencias de las sequías de cada periodo de estudio, 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 en los dos escenarios de emisiones, A2 y B2. La posición relativa de la distribución de frecuencias de cada proyección, escenario de emisiones y periodo permite inferir si las sequías de un mismo déficit van a ser más o menos frecuentes y consecuentemente valorar el empeoramiento o mejoría de las condiciones.

### 7.2.2 Resultados finales

En términos globales la situación en España se muestra en las siguientes gráficas. Se destaca que a las incertidumbres de la simulación de procesos atmosféricos y regionalización posterior se añaden ahora las relacionadas con la simulación de procesos hidrológicos y los relativos a la selección de eventos secos y extremos, por lo que cualquier conclusión sobre la caracterización e impacto del cambio climático en la ocurrencia de sequías debe contemplarse con precaución. De acuerdo a ellas, las sequías tenderán a hacerse más frecuentes en cualquiera de los periodos temporales contemplados durante el s. XXI. En las sequías de duración de dos años y escenario A2, el empeoramiento de condiciones sigue la secuencia temporal y son peores las condiciones al final del s. XXI que las del inicio. En las sequías de larga duración el peor periodo se produce a mediados del siglo XXI y son menos frecuentes las sequías del mismo déficit a finales del s. XXI. Los escenarios B2 siempre dan como peor situación la producida a mediados del s. XXI, situación también peor que la pronosticada en escenario A2.



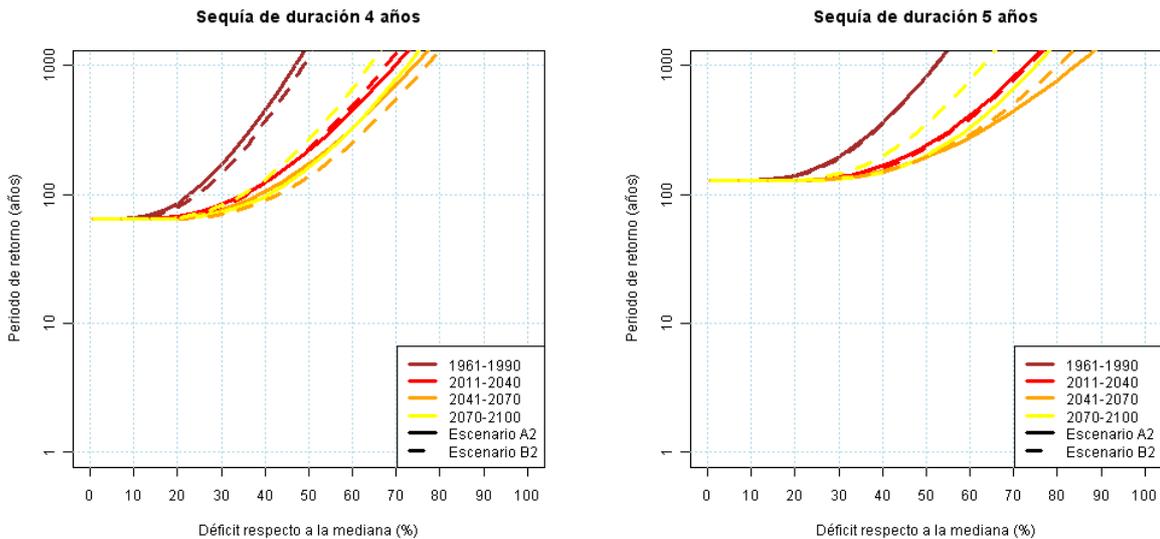
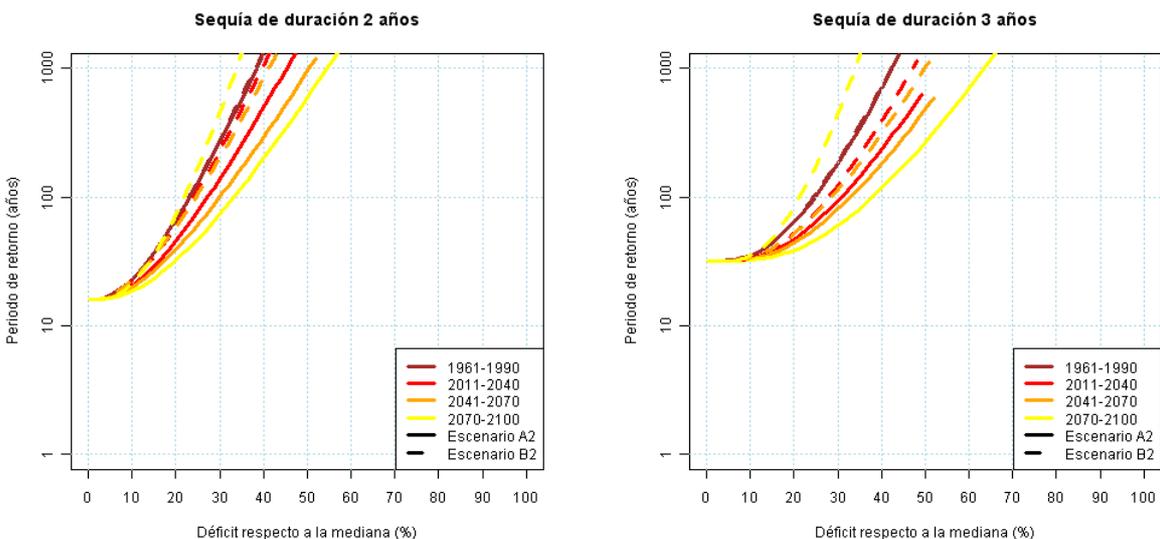


Figura 160. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en España.

La desagregación de esta caracterización de sequías por DD.HH. se muestra en las siguientes gráficas. Se han seleccionado resultados del Cantábrico, Ebro, Guadiana, Júcar, Cuencas Internas de Cataluña, Sur y Segura. Recogen cuencas de distintas características climáticas e hidrológicas y los resultados son similares a los obtenidos para España. En ellas se puede apreciar que hay empeoramiento de las condiciones secas a lo largo del s. XXI y que los escenarios B2 dan recuperaciones respecto a los correspondientes A2 hacia finales del s. XXI. En las cuencas Internas de Cataluña, con duraciones de sequía largas y escenarios A2, así como en la cuenca del Júcar, las proyecciones del s. XXI representan situaciones optimistas respecto al periodo 1961-90. En el Mediterráneo también se encuentra otra anomalía relacionada con la secuencia creciente en la frecuencia de sequías. Mientras en la mayoría de las cuencas, la situación empeora con el tiempo, en las cuencas del Guadalquivir, Júcar, Cuencas Internas de Cataluña e islas Baleares hay mejorías respecto al 1961-1990 en alguno de los periodos del s. XXI.



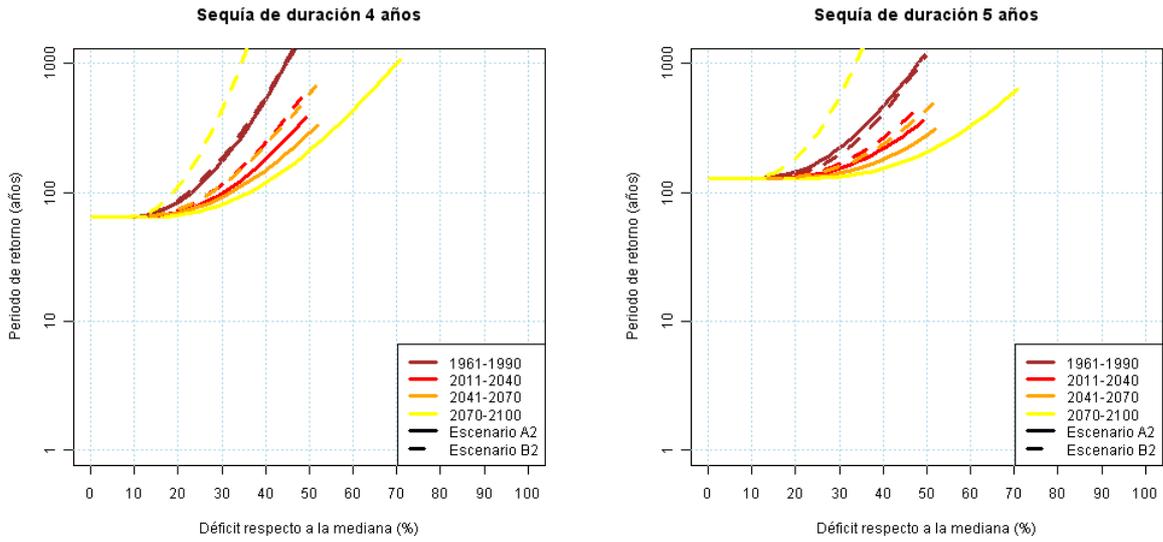
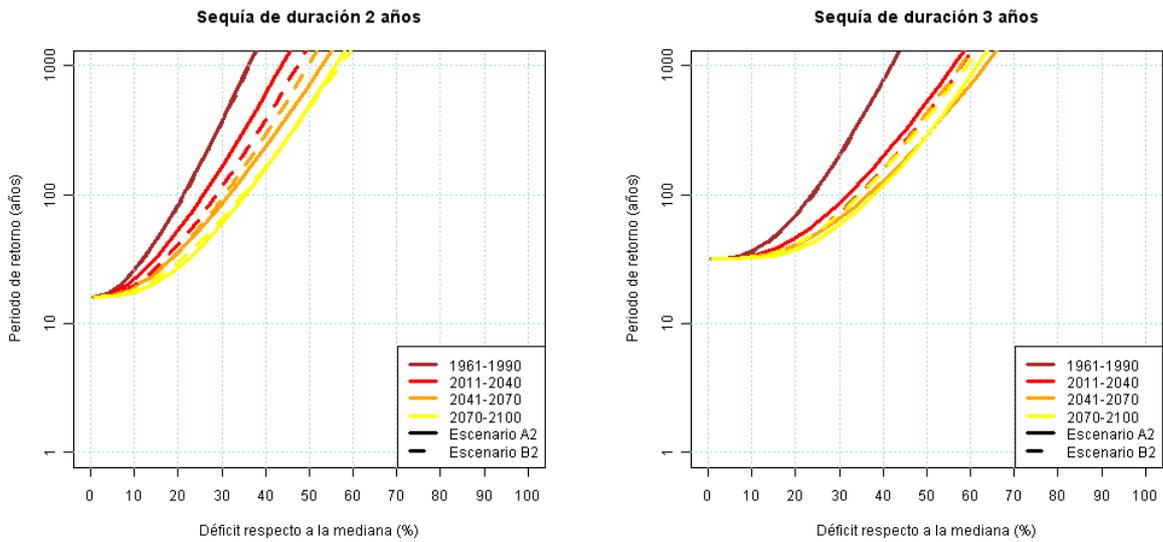


Figura 161. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en D.H. Cantábrico.



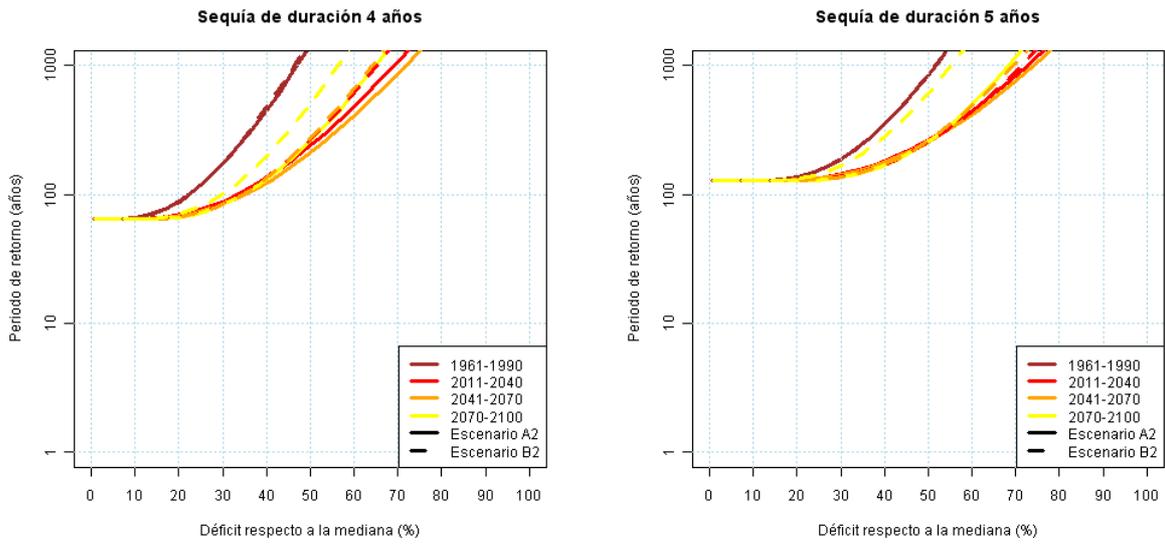
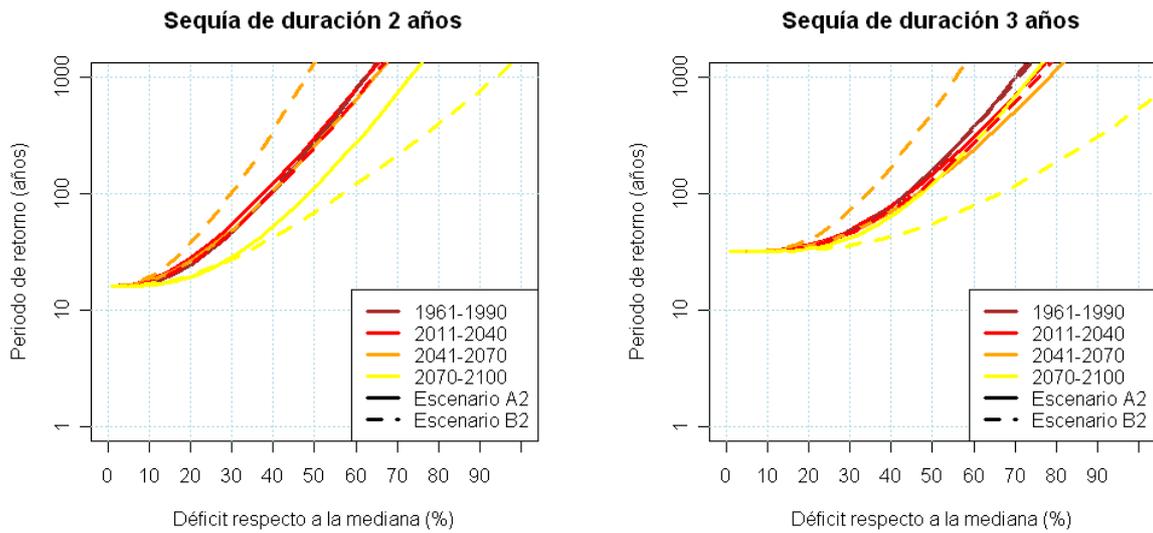


Figura 162. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en la D.H. Ebro



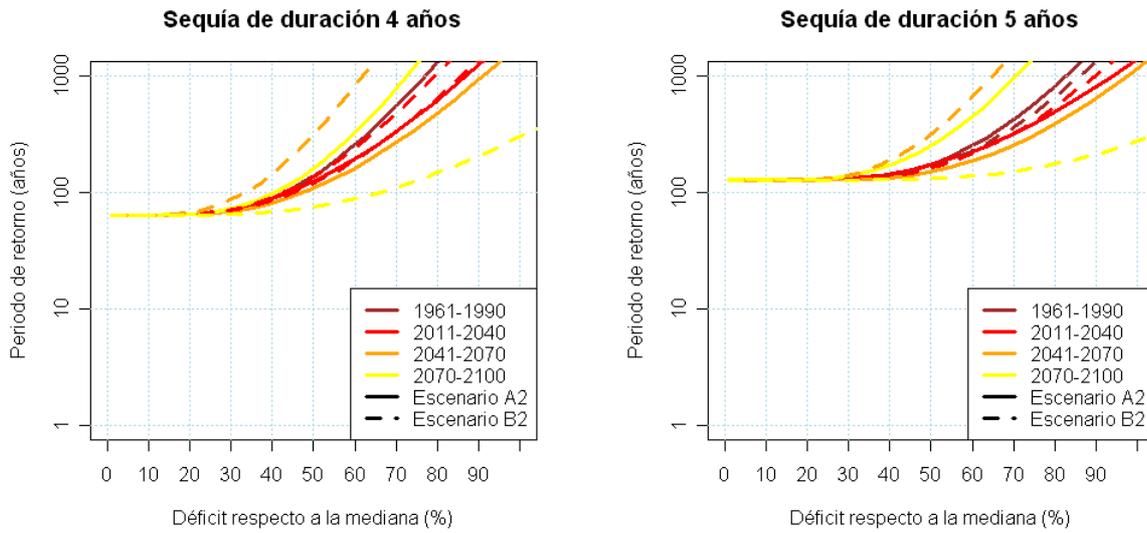
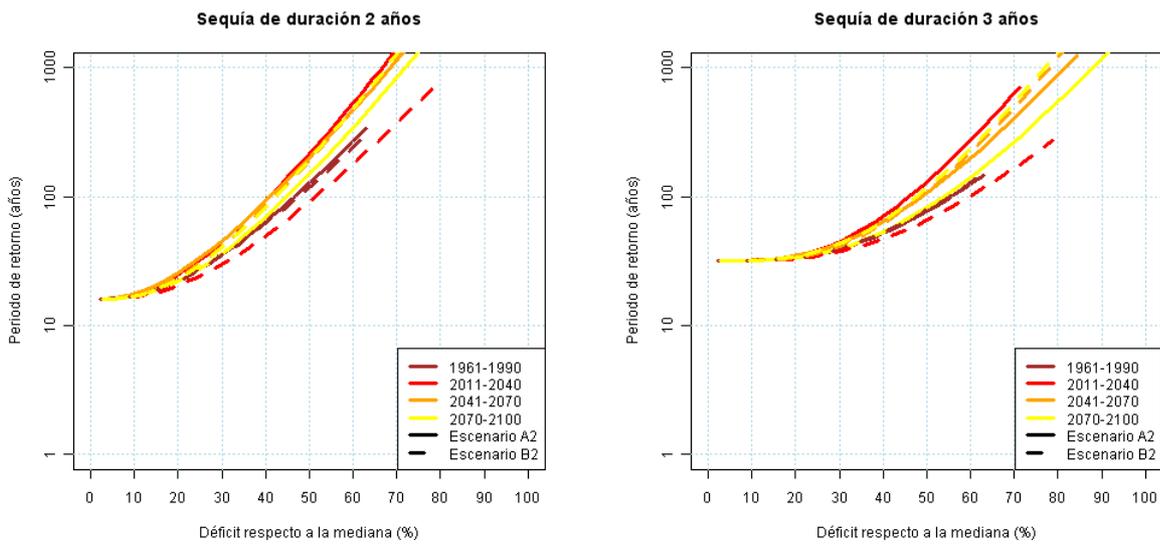


Figura 163. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en C.I. de Cataluña



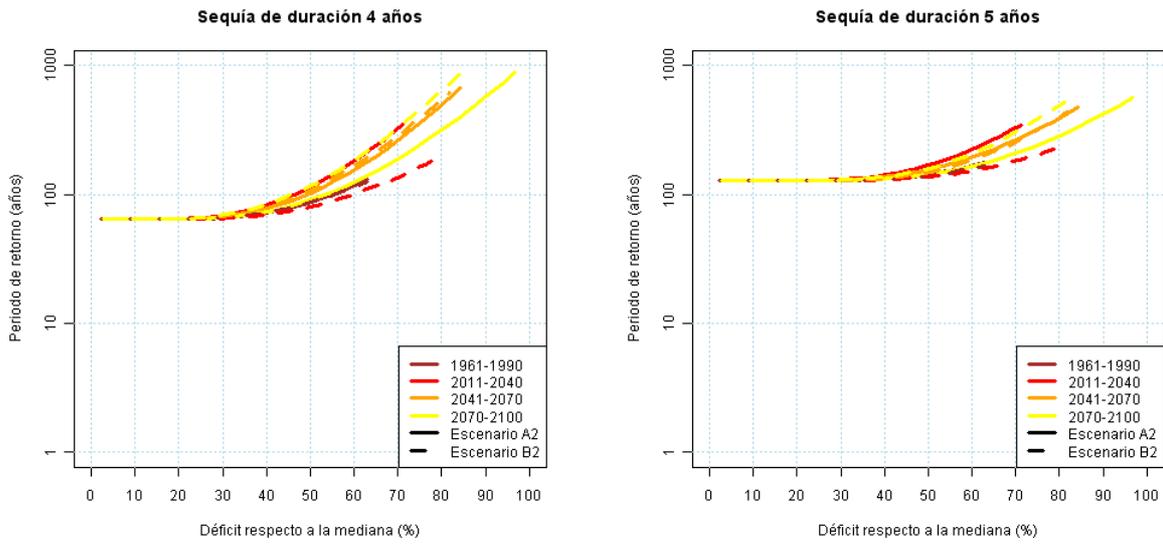
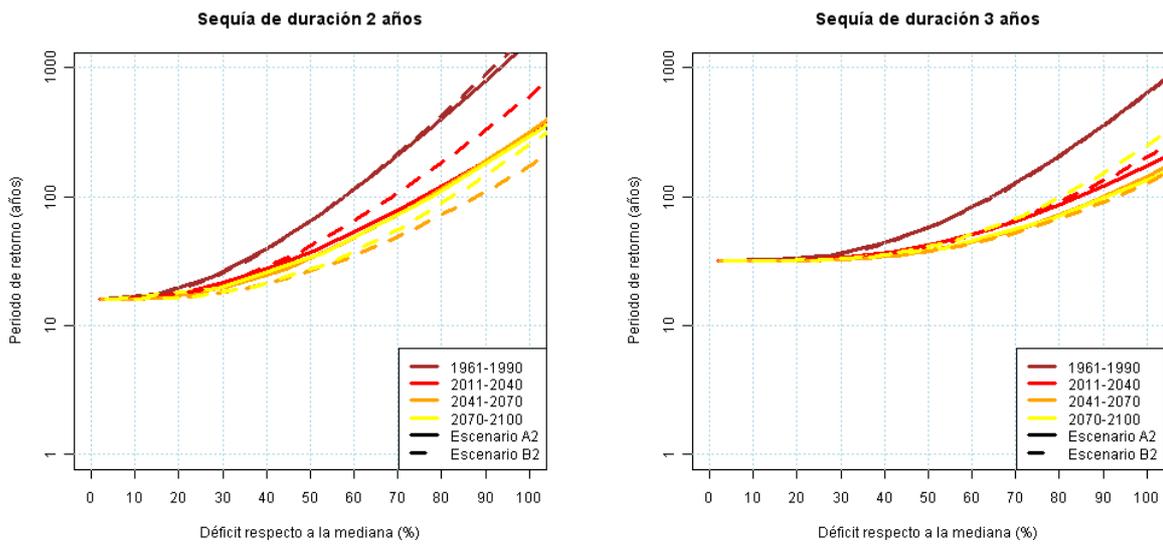


Figura 164. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en D.H. Júcar



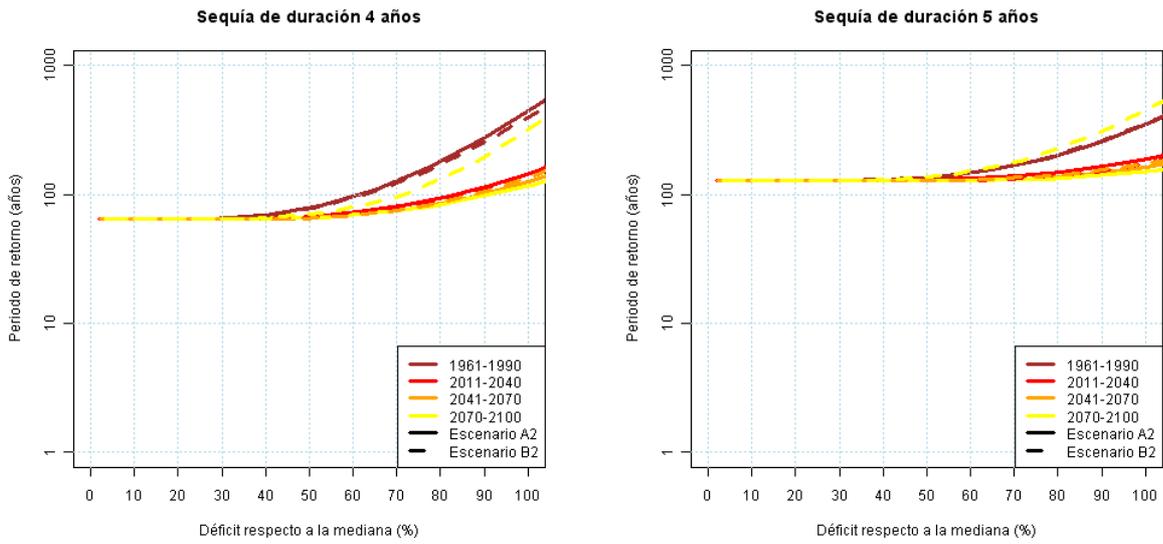
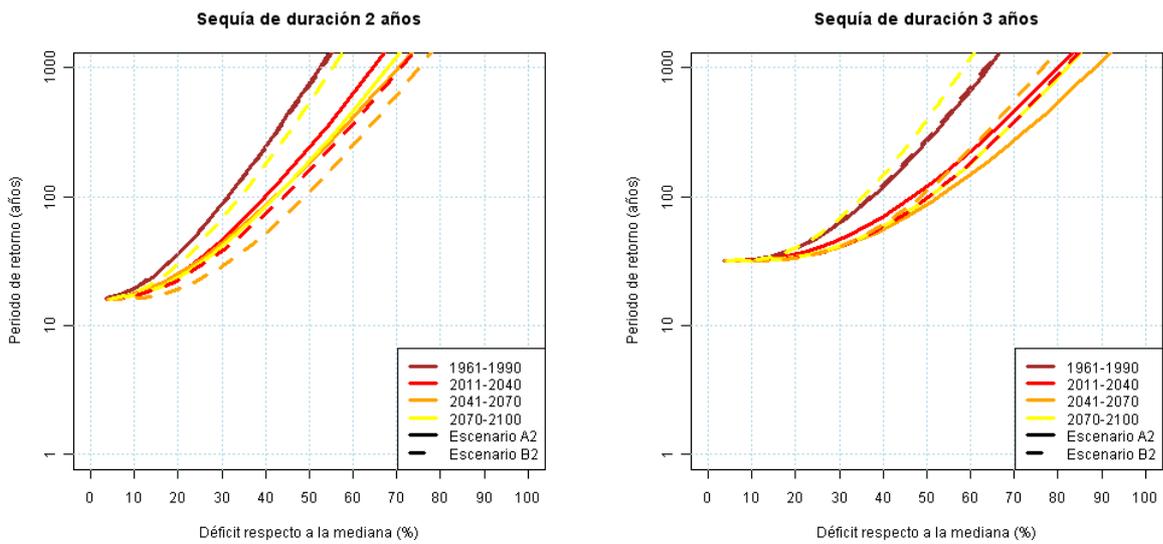


Figura 165. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en la D.H. Guadiana



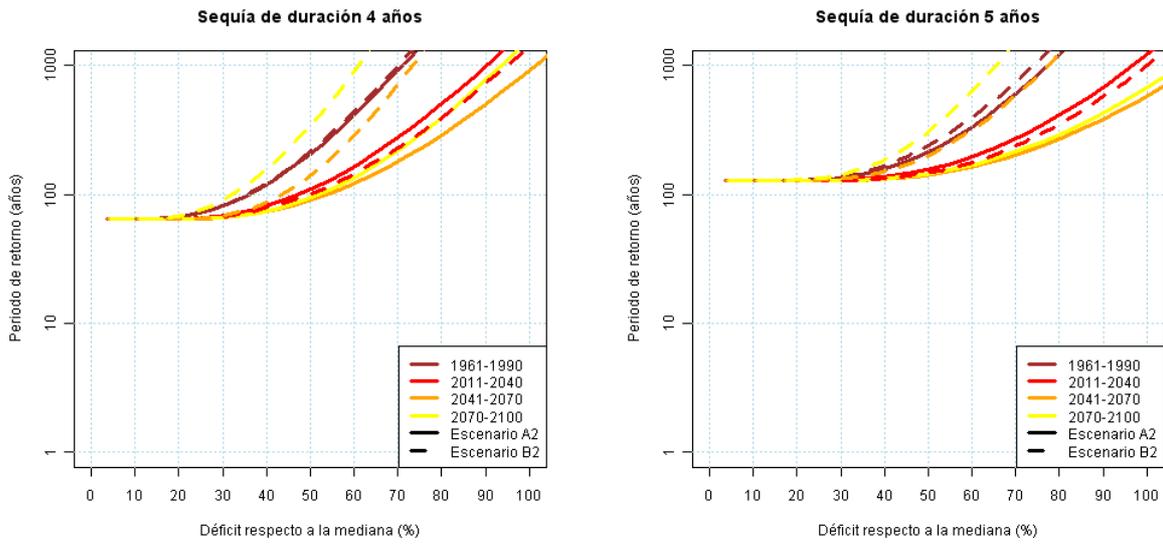
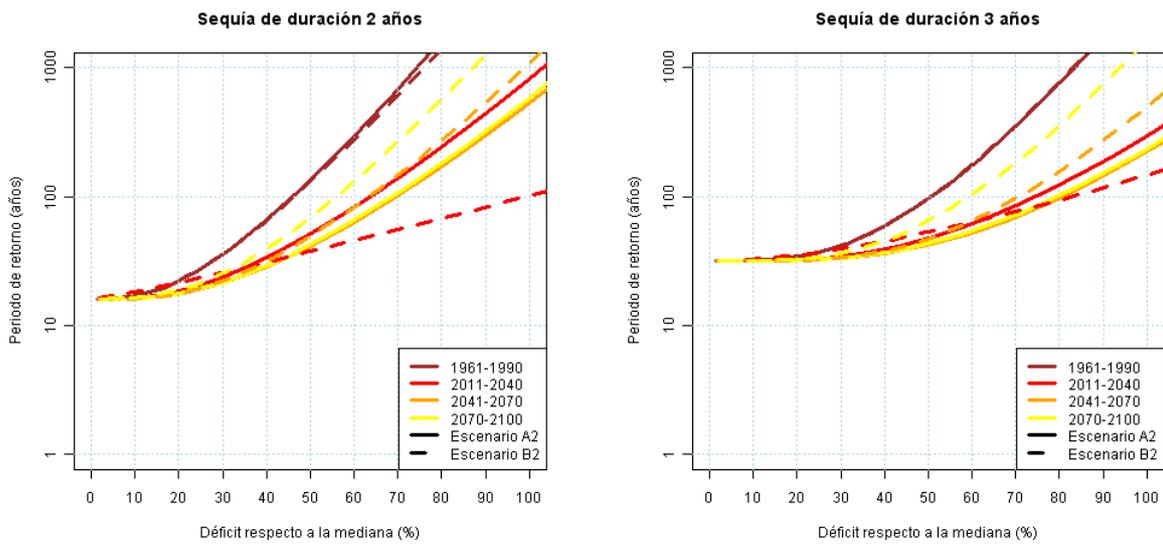


Figura 166. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en la D.H. Segura



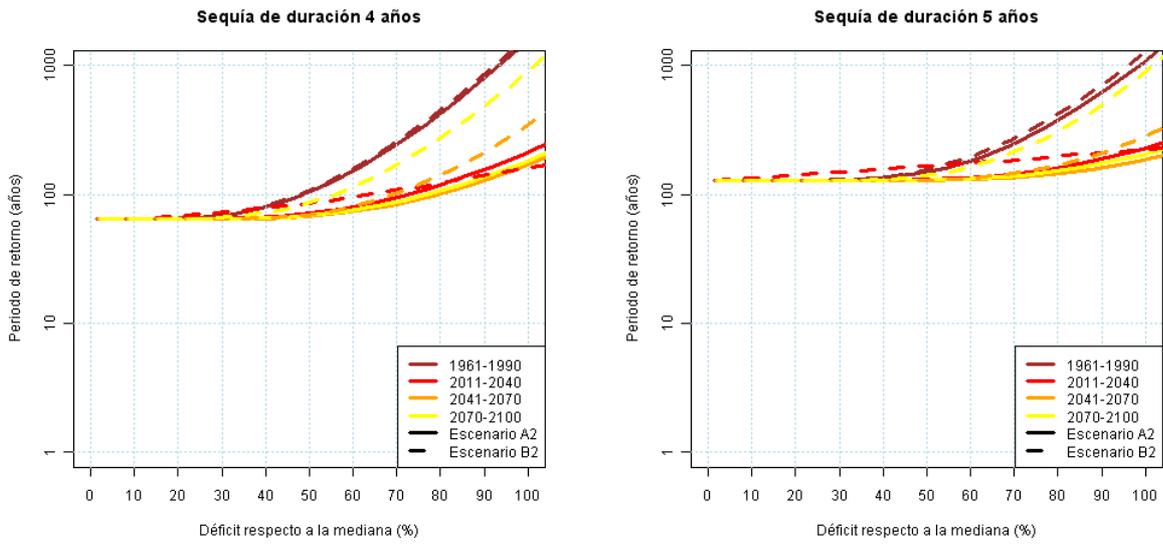


Figura 167. Frecuencia de sequía para distintas duraciones en C.I. Andalucía

## 8 CONCLUSIONES

Los modelos de circulación global, MCG, constituyen la herramienta matemática para la investigación del clima y del papel que juegan diferentes agentes y emisiones en la atmósfera. Trabajan a escalas bajas respecto a procesos como la precipitación o respecto al detalle necesario para estudiar el impacto del cambio climático en el resto de fases del ciclo hidrológico. Esto implica tener que adaptar o regionalizar los resultados de los MCG a escalas más altas para obtener finalmente series de precipitación y temperatura con las que forzar los modelos hidrológicos.

En el presente informe se expone el estudio sobre el impacto del cambio climático en diferentes fases del ciclo hidrológico. Su extensión espacial es España y temporalmente abarca la casi totalidad del s. XXI. Se han utilizado un total de 12 proyecciones climáticas que representan las previsiones del clima en España en función de distintos escenarios de emisiones, A2 y B2; distintos MCG, CGCM2, ECHAM4, HadCM3 y HadAM3; y distintos métodos de regionalización, estadística, FIC y SDSM, y dinámica, RAO y PROMES. En definitiva, se ha contado con la selección de modelos y técnicas de regionalización realizada por AEMET (2008). Las proyecciones comprenden desde el año 2011 hasta el año 2100 en los casos CGCM2-FIC, ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM; y desde el año 2071 al 2100 para el resto, HadAM3-FIC, ECHAM4-RAO y HadCM3-PROMES. Las proyecciones son equiprobables, aunque se tome la media de ellas para elaborar los índices de impacto.

El análisis de impacto se ha realizado estudiando la evidencia de cambio en las series de partida (precipitación y temperatura), así como mediante la simulación de procesos por medio de su implementación en el Sistema Integrado para la Modelización Precipitación Aportación, SIMPA (Ruiz García, 1999) para el análisis de impacto en distintas fases del ciclo hidrológico. Los resultados de la evaluación del impacto en cada variable hidrológica se han obtenido mediante desviaciones del valor medio anual alcanzado en cada uno de los tres periodos del s. XXI, 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, respecto al periodo de control 1961-1990. La variación estacional y mensual también se ha tenido en cuenta por sus repercusiones en la concatenación de procesos hidrológicos.

Las precipitaciones y temperaturas regionalizadas se han implementado en el modelo hidrológico sin realizar transformaciones adicionales, a pesar de haber identificado varios tipos de sesgo al contrastar proyecciones con datos observados durante el periodo de control 1961-1990. Se evita así la alteración de relaciones entre las variables de partida y de los mismos datos con criterios condicionados por cualquiera de los aspectos que aparecen en este estudio, que abarca recursos hídricos, sequías y avenidas.

### 8.1 Contraste de datos

Las proyecciones presentan unas apreciables diferencias con los datos observados para el periodo de control (1961-1990), siendo esas diferencias más acusadas para las precipitaciones que para las temperaturas. Son debidas a errores de simulación, de proyección regional y a la incertidumbre inherentes a la simulación de procesos atmosféricos.

Las precipitaciones totales anuales presentan diferencias notables en cuanto a media, variabilidad, tendencia y fluctuaciones de ciclos húmedos y secos. Las proyecciones dan precipitaciones medias entre un 15% y un 25% inferiores a las observadas en España. Estacionalmente, todas las proyecciones dan un ciclo anual más suavizado, que no alcanzan los valores medios observados en otoño y superan los observados durante el verano. Las precipitaciones máximas diarias de las proyecciones también infravaloran la media y la dispersión de las series observadas. Respecto al coeficiente de asimetría, se puede indicar que hay tendencia a infravalorar el de las series observadas. Los sesgos y errores de cada una de las proyecciones varían regionalmente.

Las temperaturas simuladas se ajustan mejor a los datos observados que las precipitaciones. Las temperaturas medias anuales de las proyecciones son superiores en media hasta 3°C (HadAM3-FIC) e inferiores en -1°C (CGCM2-FIC) respecto a los datos observados.

## 8.2 Recursos hídricos

Las proyecciones pronostican una reducción generalizada de la precipitación conforme avanza el siglo XXI. El escenario A2 estima mayores reducciones que el B2, siendo imperceptibles las diferencias entre ambos en la 1<sup>era</sup> mitad del siglo XXI y muy notables al final del mismo. El conjunto de proyecciones en escenario de emisiones A2 supone un descenso de precipitación de -5%, -9% y -17% durante los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente. En el escenario B2 estas desviaciones son similares durante los dos primeros periodos, -6%, -8% y más suavizada durante el último, -9%.

ECHAM4-FIC da las mayores reducciones durante los periodos 2011-40 y 2041-70. Durante el periodo 2071-2100 hay una amplia dispersión de resultados de las diferentes proyecciones, oscilando desde un +2% (HadAM3-FIC) y -11% (CGCM2-FIC) hasta el -26% del (HadCM3-SDSM) y -28% (ECHAM4-RCAO). Estas desviaciones varían regionalmente, con los mayores descensos en Canarias y suroeste peninsular y los menores en el Levante. Ninguna de las proyecciones indica cambios notables respecto al ciclo estacional de la precipitación del periodo de control.

La evolución de la temperatura proyectada en los periodos del siglo XXI muestra tendencias crecientes. Los incrementos medios estimados son de aproximadamente +1,5°C para el 2011-2040, de +2,9°C (A2) y +2,5°C (B2) para el 2041-2070 y de +4,8°C (A2) y +3,6°C (B2) para el 2071-2100. Los incrementos de temperatura son mayores en las zonas interiores que en las próximas a la costa.

En España, la media de las proyecciones A2 dan incrementos medios de la evapotranspiración potencial para el escenario A2 entre el +6% (2011-2040), +13% (2041-2070) y el +21% (2071-2100); los B2 son de +7%, +12%, +15% para los mismos periodos. A diferencia del caso de las precipitaciones, los ascensos de evapotranspiración potencial son similares entre las proyecciones. En cuanto a la distribución espacial, el incremento es mayor en el interior de la Península que en las zonas costeras y en algunas cabeceras de las principales cuencas de España. Los cambios no son uniformes en todos los meses y estaciones del año. Los mayores incrementos medios y las mayores diferencias entre proyecciones se dan entre el final de la primavera y el verano; y los menores, entre otoño e invierno. El hecho de que los mayores incrementos de evapotranspiración potencial se den durante meses secos hace esperar que el impacto del ascenso de temperatura y evapotranspiración potencial en la escorrentía sea reducido.

Las proyecciones simulan un ascenso pronunciado de la evapotranspiración potencial lo que provocaría un aumento de la real. Por otro lado, disminuyen las precipitaciones y disponibilidades de agua mensuales, lo que finalmente provoca que la evolución anual de la evapotranspiración real sea decreciente, especialmente en el último periodo de análisis, 2071-2100. Como patrón general se observa que los picos de primavera se adelantan en el tiempo y se reducen. Además, los decrementos significativos de evapotranspiración real se dan entre primavera y verano. En invierno se llega a evapotranspirar más, consecuencia de la mayor evapotranspiración potencial y de unas cantidades de precipitación suficientes. Las proyecciones del escenario A2 están dando unas desviaciones de valores medios para España del -3% para 2011-2040, del -7% para 2041-2070 y del -13% para 2071-2100. Las del B2 dan desviaciones del -5%, -6% y -7% respectivamente.

En los tres periodos hay un descenso de la recarga en España, más acusado en ECHAM4-FIC para los dos primeros periodos y en el escenario de emisiones A2 para el último

periodo. Las proyecciones del escenario A2 dan unas reducciones para España del -8% para 2011-2040, del -15% para 2041-2070 y del -26% para 2071-2100. Las del B2 dan desviaciones del -8%, -12% y -15% respectivamente. Hay mayores descensos porcentuales de la recarga en Canarias y zona silíceo peninsular que en la zona calcárea mediterránea, ya que los valores de referencia 1961-1990 son mayores en la última.

Se pronostica una reducción generalizada de recursos hídricos en España, más acentuada conforme avanza el siglo XXI, si bien hay grandes variaciones entre las reducciones estimadas por las diferentes proyecciones analizadas. Las proyecciones del escenario A2 dan unas reducciones para España del -8% para 2011-2040, del -16% para 2041-2070 y del -28% para 2071-2100; las del escenario B2 son del -8%, -11% y del -14% respectivamente. Estos valores medios deben de tomarse con precaución debido a la amplia dispersión de valores aportados por el conjunto de las proyecciones. Considerando los resultados por proyección, la oscilación es del -2% al -22% para el periodo 2011-2040, del -8% al -34% para el periodo 2041-2070 y del 0% al -40% para el periodo 2071-2100 en el escenario A2. Los valores alcanzados en el escenario B2 son menores, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XXI.

De las proyecciones se derivan mayores descensos porcentuales de escorrentía en verano que en invierno. La reducción de escorrentía del promedio de las proyecciones es más acusada hacia el suroeste de la Península y Canarias. En todo caso, hay que señalar que las variaciones se hacen del orden de magnitud de las escorrentías medias anuales en regiones y estaciones secas, lo que amplifica un índice de impacto calculado exclusivamente en función de valores medios. Regionalmente los resultados cambian apreciablemente en función de la proyección. Así, CGCM2-FIC-A2 tiende a dar reducciones en las cuencas atlánticas y aumentos en zonas mediterráneas; los descensos son pronunciados especialmente en cuencas atlánticas en ECHAM4-FIC-A2; HadCM3-SDSM-A2 da desviaciones positivas en zonas atlánticas, submeseta norte y Baleares. En el periodo 2071-2100, HadAM3-FIC-A2 da incrementos en algunas zonas del norte y descensos en la mitad sur, mientras que ECHAM4-RCAO-A2 muestra un patrón contrario.

Las variaciones de escorrentía obtenidas en este informe no alteran de manera relevante las previstas en LBAE (MIMAM, 2000a) para el horizonte 2030 y en la IPH (ORDEN ARM/2656/2008) para el horizonte 2027. Tomando como referencia las desviaciones equivalentes obtenidas en el presente informe para 2011-2040 respecto al periodo 1940-2005 y comparándolas con las publicadas en la IPH y en el LBAE resulta que las disminuciones MIMAM (2000) son inferiores en las cuencas de carácter húmedo y superiores en las cuencas de carácter más seco. Este aspecto se debe al haber utilizado la formulación de Schreiber-Budyko como base y haber trasladado ascensos de evapotranspiración potencial a la reducción de escorrentía sin haber contemplado la disponibilidad de agua. Los territorios insulares, Baleares y Canarias, constituyen una excepción ya que las cifras de desviaciones calculadas en este informe superan las del LBAE. Debido a los problemas de estacionalidad y escala de las proyecciones de precipitación, la fiabilidad del resultado es menor respecto al resto de las cuencas y se ha decidido no incluirlas en la siguiente tabla de conclusiones.

Demarcación hidrográfica	Disminución (%) para 2030 respecto al periodo 1940-1995 LBAE (MIMAM, 2000)	Disminución (%) para 2011-2040 respecto al periodo 1940-2005 en el presente informe	
		A2	B2
Cantábrico	2	11	8
C.I. Galicia-Costa	2	7	4
C.I. País Vasco (Norte III)	2	11	9
Miño-Sil	3	5	2
Duero	6	7	5
Tajo	7	7	7
Guadiana	11	6	2
Guadalquivir	8	6	8
C.I. Andalucía (Sur, Guadiana II)	7, 8	4	7
Segura	11	5	8
Júcar	9	3	12
Ebro	5	5	5
C.I. Cataluña	5	0	7
Islas Baleares	7	-	-
Islas Canarias	10	-	-
España	5	6	5

Tabla 39. Comparativa de  $\Delta$  APN (%) en IPH-LBAE

### 8.3 Eventos extremos

No hay evidencias de un aumento generalizado de precipitación máxima diaria conforme avanza el s. XXI. Solo en algunas zonas de la submeseta norte, Duero, cabeceras del Tajo al Segura y Pirineo se observa un crecimiento que no es evidente en el resto de España. No obstante, sí aumenta la proporción de la precipitación máxima diaria respecto a la precipitación anual debido al mayor peso del descenso de esta última. En cuanto a la estacionalidad, no parece haber variaciones importantes salvo ligeros desplazamientos mensuales. Las proyecciones dan diferentes resultados en las distintas regiones, lo que hace difícil concluir un patrón espacial de variación.

Se ha destacado en el capítulo relativo al estudio de sequías que cualquier conclusión sobre la caracterización de este tipo de eventos debe contemplarse con precaución debido a la acumulación de incertidumbres, composición de la relativa a la simulación de procesos atmosféricos, a la regionalización posterior, a las relacionadas con la simulación de procesos hidrológicos y finalmente a la relativa a la selección de eventos secos y extremos. Se estima que las sequías tenderán a hacerse más frecuentes en cualquiera de los periodos temporales contemplados durante el s. XXI. Las sequías de corta duración (hasta 3 años) son más frecuentes e intensas en el último periodo del siglo XXI, mientras que las de larga duración presentan mayor frecuencia e intensidad hacia mediados del siglo XXI. El escenario de emisiones B2 da la peor situación a mediados del s. XXI, peor incluso que la del A2, mientras que el A2 da las peores situaciones a finales del s. XXI. Aunque en la mayoría de las DD.HH. la situación empeora con el tiempo, en las cuencas del Guadalquivir,

Júcar, Cuencas Internas de Cataluña e islas Baleares hay mejorías en alguno de los periodos del s. XXI respecto a 1961-1990.

### 8.4 Resultados por DD.HH.

En las siguientes tablas se presentan gráficos con los valores medios y el rango de variación de las desviaciones de las proyecciones de las principales variables hidrológicas durante el siglo XXI con relación al periodo 1961-1990. También se presenta la distribución mensual de la media de las proyecciones con datos en los tres periodos del siglo XXI. Finalmente, se comentan brevemente las conclusiones principales por DD.HH. en lo que se refiere a los cambios en eventos extremos.

## ESPAÑA

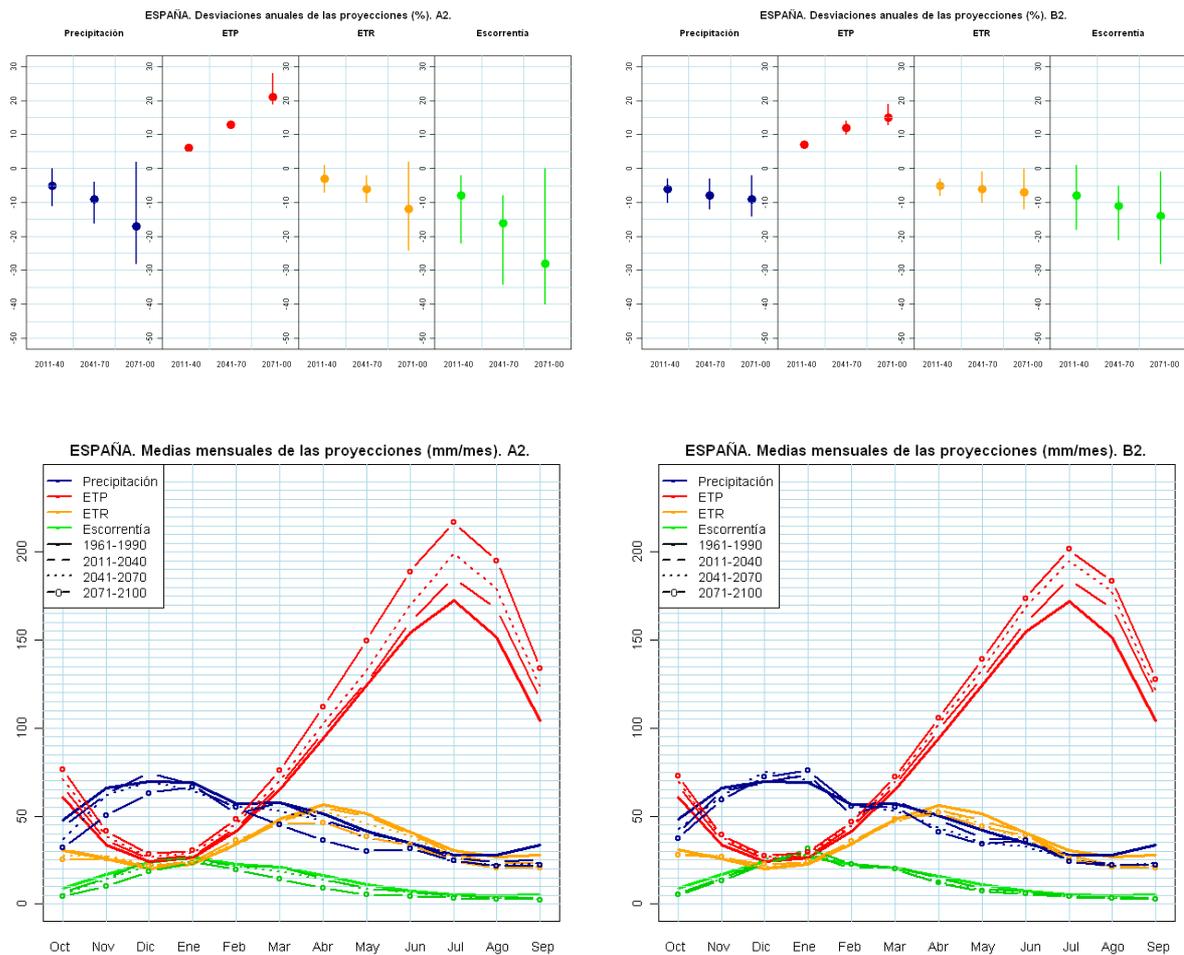


Figura 168. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en España

Sequías: mayor frecuencia conforme avanza el s. XXI y mejora de condiciones en escenarios B2 respecto a los A2 a finales del s. XXI

## Demarcación Hidrográfica del CANTÁBRICO

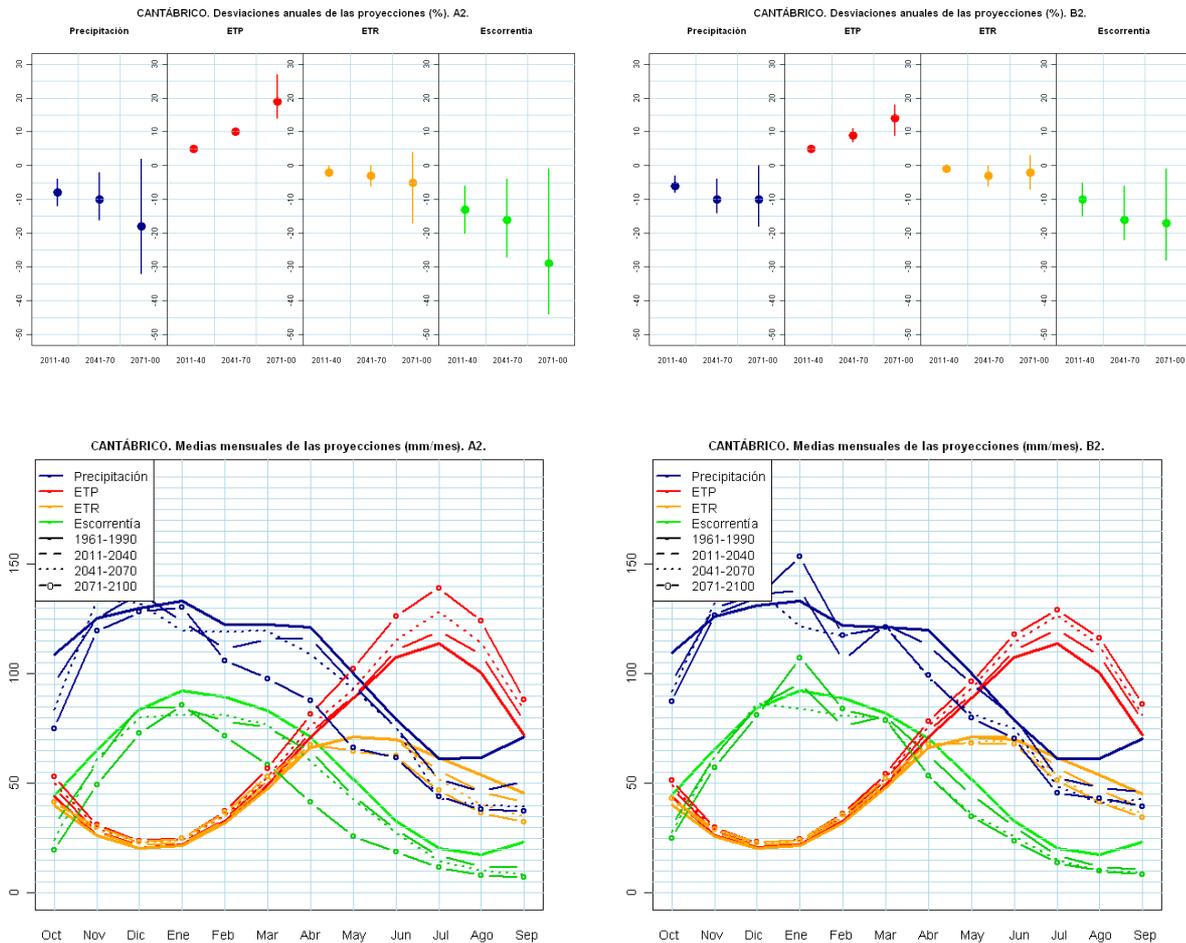


Figura 169. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Cantábrico.

No hay evidencias en la D.H. del Cantábrico de variaciones en el registro de eventos extremos máximos en esta cuenca, pero sí de un aumento de la frecuencia de las sequías a lo largo del s. XXI

## Cuencas Internas de GALICIA - COSTA

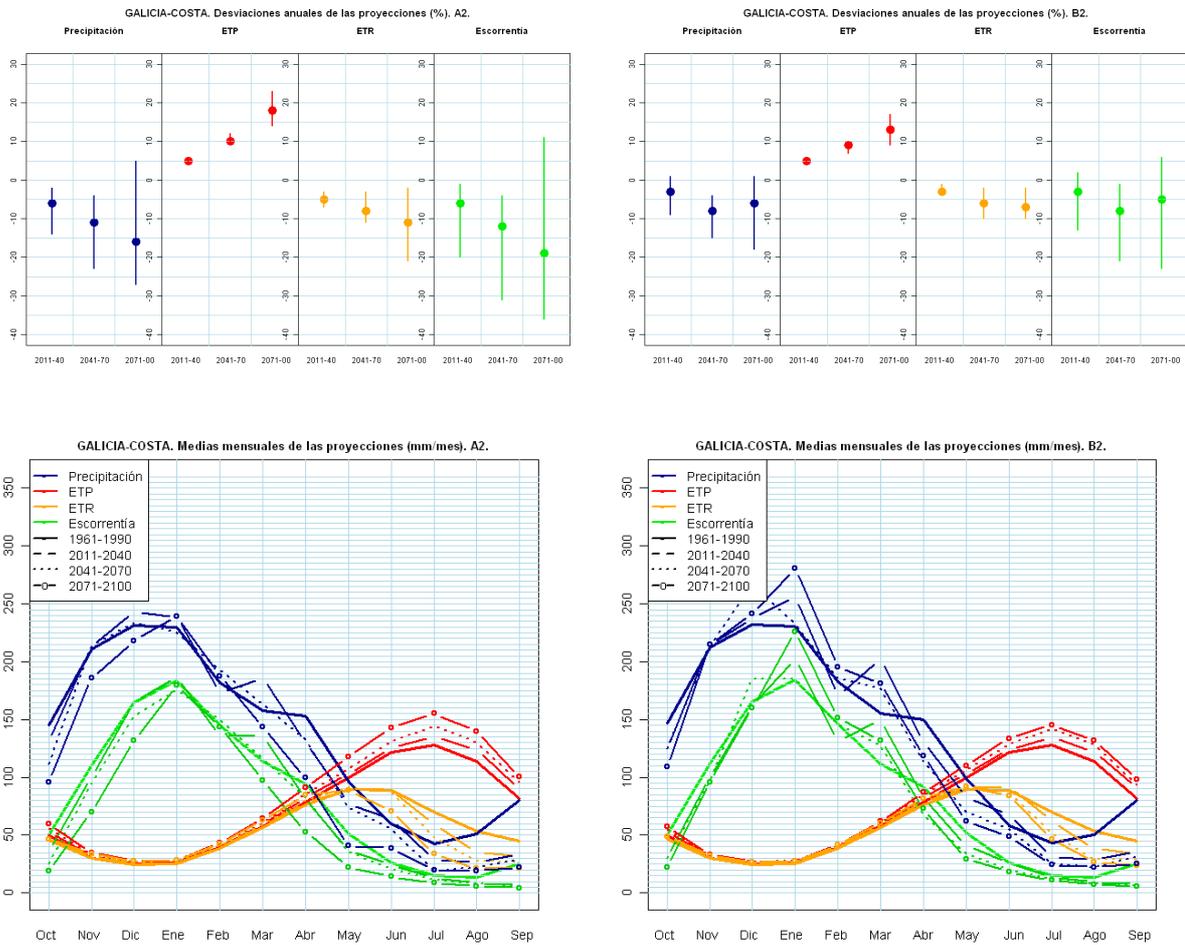


Figura 170. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en las C.I. de Galicia-Costa

En las Cuencas Internas de Galicia Costa algunas proyecciones como HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM prevén un aumento de los eventos máximos en el último periodo del siglo XXI. En cuanto a las sequías, no se muestran evidencias en las series de cambios importantes respecto al periodo de control.

## Demarcación Hidrográfica de MIÑO - SIL

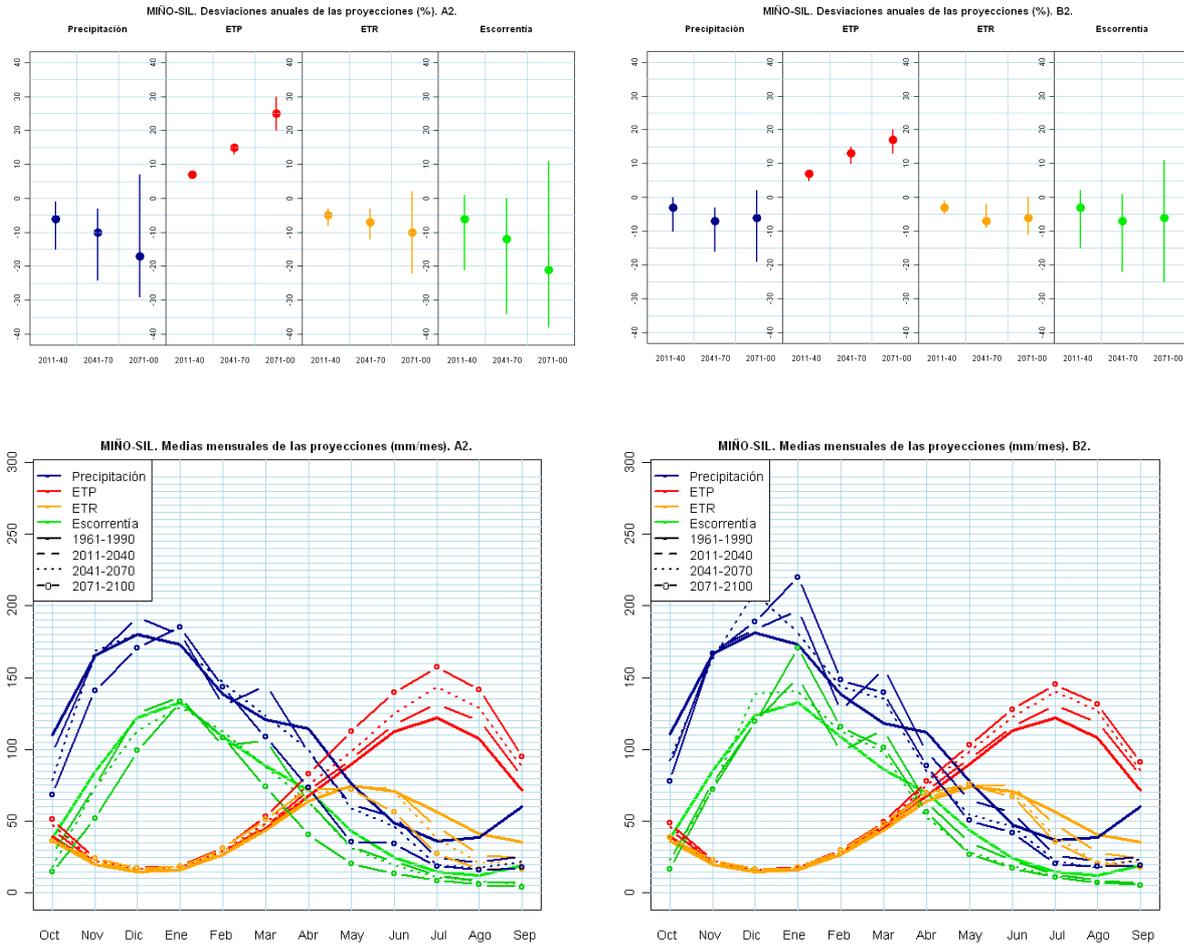


Figura 171. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Miño-Sil

En la D.H. del Miño-Sil, las proyecciones HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM muestran un aumento de las PMX al final del s. XXI, y al mismo tiempo se prevé un empeoramiento de las condiciones de sequía a lo largo de este siglo, aumentando su frecuencia e intensidad.

## Cuencas Internas del PAÍS VASCO

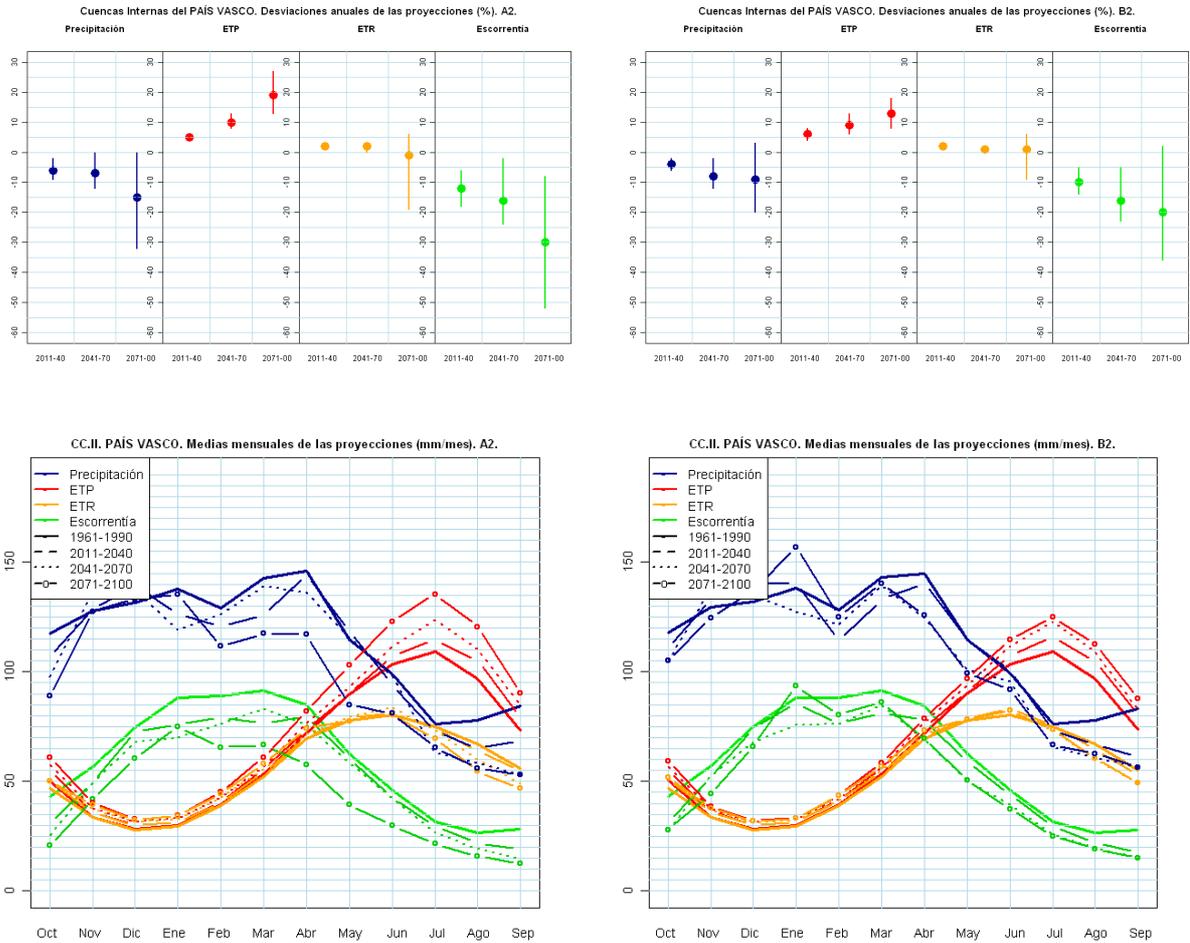


Figura 172. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en las C.I. del País Vasco  
No se han observado variaciones en la ocurrencia de eventos extremos en las Cuencas Internas del País Vasco.

## Demarcación Hidrográfica del DUERO

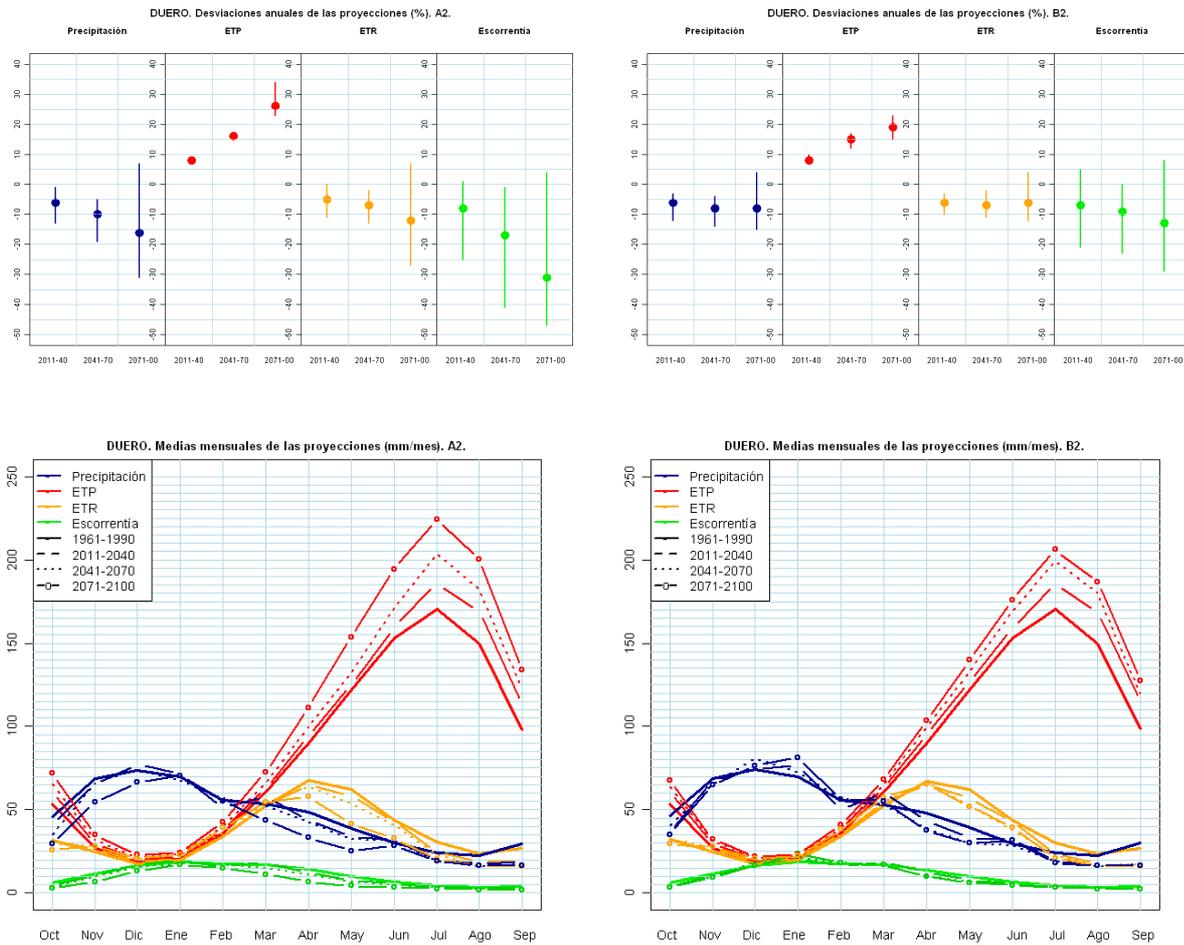


Figura 173. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Duero

En la D.H. del Duero, ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM muestran una tendencia al aumento de las PMX durante el s. XXI. Las sequías muestran también un aumento en su frecuencia e intensidad conforme avanza el siglo.

## Demarcación Hidrográfica del TAJO

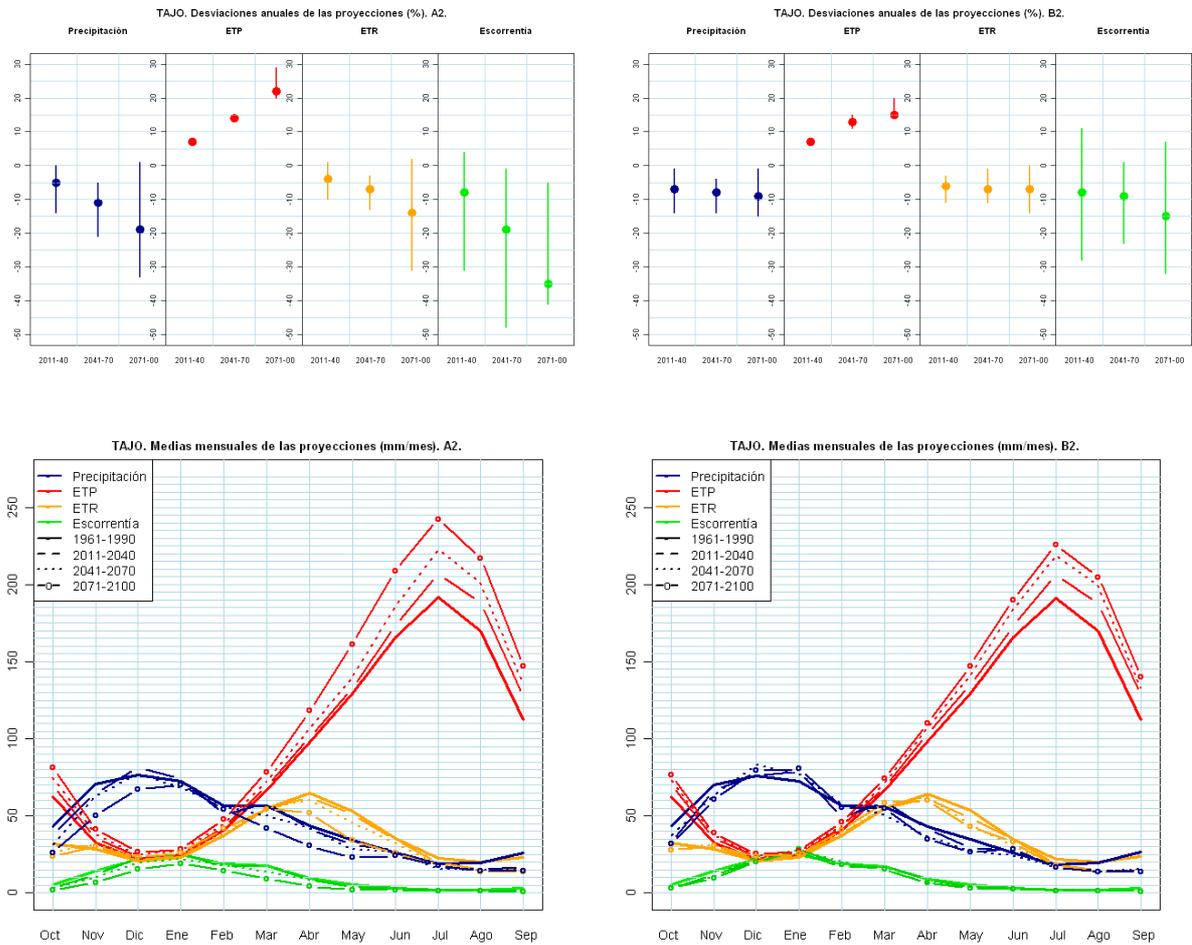


Figura 174. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Tajo

En la D.H. del Tajo, ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM muestran un aumento de los eventos máximos, especialmente en cabecera y en la última mitad del s. XXI. Las sequías también aumentan su frecuencia e intensidad a lo largo de este siglo.

## Demarcación Hidrográfica del GUADIANA

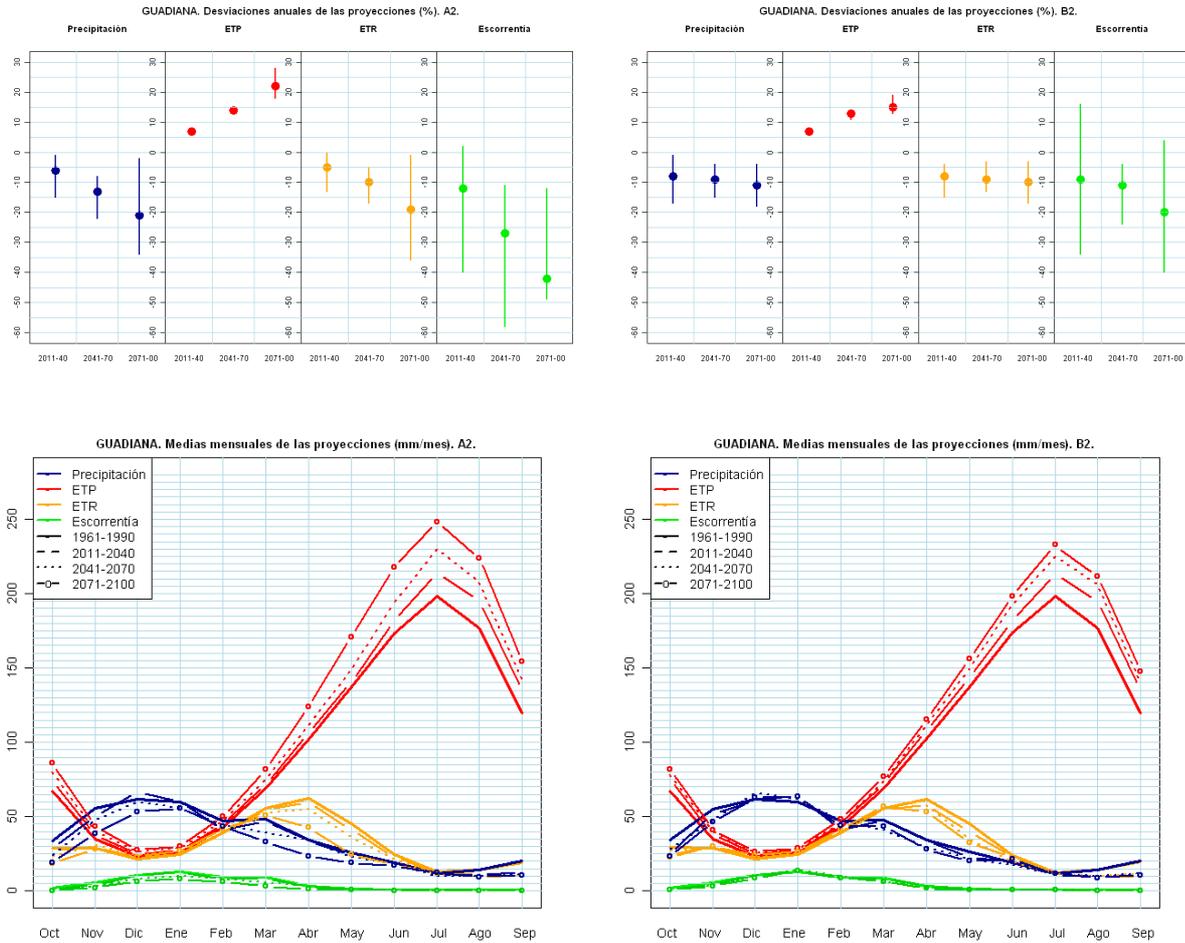


Figura 175. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Guadiana

En la D.H. del Guadiana son ECHAM4-FIC y HadCM3-SDSM prevén un aumento en la magnitud de PMX. Los eventos secos aumentan en frecuencia e intensidad.

## Demarcación Hidrográfica del GUADALQUIVIR

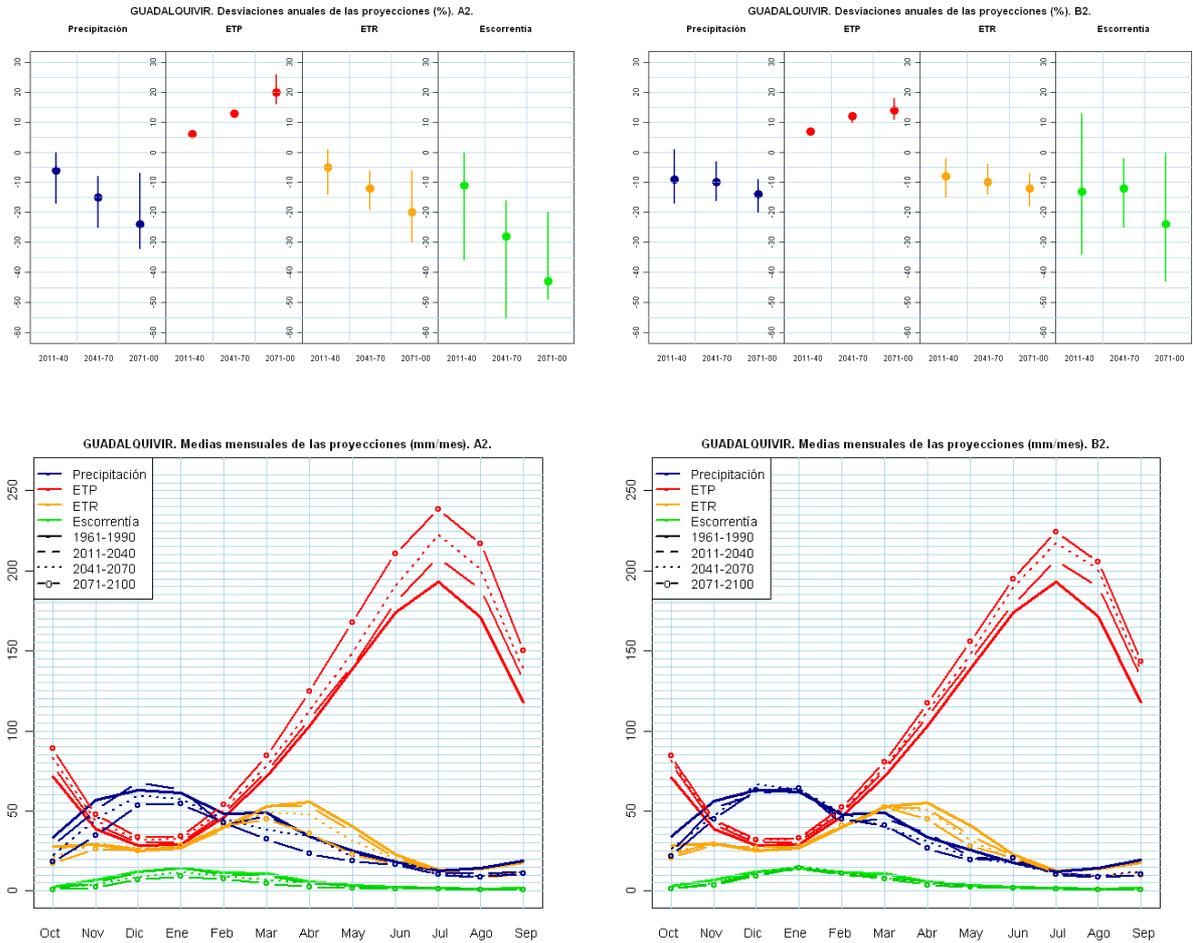


Figura 176. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Guadalquivir

En la D.H. del Guadalquivir, solo HadCM3-SDSM muestra alguna variación en la previsión de PMX. Conforme avanza el s. XXI, las situaciones de sequía muestran una mejoría respecto al periodo de control, haciéndose menos frecuentes.

## Cuencas Internas de ANDALUCÍA

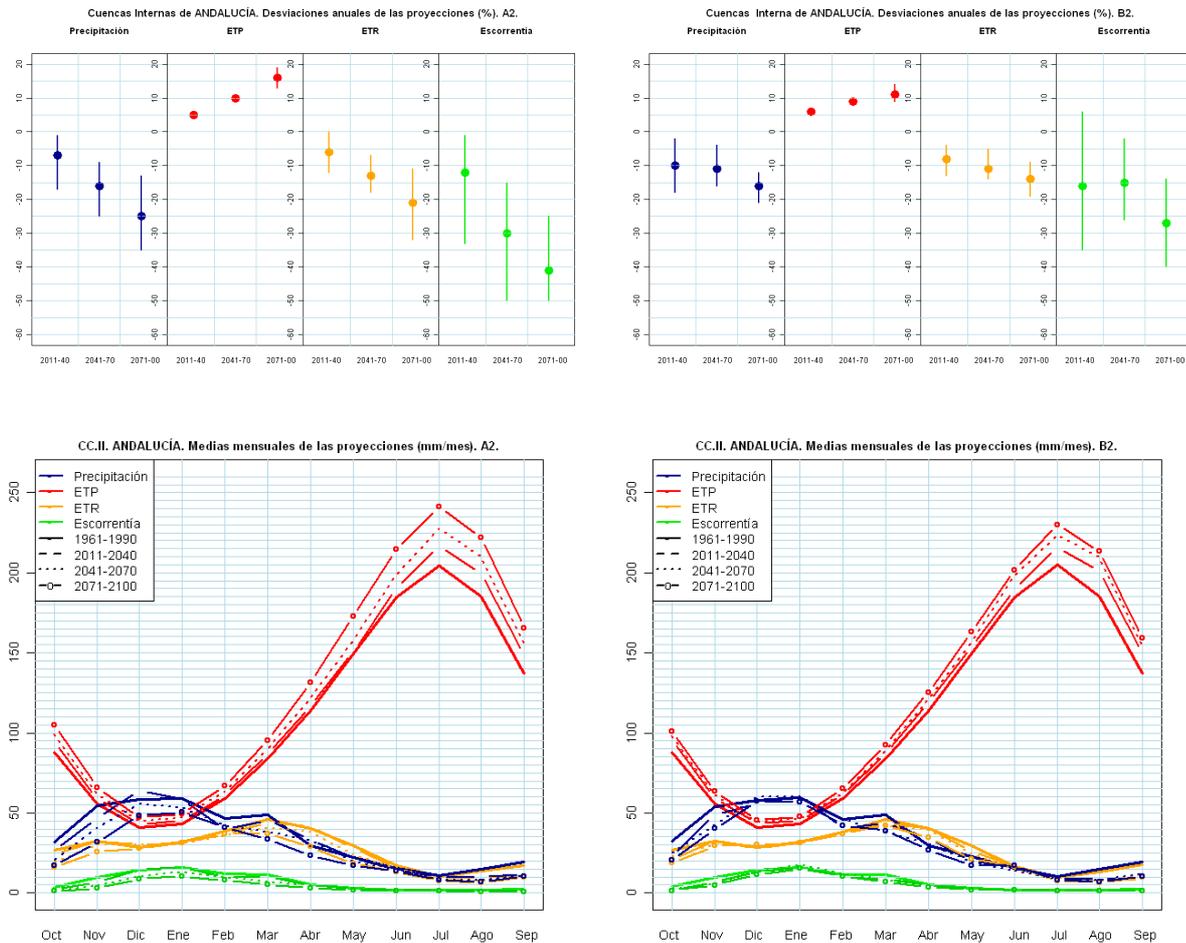


Figura 177. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en las C.I. de Andalucía

En las Cuencas Internas de Andalucía solo CGCM2-FIC dan aumentos en las PMX hacia finales del s. XXI. Las situaciones de sequía también empeoran conforme avanza el siglo, aumentando la frecuencia e intensidad de las mismas.

## Demarcación Hidrográfica del SEGURA

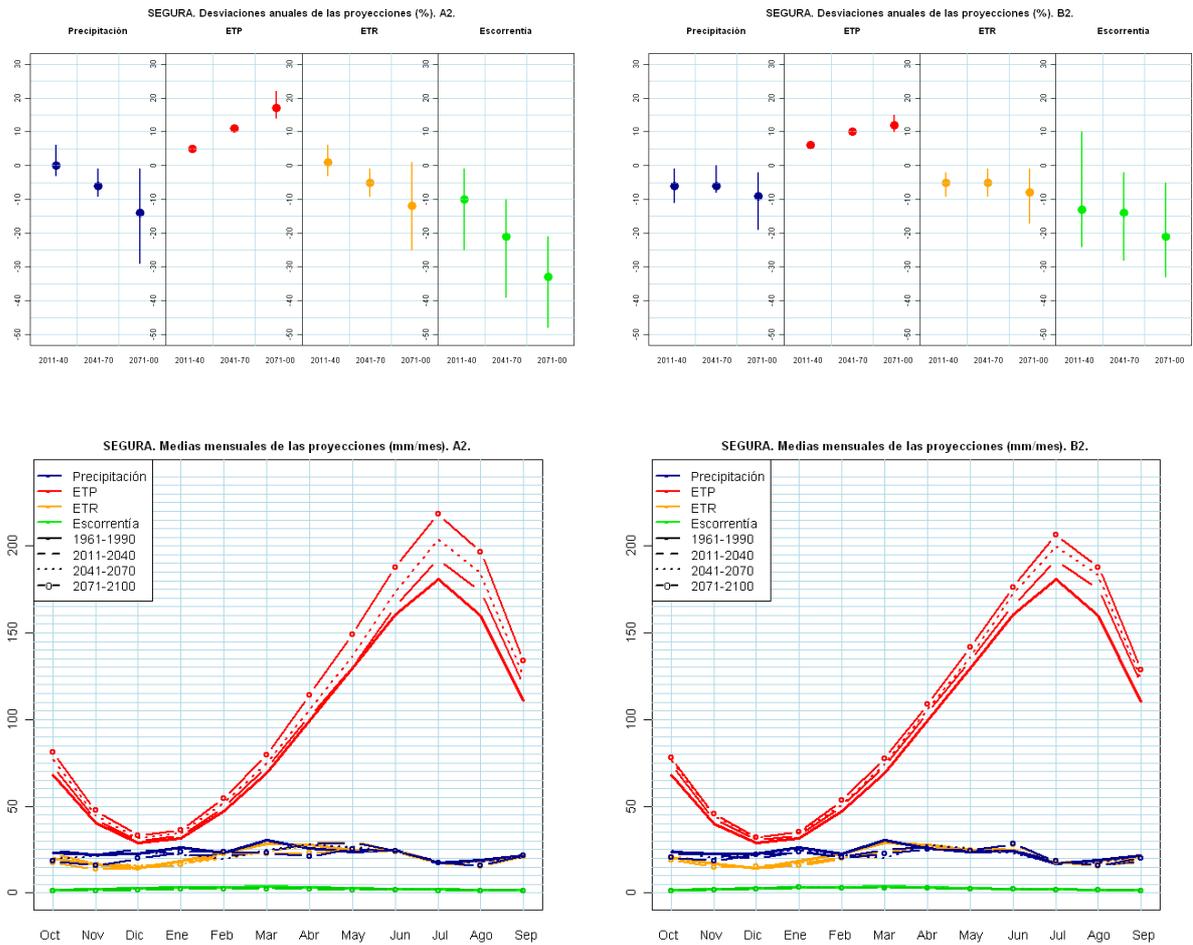


Figura 178. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Segura

En la D.H. del Segura son las proyecciones HadCM3-SDSM y CGCM2-FIC las que dan un aumento de PMX conforme avanza el s. XXI. Las sequías también aumentan su frecuencia e intensidad a lo largo del siglo.

## Demarcación Hidrográfica del JÚCAR

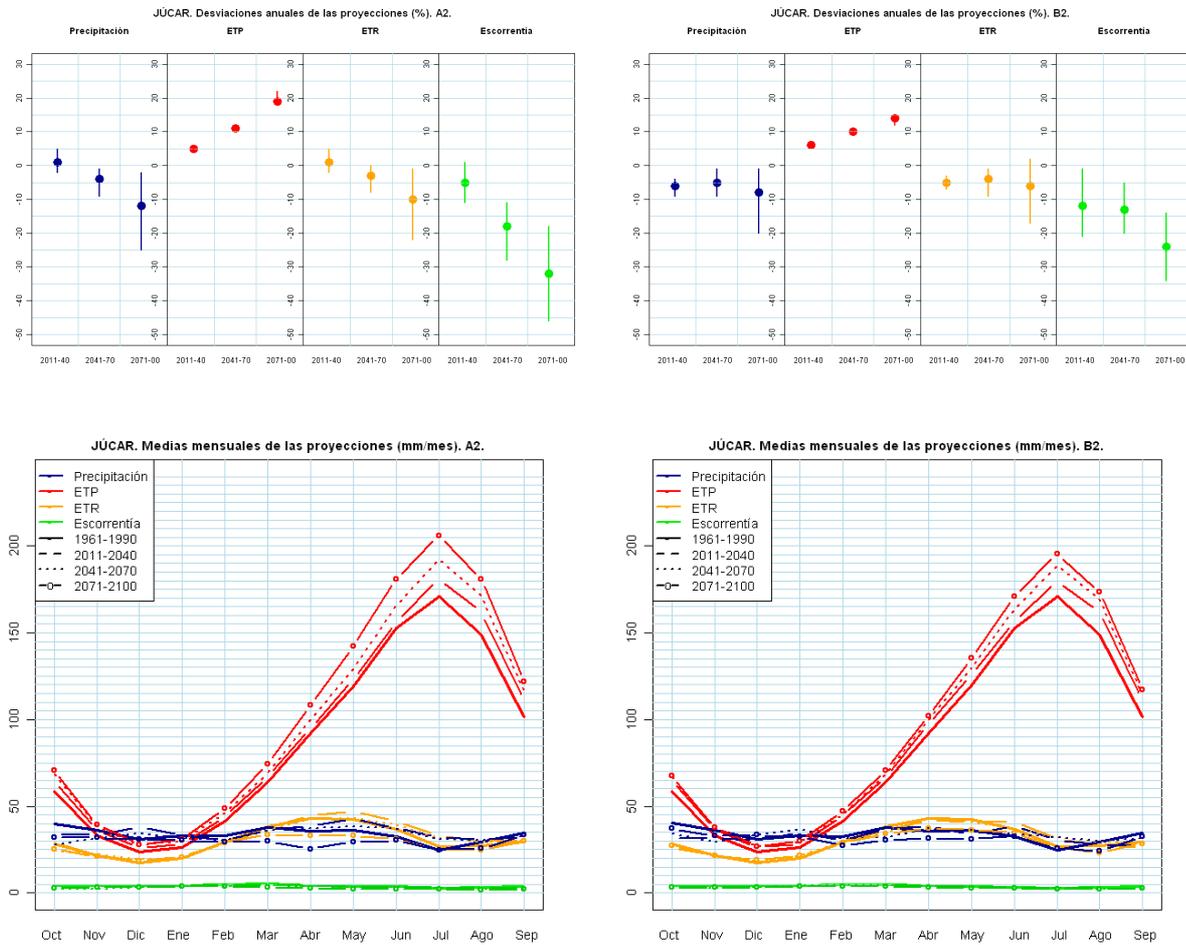


Figura 179. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Júcar

En la D.H. del Júcar, las proyecciones HadAM3-FIC, HadCM3-SDSM y CGCM2-FIC muestran un aumento de la magnitud de PMX en la última mitad del s. XXI. La situación de sequía en cambio muestra una mejoría conforme avanza el siglo, disminuyendo su frecuencia.

## Demarcación Hidrográfica del EBRO

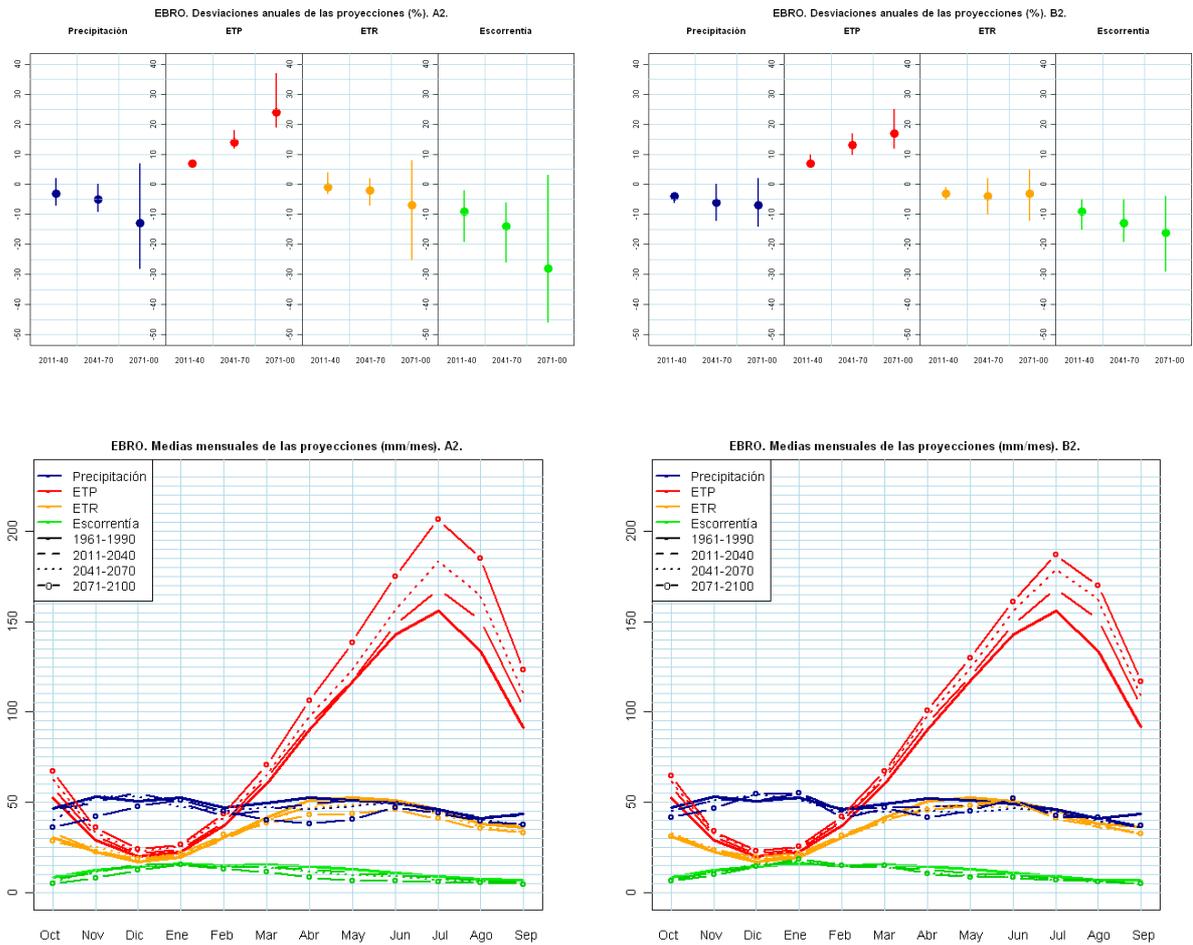


Figura 180. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en la D.H. del Ebro

En la D.H. del Ebro son ECHAM4-FIC, HadAM3-FIC y HadCM3-SDSM en las que aumenta hacia finales del s. XXI la magnitud de las PMX. Aumenta también la frecuencia e intensidad de las sequías a lo largo del siglo.

## Cuencas Internas de CATALUÑA

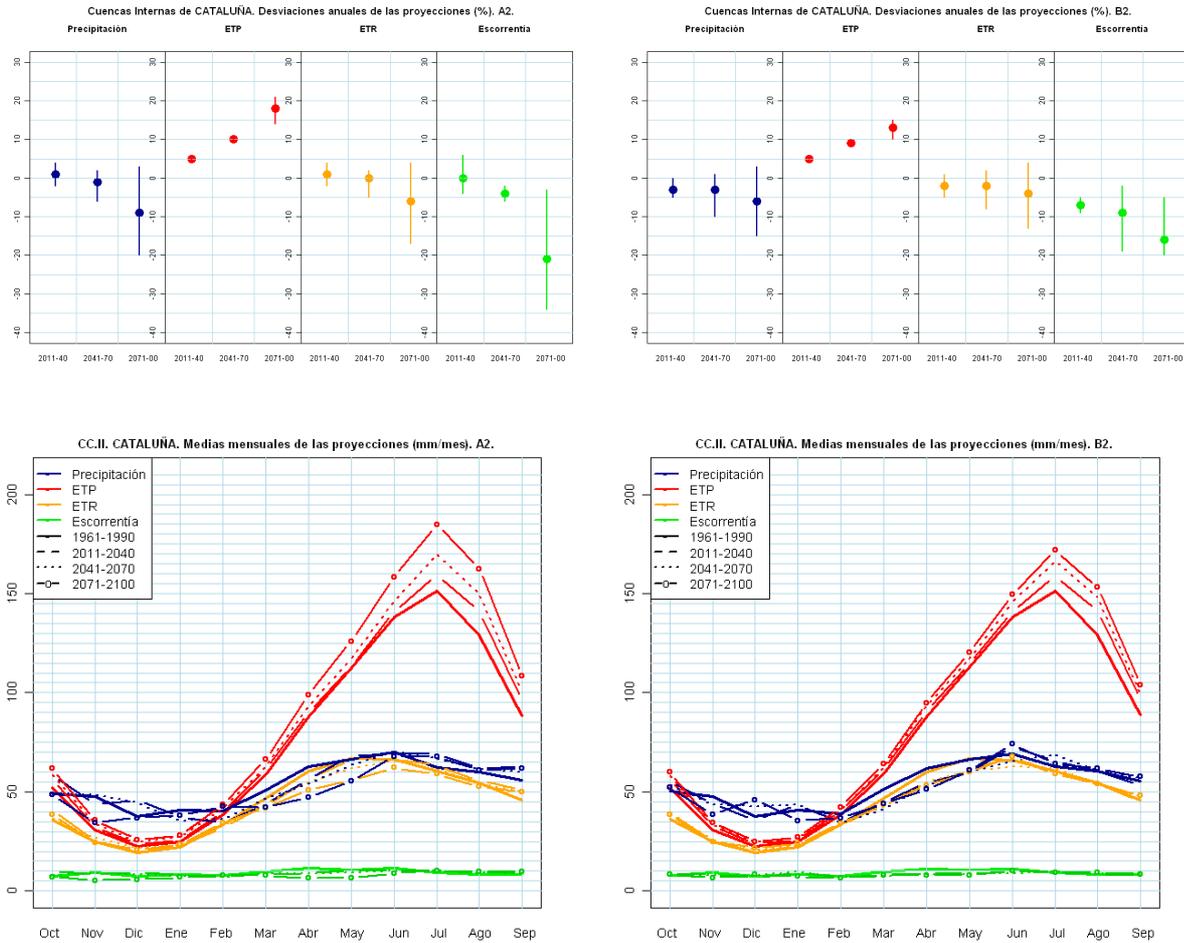


Figura 181. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en las C.I. de Cataluña

Las Cuencas Internas de Cataluña son las únicas en las que parece haber un acuerdo en los resultados que arrojan todas las proyecciones, mostrando todas un aumento de las PMX sobre todo en el último periodo del s. XXI. Las sequías en cambio mejoran su situación conforme avanza el siglo, disminuyendo su frecuencia.

## ISLAS BALEARES

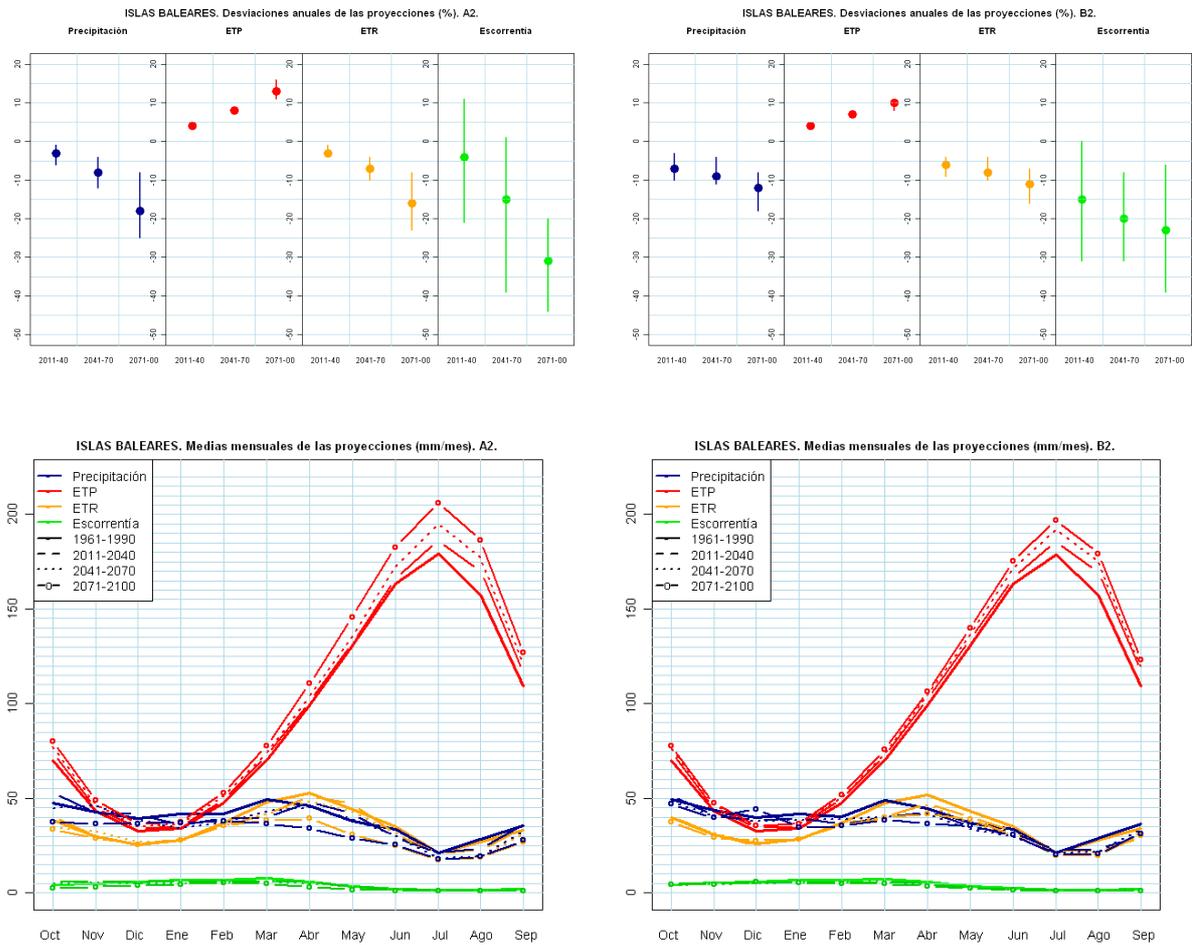


Figura 182. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en las Islas Baleares

En las Islas Baleares solo HadCM3-SDSM muestra cambios en el registro de eventos máximos. La sequías se hacen menos frecuentes a lo largo del s. XXI.

## ISLAS CANARIAS

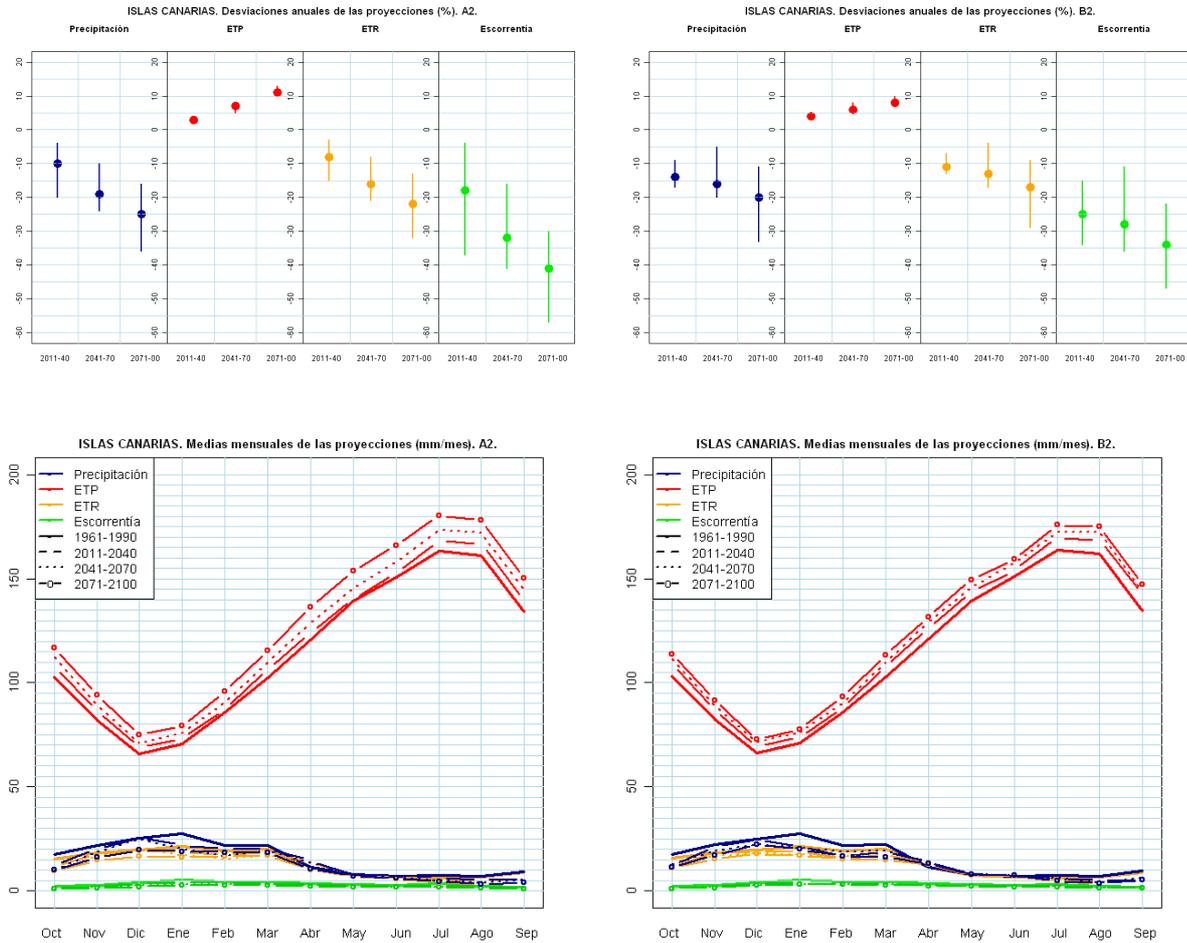


Figura 183. Estimación de la evolución de variables hidrológicas en las Islas Canarias.

No se ha observado en las Islas Canarias una variación clara en la ocurrencia de eventos extremos.

## 9 RECOMENDACIONES

La evaluación del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en España del presente informe se ha realizado utilizando diferentes proyecciones climáticas seleccionadas por AEMET y la OECC. Estas proyecciones se elaboran básicamente en dos pasos. El primero está constituido por la edición de los resultados de algunos modelos de circulación global publicados por el IPCC. Consideran la dinámica de la atmósfera y pueden estar acoplados o no al océano. Los modelos se desarrollan para determinados escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. El segundo paso lo constituye su posterior adaptación regional siguiendo procedimientos estadísticos o dinámicos. El conjunto de las proyecciones utilizadas en este trabajo procedía de resultados publicados con el 3<sup>er</sup> informe de evaluación del IPCC (2001a) y posteriores trabajos de regionalización en España (AEMET, 2008).

La tarea de coordinación y centralización de resultados obtenidos por diferentes instituciones y proyectos internacionales merece ser destacado y valorado. La OECC y la AEMET coordinan la divulgación de información preparada para el estudio del impacto en sectores como los recursos hídricos, lo que conlleva evidentes ventajas prácticas al contar con trabajos de especialistas en procesos atmosféricos y el aval de instituciones de referencia.

Sin embargo, los resultados obtenidos en la simulación de procesos atmosféricos cuentan actualmente con un elevado grado de incertidumbre. Se han comparado en este informe datos de proyecciones y registros observados entre los años 1961 y 1990, revelando importantes diferencias en cuanto a escala, variabilidad y evolución estacional. Especialmente en el caso de la PRE, básica en el desencadenamiento de procesos del ciclo hidrológico, hay una falta de acuerdo notable con repercusiones en la fiabilidad del análisis de impacto. En este informe, se adoptó finalmente un procedimiento directo de análisis que sustituía los datos reales por los simulados de las proyecciones durante el periodo de control, con la finalidad de evaluar el impacto por medio de la comparación entre los pronósticos del s. XXI y los datos simulados en ese periodo de control. Finalmente, los índices de impacto se evalúan para trasladarlos a los datos reales.

Como consecuencia de lo anterior se podrían extraer un par de recomendaciones. La primera se refiere a la agilización de la difusión de resultados con mejoras en la simulación de procesos atmosféricos y su regionalización. El IPCC ya ha actualizado esas estimaciones en su 4<sup>o</sup> informe (2007), incluyendo un amplio conjunto de escenarios climáticos que incorporan recientes avances científicos en la modelización climática y en el conocimiento y evolución de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, ya hay un considerable número de publicaciones de grupos de investigación que trabajan en la regionalización de esta última información del 4<sup>o</sup> informe de evaluación IPCC, de lo que cabría esperar su pronta disponibilidad para estudios de impacto sectorial.

Por otro lado, debido a las implicaciones que aparecen en cuanto a la fiabilidad de los resultados, sería recomendable ampliar el periodo de control al máximo posible y así poder comprobar el grado de representatividad de diferentes aspectos de las series temporales. El periodo de planificación hidrológica que actualmente se utiliza en España abarca al menos desde 1940, lo que permite seleccionar, en cada región hidrológica, periodos y secuencias secas o húmedas. Suponen casi 70 años, cifra superior al doble de los 30 años disponibles en el periodo de control de las proyecciones. Además, estos 30 años entre 1961 y 1990, incluyen la década de los 60 caracterizada en muchas regiones de España por valores de PRE consistentemente superiores a los normales, lo que condiciona la aparición de sesgos en estadísticos. Sería entonces deseable ampliar el periodo de control a periodos temporales de amplitud similar.

Desde otro punto de vista, la ventana temporal de interés de las proyecciones en el s. XXI depende de criterios sectoriales. La instrucción de planificación hidrológica establece la necesidad de realizar evaluaciones del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en horizontes temporales más próximos que los disponibles en algunas proyecciones que, únicamente, aportan información a partir del año 2070. Por tanto, a la recomendación de ampliar el periodo de control, se añade la de disponer de datos de proyecciones para el s. XXI completo.

El análisis de impacto en recursos hídricos se ha realizado asumiendo la hipótesis de equiprobabilidad de las proyecciones con las que se ha trabajado. Asimismo, la variabilidad de las proyecciones representaría la incertidumbre de la simulación de procesos. En este informe se han mostrado diferentes criterios que indicarían la falta de ajuste entre estas hipótesis. La calidad del ajuste varía en función de la proyección y de la región y, la magnitud de los sesgos en escala y estacionales, invitan a pensar que son mayores las incertidumbres en la simulación de procesos atmosféricos que la representada por la variabilidad del conjunto de proyecciones. Consecuentemente, se sugiere avanzar en la investigación de la fiabilidad regional de las proyecciones con las que realizar estudios de impacto sectorial y en la incertidumbre de los procesos atmosféricos simulados.

Aunque se ha tratado también anteriormente, la evaluación de impacto sectorial se beneficia de la coordinación realizada por la OECC y AEMET. El volumen de información de las proyecciones climáticas es enorme y hace necesario que cualquier usuario deba desarrollar herramientas de lectura y procesamiento de información. Se entiende que el nivel más básico, la homogeneización de formatos, ya ha sido prácticamente resuelto, aunque en este informe se hayan destacado diferencias entre proyecciones. En todo caso, sería de gran utilidad disponer de programas y herramientas para el tratamiento de los datos de las proyecciones a diferentes escalas temporales.

Por último, un aspecto a destacar es la posibilidad de seguir utilizando la estructura de tratamiento de información desarrollada en el CEH del CEDEX para la elaboración de trabajos similares. Ésta comprendería herramientas para la lectura y organización en base de datos de las series temporales regionalizadas, en formato serie-estación (proyecciones FIC y SDSM) o matricial (proyecciones PRUDENCE), la implementación de modelos hidrológicos y técnicas de análisis estadístico y la producción final de los indicadores de impacto en varias facetas del ciclo hidrológico: recursos hídricos, crecidas y sequías. Estas 3 líneas principales son materia de desarrollo en el CEH por su uso en otros trabajos específicos, aspecto del que podrían beneficiarse posteriores evaluaciones del impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico.

## 10 EQUIPO DE TRABAJO

El presente informe ha sido elaborado por el Área de Recursos Hídricos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. El equipo de participantes estuvo compuesto por Luis Miguel Barranco Sanz, Técnico Superior de Proyectos, Ángela Potenciano de Las Heras como personal de investigación y el abajo firmante y director del trabajo.

Madrid, diciembre de 2010

El director del trabajo

Examinado y conforme

D. Javier Álvarez Rodríguez  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

D. Antonio Jiménez Álvarez  
Jefe de Área de Recursos Hídricos

## 11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACA, 2008. Avaluació de l'impacte produït pel canvi climàtic sobre els recursos hídrics a les conques de capçalera de la Muga i el Francolí. Agència Catalana de l'Aigua. [http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/publicacions/impactes\\_hidrologics/capitol12\\_lowress.pdf](http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/publicacions/impactes_hidrologics/capitol12_lowress.pdf)
- AEMET, 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. VV.AA. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 978-84-8320-470-2
- Akhtar, M.; Ahmad, N. y Booij, M.J. 2008. The impact of climate change on the water resources of Hindukush–Karakorum–Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *Journal of Hydrology*, 355: 148-163.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/>.  
<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
- Álvarez, J; Sánchez, A.; Quintas, L 2004. SIMPA, a GRASS based tool for Hydrological Studies. *International Journal of Geoinformatics*. Volume 1, no 1 marzo 2005. Association for Geoinformation Technology. Proceedings of the FOSS/GRASS Users Conference - Bangkok, Thailand, 12-14 September 2004
- American Meteorological Society-AMS. Glossary of Meteorology. Consulta online: <http://msglossary.allenpress.com/glossary/search?id=model-output-statistics1>
- Ardiles, L. y Ferrer, F. J., 1994. Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. *Ingeniería Civil/95*, pp 87-100.
- Arenillas, M., Cobos, G. y Navarro, J., 2008. Datos sobre la nieve y los glaciares en las cordilleras españolas. El programa EHRIN (1984-2008). *MARM*, 231 pp.
- Arona, K.A. 2002. The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of Hydrology*, 265: 164-177.
- Ayala-Carcedo, F.J. e Iglesias, A. 1996. Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular. *ITGE. Tecnoambiente*, 64: 43-48.
- Ayala-Carcedo, F.J. e Iglesias, A., 2000. Impactos del posible Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España Peninsular. In Balairón edit., *El Cambio Climático, El Campo de las Ciencias y las Artes*, Servicio de Estudios del BBVA, Madrid, 201-222
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds., 2008. *El Cambio Climático y el Agua*. Documento Técnico VI del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 pp.
- Budyko, M.I. 1974. *Climate and life*. Academic Press, San Diego.
- Cabezas, F., 2004. Cambio climático y recursos hídricos en la planificación hidrológica. *Ingeniería y territorio*, 68: 10-15.
- CHE, 2005. Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro. Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Ministerio de Medio Ambiente
- Christensen, J.H. and Christensen, O.B. 2003. Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421, 805

- Cobos, G.; Mora, J.; Ferrer, C.; Arenillas, M., 2006. Gestión y previsión de los recursos hídricos almacenados en forma de nieve en las cordilleras españolas. III congreso de ingeniería civil, territorio y medio ambiente.
- Conover, W. J., 1971. Practical nonparametric statistics. New York: John Wiley & Sons. 234 pp.
- Conover, W. J.; Johnson, M. E.; Johnson, M. M, 1981. A comparative study of tests for homogeneity of variances, with applications to the outer continental shelf bidding data. Technometrics 23, 351–361.
- Correa, J. C.; Iral, R.; Rojas, L, 2006. Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. Revista Colombiana de Estadística, v. 29, nº 1. 57-76
- Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación Texto pertinente a efectos del EEE. Diario Oficial nº L 288 de 06/11/2007 p. 0027 - 0034
- DGC, 1997. Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España en la España peninsular. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento, Madrid. 28 p.
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., and McVicar, T. R., 2007. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 983-995
- EC, 2009. Guidance Document no. 24. River Basin management in a changing climate. Technical Report 2009 040. European Commission. DG Environment
- EC, 2007a. Water Scarcity and Droughts, in-depth Assessment. Second Interim Report. June 2007. European Commission. DG Environment
- EC, 2007b. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union. July 18, 2007. European Commission. DG Environment
- EC, 2007c. Drought management plan report. Including agricultural, drought indicators and climate change aspects. Technical Report 2008 023. European Commission. DG Environment
- EEA, 2008: Impacts of Europe's changing climate-2008 indicators-based assessment. EEA report No 4/2008
- Estrela, T.; Cabezas, F. y Estrada, F. 1999. La evaluación de recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. Ingeniería del Agua. Volumen 6. Nº 2. Junio 1999: 125 - 138
- Estrela, T.; Ferrer, M. y Ardiles, L. 1995. Estimation of precipitation-runoff regional laws and runoff maps in Spain using a Geographical Information System. International Hydrological Programme (IHP). UNESCO FRIEND AMHY. Thessaloniki, Greece. 1995
- Estrela, T., 1992. Modelos Matemáticos para la Evaluación de Recursos Hídricos. Monografías CEDEX M- 25. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Fomento
- Etoh, T.; Murota, A.; Nakanishi, M, 1987. SQRT Exponential Type Distribution of Maximum. En Hydrologic Frequency Modelling. Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analyses, 14-17 Amy, 1986. Louisiana State University, Baton Rouge, USA. Editado por Vijay P Singh. Reidel Publishing Company. pp. 253-264
- Fernández Carrasco, P. 2002. Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos: Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España. Tesis Doctoral. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Univ. Politécnica de Madrid.

- Fernández, B. y Salas, J. D., 1999a. Return period and risk of hydrologic events. I: Mathematical formulation. *J. Hydrol. Eng. ASCE* 4(4), 297–302
- Fernández, B. y Salas, J. D., 1999b. Return period and risk of hydrologic events. II: Applications. *J. Hydrologic Eng.*, 4(4), 308–316
- Ferrer, F. J; Ardiles, L, 1994. Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. *Ingeniería Civil*, nº 95, pp 87-100.
- Ferrer, J, 1992. Análisis Estadístico de Caudales de Avenida. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Serie Monografías del MOPT, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, nº 26. Madrid
- Ferrer, J, 1996. El modelo de función de distribución SQRT-ET máx en el análisis regional de máximos hidrológicos: aplicaciones a las lluvias diarias. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Frich, P.; Alexander, L. V.; Della-Marta, P.; Gleason, B.; Haylock, M.; Klein Tank, A. M. G.; Peterson, T, 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, Vol. 19, pp. 193–212
- Fujihara, Y.; Tanaka, K.; Watanabe, T.; Nagano, T. y Kojiri, T. 2008. Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in Turkey: Use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations. *Journal of Hydrology*, 353: 33– 48.
- Gardner, L.R., 2009. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff. *Journal of Hydrology*, 379: 351-359.
- Garrote, L.; de Lama, B. y Martín, F. 2007. Previsiones para España según los últimos estudios de cambio climático. En: *El Cambio Climático y sus consecuencias en el Sector del Agua*. Ed. Aqualia-Univ. Rey Juan Carlos: 3-15.
- Giorgi, F., Bi, X. Q. and J. Pal, 2004. Mean, interannual variability and trend in a regional climate change experiment over Europe. II: Climate change scenarios 2071–2100. *Clim. Dynam.*, 23, 839-858.
- GRASS Development Team, 2007. GRASS 6.2 Users Manual. ITC-irst, Trento, Italy. Electronic document: [http://grass.osgeo.org/grass62/manuals/html62\\_user/](http://grass.osgeo.org/grass62/manuals/html62_user/)
- GRASS Development Team, 2008. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://grass.osgeo.org>
- Hargreaves G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 120, No. 6, pp. 1132-1139, Nov./Dec. 1994
- Hargreaves, G. H. y Allen, R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1):53-63
- Hay, L.E. y Clark, M.P. 2003. Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States. *Journal of Hydrology*, 282: 56–75
- Hay, L.E.; Clark, M.P.; Wilby, R.L.; Gutowski, W.J.; Leavesley, G.H.; Pan, Z.; Arritt, R.W. y Takle, E.S. 2002. Use of regional climate model output for hydrologic simulations. *Journal of Hydrometeorology*, 3 (5): 571–590
- Hipel, K. W.; McLeod, A. I, 1994. *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental System*. Amsterdam, Elsevier, 1994, XXXII. ISBN 0-444-89270-2. 1013 pp.
- Hofierka, J, Parajka J, Mitsova M and Mitas L. 2002. Multivariate interpolation of precipitation using regularized spline with tension. *Transactions in GIS* 6: 135-50

- Hong Xu., Corte-Real, J., y Budong Qian, 2007. Developing daily precipitation scenarios for climate change impact studies in the Guadiana and the Tejo basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1161-1173
- Iglesias, A., Garrido A. y Moneo M., 2003. Traducción del Glosario de Hidrología del proyecto Preparación para la Sequía en el Mediterráneo y Planificación para su Mitigación (MEDROPLAN)
- INM, 1995. Informe de España sobre el Cambio Climático. Convenio Marco sobre el Cambio Climático de Naciones Unidas. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología
- INM, 2007. Generación de Escenarios Regionalizados de Cambio Climático para España. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente. 145 pp.
- IPCC, 2001a. Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis. [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar)
- IPCC, 2001b. Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Glosario de términos del Tercer Informe de Evaluación del IPCC (Anexo B). [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar)
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs
- Kilsby, C. G., Tellier, S. S., Fowler, H. J., y Howels, T. R., 2007. Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1175-1189
- Kjellström, E., 2004. Recent and future signatures of climate change in Europe. *Ambio*, 23, 193-198
- Kundzewicz, Z.W.; Robson, A., 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. World Climate Programme – Water. WMO/TD-Nº 1013. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. World Meteorological Organization. Ginebra, mayo 2000.
- Kundzewicz, Z.W.; Radziejewski, M.; Pińskwar I., 2006. Precipitation extremes in the changing climate of Europe. *Clim. Res*, 31, 51–58
- Leander, R. y Buishand, T.A. 2006. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332: 487-496
- Lehner, B.; Czisch, G.; Vassolo, S. 2005. The impact of global change on the hydropower potential of Europe: A model-based analysis. *Energy Policy*, 33: 839-855
- López-Moreno, J.L.; Goyette, S. y Beniston, M., 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374: 384-396
- Llasat, M.C, 2001. An objective classification of rainfall intensity in the Northeast of Spain. *Int. J. Climatol.*, 21, 1385–1400
- MARM 2008. ORDEN ARM/2656/2008 del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. BOE núm 229, de 22 sept 2008: 38472-38582
- McCuen, R, 2003. Modelling Hydrologic Change: Statistical Methods. Lewis Publishers. CRC Press Company
- Mielke, P. W. Jr, 1967. Note on some squared rank tests with existing ties. *Technometrics*, 9/2, 312–314

- Milly, P.C.D. 1994 Climate, soil water storage, and the average annual water balance, *Water Resour. Res.* 30, pp. 2143–2156
- MIMAM, 2000a. Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Medio Ambiente, España. 637 pp.
- MIMAM, 2000b. Documentación Técnica del Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- MIMAM, 2005. Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente, España. 840 pp.
- Mitasova, H. y Mitas, L., 1993: Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation, *Mathematical Geology* ,25, 641-655
- Mitasova, H. y Hofierka, J., 1993: Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis, *Mathematical Geology* 25, 657-667
- Mitas, L., y Mitasova H., 1988, General variational approach to the approximation problem, *Computers and Mathematics with Applications*, v.16, p. -992
- MOPT, 1992. La nieve en las cordilleras españolas. Programa ERHIN. Año 1990/91. 227 pp.
- Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Davis, G.; de Vries, B.; Fenhann, J.; Gaffin, S.; Gregory, K.; Grübler, A.; Jung, T.Y.; Kram, T.; La Rovere, E.L.; Michaelis, L.; Mori, S.; Morita, T.; Pepper, W.; Pitcher, H.; Price, L.; Riahi, K.; Roehrl, A.; Rogner, H-H.; Sankovski, A.; Schlesinger, M.; Shukla, P.; Smith, S.; Swart, R.; van Rooijen, R.; Victor, N.; Dadi, Z. 2000. IPCC Special Report on Emission Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Neteler, M. y Mitasova, H., 2004, Open Source GIS: A GRASS GIS Approach, Second Edition, Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, 773, Kluwer Academic Press / Springer, Boston, Dordrecht, 424 pp.
- Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica
- PRUDENCE. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Project EVK2-CT2001-00132 in the EU 5th Framework program for Energy, environment, and sustainable development. <http://prudence.dmi.dk/>
- Quintas Ripoll, L. 1996. La base de datos hidrológicos HIDRO del CEDEX. Ingeniería Civil, N° 104. Ministerio de Fomento. Madrid
- Ruiz García, J.M. 1999. Modelo distribuido para la Evaluación de Recursos Hídricos. Monografía del CEDEX, M-67, Ministerio de Fomento. Publicación de la Tesis Doctoral.
- Sáez Castillo, A.J., 2009. Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los periodos de retorno mediante R  
<http://www4.ujaen.es/~ajsaez/informe.html>.  
<http://www4.ujaen.es/~ajsaez/informe.html>
- Salas, J. D., C. Fu, A. Cancelliere, D. Dustin, D. Bode, A. Pineda, E. Vincent, 2005. Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado, *J. of Water Resources Planning and Management*, doi: 10.1061/(ASCE)0733 9496(2005)131:5(383)
- Schreiber, P. 1904. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. *Z. Meteorol.* 21: 441–452.
- Singh, P. y Singh, V.P., 1999. Snow and glacial hydrology. *Water Science and Technology Library* Vol 37. Kluwer Ac. Pub. 742 pp.

- Steele-Dunne, S.; Lynch, P.; McGrath, R.; Semmler, T.; Wang, S.; Hanafin, J. y Nolan, P. 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of Hydrology*, 356: 28-45.
- Sordo, C.M. 2006. Técnicas Estadísticas para la Proyección Local de la Predicción Meteorológica Estacional. Métodos, Validación y Estudios de Sensibilidad. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.
- Sumner, G. N.; Romero, R.; Homar, V.; Ramis, C.; Alonso, S.; Zorita, E., 2003. An estimate of the effects of climate change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late 21st century. *Climate Dynamics*. 20, pp. 789-805
- SWURVE. Sustainable Water: Uncertainty, Risk and Vulnerability in Europe. Project EVK1-CT2000-00075 in the EU 5th Framework program for Energy, environment, and sustainable development. <http://www.ncl.ac.uk/swurve/>
- Témez, J.R., 1977. Modelo matemático de transformación "precipitación-aportación". ASINEL. 26 pp.
- The R Foundation for Statistical Computing, 2008. R version 2.6.2. Copyright © 2008 The R Project for Statistical Computing <http://www.r-project.org/>
- UNESCO. Glosario Hidrológico Internacional. Consulta online: <http://hydrologie.org/glu/aglo.htm>
- U.S. Army Corps of Engineers, 1956. Snow Hydrology, Summary Report on the Snow Investigations, North Pacific Div., Portland, Oregon
- USGS 2000. Water: The Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the U.S. 151 pp.
- Viner, D. y Hulme, M. 1997. The climate impacts LINK project. Hadley Centre for climate prediction and research
- WMO, 1986. Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology Report No. 23
- Wood, A.W.; Leung, L.R.; Sridhar, V. y Lettenmaier, D.P. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 62 (1-3): 189-216
- <http://prudence.dmi.dk/>
- Zurita, E, 2006. Análisis estadístico del cambio climático. *Revista del Instituto de Estudios Económicos. Mitos y realidades del cambio climático*. nº 3-4, pp. 209-234



## 12 ABREVIACIONES

4AR	Cuarto Informe de Evaluación del IPCC
ACA	Agencia Catalana del Agua. Agència Catalana de l'Aigua
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
C.I.	Cuencas Internas
CEDEX	Centro de Experimentación de Obras Públicas
CEH	Centro de Estudios Hidrográficos
CFC	Cloro-flúor-carbonos
CGCM2	Couple General Circulation Model, versión 2. Modelo Climático Global Atmósfera-Océano de Canadá
D.H.	Demarcación Hidrográfica
ECHAM4	European Centre Hamburgo, versión 4. Modelo Climático Global de Alemania
ERHIN	Evaluación de Recursos Hídricos procedentes de la Innivación
FIC	Fundación para la Investigación del Clima. Método de regionalización por análogos
GEI	Gases de efecto invernadero
HadAM3	Hadley Centre Atmósfera, versión 3. Modelo Climático Global Atmosférico de U.K
HadCM3	Hadley Centre Coupled, versión 3. Modelo Climático Global Acoplado atmósfera-oceano de U.K
IEEE	Escenarios descritos en el Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (SRES)
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
IPH	Instrucción de Planificación Hidrológica
LBAE	Libro Blanco del Agua en España
MCGAO/AOGCM	Modelo Climático Global acoplado Atmósfera-Océano
MCR/RCM	Regional Circulation Model. Modelo Climático de Circulación Regional
OECC	Oficina Española del Cambio Climático
OMM	Organización Meteorológica Mundial

OPYC3	Ocean model in isopycnic Coordinates. Modelo oceánico de circulación global
PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
PROMES	MCR de la UCM
PRUDENCE	Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects
RCAO	MCR del Rossby Centre de Suecia
SDSM	Statistical DownScaling Method. Método estadístico de proyección regional
SRES	Special Report on Emission Scenarios (IEEE)
SWURVE	Sustainable Water: Uncertainty, Risk and Vulnerability in Europe
TAR	Tercer Informe de Evaluación del IPCC
UCM	Universidad Complutense de Madrid

***Proyecciones climáticas:***

CA	CGCM2-FIC-A2
CB	CGCM2-FIC-B2
EA	ECHAM4-FIC-A2
EB	ECHAM4-FIC-B2
HA	HadAM3-FIC-A2
HB	HadAM3-FIC-B2
PA	ECHAM4-RCAO-A2 (PRUDENCE-SMHI)
PB	ECHAM4-RCAO-B2 (PRUDENCE-SMHI)
SA	HadCM3-SDSM-A2
SB	HadCM3-SDSM-B2
UA	HadCM3-PROMES-A2 (PRUDENCE-UCM)
UB	HadCM3-PROMES-B2 (PRUDENCE-UCM)

### 13 SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Definición</u>	<u>Unidad de medida</u>
$\Delta$	Desviación, incremento o variación de la variable.	%
APN	Aportación.	Hm <sup>3</sup>
EMR	Error medio relativo.	%
ESC	Escorrentía.	mm
ETP	Evapotranspiración potencial.	mm
ETR	Evapotranspiración real.	mm
HMS	Humedad del suelo.	mm
PRE	Precipitación.	mm
PMX	Precipitación máxima diaria. Es la máxima de las precipitaciones diarias registradas, en un mes o en un año.	mm/día
R <sub>A</sub>	Radiación solar extraterrestre.	cal/cm <sup>2</sup> día
REC	Recarga de los acuíferos.	mm
T	Periodo de retorno	años
TEM	Temperatura media.	°C
TMN	Temperatura mínima. Es la media de las temperaturas mínimas diarias.	°C
TMX	Temperatura máxima. Es la media de las temperaturas máximas diarias.	°C



## 14 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Los términos de éste glosario se basan en definiciones extraídas de la siguiente información reseñada en el apartado de bibliografía: “Glossary of Meteorology” de la AMS; Iglesias et al., 2003; IPCC, 2001b, “Internacional Glossary of Hydrology” de la UNESCO y del LBAE (MIMAM, 2000a).

### Acuífero

Estrato de roca permeable que contiene agua. Un acuífero no confinado se recarga directamente por medio del agua de lluvia, ríos y lagos, y la velocidad de la recarga se ve influenciada por la permeabilidad de las rocas y suelos en las capas superiores. Un acuífero confinado se caracteriza por un manto superior que es impermeable y por lo tanto las lluvias locales no afectan el acuífero.

### Aportación

La aportación de un río en un punto de la red fluvial es el volumen de agua que pasa por él durante un periodo de tiempo.

### Cambio climático

Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su *variabilidad*, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes *antropogénicos* en la composición de la *atmósfera* o en el *uso de las tierras*. Se debe tener en cuenta que la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMCC), en su Artículo 1, define ‘cambio climático’ como: ‘un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables’. La CMCC distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales. Véase también *Variabilidad climática*.

### Capacidad de almacenamiento en suelo

Agua retenida en el suelo que puede pasar a formar parte de la escorrentía. Este término está también relacionado con la *capacidad de regulación del suelo*: Capacidad del suelo para adsorber e infiltrar el agua procedente de precipitaciones, reducir avenidas y probablemente aumentar el volumen de agua subterránea, aumentando de esta manera el nivel piezométrico del acuífero y el caudal del río. La capacidad de regulación del suelo se mide en base al tipo de suelo, a sus características físicas, al porcentaje de pendientes y al uso actual del suelo.

### Caudal

Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo. En este informe se utilizan los términos:

**Caudal medio mensual:** Media aritmética de todos los caudales medios mensuales para un mes dado, en el período considerado.

**Caudal máximo:** En hidrología se asocia al término caudal máximo instantáneo, que sería el pico máximo de caudal para un hidrograma dado, se expresan en m<sup>3</sup>/s.

### Ciclo hidrológico

Sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación.

### Cobertura de nieve

*Masa de nieve:* acumulación estacional de nieve en las zonas montañosas que supone un importante aporte a la escorrentía de una cuenca tras el deshielo.

## Correlación

Estudio de las relaciones entre dos o más variables. Dos variables están efectivamente correlacionadas cuando a determinados valores tomados por una corresponden en la otra valores ligados a los de la primera dentro de un campo de variación fijo cuya amplitud se puede determinar.

## Cuenca

*Cuenca*: La zona de drenaje de una corriente, río o lago. *Cuenca de captación*: Área que recoge y desagua agua de lluvia. *Cuenca hidrográfica*: La superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia el mar por una única desembocadura, estuario o delta.

## Distribución de frecuencias

Reorganización total o parcial de la matriz de datos ordenando y/o agrupando los casos de acuerdo con el valor que tienen en una u otra variable. Los elementos que intervienen en una distribución de frecuencias son las clases, el rango y el valor del intervalo o amplitud.

## Distribución de probabilidad

La distribución de probabilidad de una *variable aleatoria* es una función que asigna a cada suceso definido sobre la variable aleatoria la probabilidad de que dicho suceso ocurra. La distribución de probabilidad está definida sobre el conjunto de todos los eventos o rango de valores de la variable aleatoria. Cuando la variable aleatoria toma valores en el conjunto de los números reales, la distribución de probabilidad está completamente especificada por la función de distribución, cuyo valor en cada dato real  $x$  es la probabilidad de que la variable aleatoria sea menor o igual que  $x$ .

**Distribución normal:** Un caso de distribución de probabilidad es la distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana. La gráfica de la función de densidad de esta distribución normal tiene una forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro (media, desviación típica...). Esta curva se conoce como campana de Gauss. La importancia de esta distribución radica en que permite modelizar numerosos fenómenos.

**Distribución normal estandarizada:** Distribución normal con media 0 y desviación típica 1

## Emisiones

En el contexto de *cambio climático*, se entiende por emisiones la liberación de *gases de efecto invernadero* y/o sus *precursores* y *aerosoles* en la *atmósfera*, en una zona y un período de tiempo específicos.

### Emisiones antropogénicas o emisiones de GEI:

Emisiones de *gases de efecto invernadero*, de *precursores* de gases de efecto invernadero, y *aerosoles* asociados con actividades humanas. Entre estas actividades se incluyen la combustión de combustibles fósiles para producción de energía, la *deforestación* y los *cambios en el uso de las tierras* que tienen como resultado un incremento neto de emisiones.

### Emisiones de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) fósil

Emisiones de *dióxido de carbono* que resultan del consumo de combustibles de depósitos de carbono fósil como el petróleo, gas natural y carbón.

### Emisiones netas de dióxido de carbono

Diferencia entre fuentes y *sumideros* de *dióxido de carbono* en un período dado y en una zona o región específica.

## Equiprobabilidad

Se dice que dos sucesos posibles de un experimento son equiprobables cuando la probabilidad de ocurrencia de ambos sucesos es la misma.

## Escenario climático

O también *escenario de cambio climático*. Representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del *cambio climático antropogénico*, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Las *proyecciones climáticas* sirven a menudo como materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado. Un 'escenario de cambio climático' es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual.

## Escenario de emisiones

Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que son, en potencia, radiativamente activas (por ejemplo, *gases de efecto invernadero* o *aerosoles*), basada en un conjunto de hipótesis coherentes e internamente consistentes sobre las fuerzas impulsoras de este fenómeno (tales como el desarrollo demográfico y socioeconómico, el cambio tecnológico) y sus relaciones clave. Los escenarios de concentraciones, derivados a partir de los escenarios de emisiones, se utilizan como insumos en una *simulación climática* para calcular proyecciones climáticas.

## Escenarios del IEEC (SRES)

Son escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Están referidos en el trabajo de Nakicenovic et al. (2000) y son utilizados, entre otros, como base para la realización de *proyecciones climáticas*.

## Escorrentía

Parte de las precipitaciones que no se evapora o parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo en un curso de agua. En algunos países, la escorrentía abarca únicamente la *escorrentía superficial*. En este informe se utilizan los siguientes términos de escorrentía:

**Escorrentía superficial:** Parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo hasta la corriente más próxima; *escorrentía* de una *cuenca* de desagüe que no ha pasado por debajo de la superficie desde la fase de precipitación.

**Escorrentía subterránea:** Parte de la escorrentía de un curso de agua que, proveniente de un acuífero, ha resurgido en el cauce a través de una fuente o por percolación.

**Escorrentía total:** Suma de todos los componentes de escorrentía (superficial, subsuperficial y subterránea)

Otro término común, aunque no utilizado directamente en este informe es *escorrentía subsuperficial*:

- 1) Parte de la precipitación que no se ha filtrado hasta el nivel freático, pero que descarga como flujo hipodérmico en los cursos de agua.
- 2) Flujo de agua desde zonas de saturación no permanente, que circula a través de los estratos superiores de una formación a una velocidad muy superior a la normal de la escorrentía subterránea.

## Estacionariedad

Cuando en una serie las diferencias observadas entre distintas observaciones son pequeñas y pueden ser acotadas, se dice que la serie tiene estacionariedad de primer orden. En términos estadísticos, se define un proceso estocástico estacionario como aquella sucesión ordenada de variables aleatorias cuya función de distribución es invariable. Esta definición general de estacionariedad se suele confirmar sólo para el primer y los segundos órdenes; es decir, para la media y la varianza del proceso.

## Evaporación

Proceso por el que un líquido se convierte en gas.

## Evapotranspiración

Proceso combinado de *evaporación* de la superficie terrestre y *transpiración* de la vegetación. En este trabajo se utiliza este término en dos conceptos bien diferenciados como son la *ETR* y *evapotranspiración potencial*:

**ETR:** Suma de las cantidades de agua evaporadas del suelo y de las plantas cuando el terreno se encuentra con su contenido natural de humedad. Se mide en estaciones evapimétricas y se expresa en altura de agua en mm.

**ETP:** Cantidad máxima de agua capaz de ser evaporada en un clima dado, por una cubierta vegetal continua y bien alimentada de agua. Por lo tanto incluye la evaporación del suelo y la transpiración vegetal en una región específica y en un intervalo de tiempo dado. Se expresa en altura de agua en mm. En el presente informe se ha estimado la *ETP* mediante los métodos de *Penman-Monteith* y *Hargreaves*.

## Eventos extremos / Fenómenos meteorológicos extremos

Fenómeno raro dentro de su distribución estadística de referencia en un lugar determinado. Las definiciones sobre lo que se considera 'raro' pueden variar, pero un fenómeno meteorológico extremo puede ser normalmente tan raro o más raro que el percentil 10º o 90º. Por definición, las características de una meteorología extrema varían según los lugares. Un fenómeno climático extremo es una media de una serie de fenómenos meteorológicos en un período concreto, media que de por sí es extrema (por ejemplo la precipitación durante una estación). En este trabajo se han considerado eventos extremos aquellas precipitaciones que son susceptibles de generar inundaciones y los eventos de sequía.

## Frecuencia

Número de veces, a lo largo de un determinado periodo de tiempo, que puede producirse un fenómeno (en *estadística*, un dato, elemento de la muestra, etc.).

## Gas de efecto invernadero (GEI)

Gases integrantes de la *atmósfera*, de origen natural y *antropogénico*, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de *radiación infrarroja* emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), *dióxido de carbono* (CO<sub>2</sub>), *óxido nítrico* (N<sub>2</sub>O), *metano* (CH<sub>4</sub>), y *ozono* (O<sub>3</sub>) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los *halocarbonos* y otras sustancias que contienen cloro y bromuro, de las que se ocupa el *Protocolo de Montreal*. Además del CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, y CH<sub>4</sub>, el *Protocolo de Kyoto* aborda otros gases de efecto invernadero, como el *hexafluoruro de azufre* (SF<sub>6</sub>), los *hidrofluorocarbonos* (HFC), y los *perfluorocarbonos* (PFC).

## Humedad del suelo

Cantidad de agua almacenada dentro o en la superficie de las tierras que se encuentra disponible para la evaporación. O también humedad contenida en la porción de suelo por encima del nivel freático, incluyendo el vapor de agua presente en los poros del suelo.

## Impactos (climáticos)

Consecuencias del *cambio climático* en *sistemas humanos* y naturales. Según la medida de la *adaptación*, se pueden distinguir impactos potenciales e impactos residuales. *Impactos potenciales*: Todos los impactos que pueden suceder dado un cambio proyectado en el clima, sin tener en cuenta las medidas de *adaptación*. *Impactos residuales*: Los impactos del cambio climático que pueden ocurrir después de la adaptación.

## Índices climáticos

En este informe se ha utilizado el término para definir sencillas operaciones estadísticas que permiten representar, en forma de valor cuantificable, determinadas características de una serie de datos meteorológicos (temperatura y precipitación, fundamentalmente) y que ayudan a comprender su relación o influencia en la ocurrencia de determinados eventos hidrológicos y climáticos (avenidas, rachas húmedas o secas, deshielo, etc.) Ejemplo de los índices aplicados en este trabajo son el R95T.

## Infiltración

Flujo de agua que penetra en la zona no saturada a través de la superficie del suelo. Si el flujo se infiltra por debajo de la zona radicular del suelo y llega a alcanzar la zona saturada se conoce como infiltración eficaz o recarga del acuífero.

## Intensidad de precipitación

La intensidad de precipitación viene representada por la cantidad de precipitación en mm. recogida en un día y se mide por tanto en mm/día.

## Medidas de dispersión

*Varianza.* Media aritmética de los cuadrados de las desviaciones individuales de los valores de una serie dada.

*Desviación estándar o típica.* Raíz cuadrada de la varianza. O, si se quiere, raíz cuadrada, de la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones individuales de los valores de una serie dada.

*Coefficiente de variación.* Desviación estándar, DE, de la variable expresada en porcentaje de su media aritmética, MA. Es decir,  $CV = DE * 100 / MA$ .

## Medidas de tendencia central (promedios)

*Media.* Suma de los valores de todos los casos de la variable y división por el número de casos.

*Mediana.* Medida que indica el centro de la distribución de una variable dada.

*Moda.* valor o categoría de la variable que presenta las mayores frecuencias.

## Modelos Climáticos Globales o Modelos de Circulación General (MCG)

Modelos matemáticos que simulan el clima en el conjunto del planeta, aportando valores de diferentes variables climáticas en cada una de las celdas tridimensionales en las que se discretiza el globo terráqueo.

### Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (MCGAO)

Son aquellos modelos climáticos globales en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos. En el módulo atmosférico, por ejemplo, se resuelven ecuaciones que describen la evolución a gran escala del impulso, el calor y la humedad. Se resuelven ecuaciones similares con respecto a los océanos. Actualmente, la resolución de la parte atmosférica de un modelo típico es de aproximadamente 250 km en línea horizontal y de alrededor de 1 km en línea vertical por encima de la capa límite. La resolución de un modelo oceánico corriente oscila aproximadamente entre 200 y 400 m en línea vertical, con una resolución horizontal de entre 125 y 250 km.

## No linealidad

Un proceso se denomina 'no lineal' cuando no existe una relación simple proporcional entre causa y efecto. El *sistema climático* contiene muchos procesos no lineales, lo que le convierte en un sistema con un comportamiento muy complejo. Dicha complejidad puede llevar a un rápido *cambio climático*.

## Parametrización

En las *simulaciones climáticas*, este término se refiere a las técnicas de representación de los procesos que no pueden ser resueltos de forma explícita en la resolución espacial o temporal de la simulación.

## **Periodo de control**

Periodo utilizado para contrastar los datos observados (medidos) y simulados. En este informe se utiliza como periodo de control el comprendido entre los años 1961-1990

## **Precipitación**

Toda partícula acuosa en fase líquida o sólida que se origina en la atmósfera y cae sobre la superficie de la tierra. Normalmente se expresa como altura de agua líquida caída en un punto (mm) en un periodo de tiempo dado. En este informe se utilizan los términos de precipitación anual, mensual y máxima diaria (mm), así como desviaciones de precipitación (%), precipitación estandarizada y precipitación estacional.

## **Predicción climática**

Resultado de un intento de producir la descripción o la mejor estimación de la evolución real del clima en el futuro (a *escalas temporales* estacionales, interanuales o a largo plazo). Véase también *Proyección climática* y *Escenario (de cambio) climático*.

## **Proyección climática**

Proyección de la *respuesta del sistema climático* a *escenarios de emisiones* o concentraciones de *gases de efecto invernadero* y *aerosoles*, o *escenarios de forzamiento radiativo*, basándose a menudo en *simulaciones climáticas*. Las proyecciones climáticas se diferencian de las *predicciones climáticas* para enfatizar que las primeras dependen del escenario de forzamientos radioactivo/emisiones/concentraciones/radiaciones utilizado, que se basa en hipótesis sobre, por ejemplo, diferentes pautas de desarrollo socioeconómico y tecnológico que se pueden realizar o no y, por lo tanto, están sujetas a una gran *incertidumbre*.

## **Radiación solar**

Radiación emitida por el Sol. También se denomina radiación de onda corta. La radiación solar tiene una gama específica de longitudes de onda (espectro) determinado por la temperatura del Sol.

## **Recarga de agua subterránea**

Proceso por el que se añade agua externa a la zona de saturación de un *acuífero*, ya sea de forma directa en una formación, o indirecta, por medio de otra formación. En este informe también se utilizan los términos *recarga al acuífero* y *recarga a zona saturada*. La *recarga neta*, como expresión de la recarga efectiva al acuífero.

## **Recursos hídricos**

Agua dulce existente que puede desempeñar diferentes funciones, desde ambientales a ser usada directamente por el ser humano.

## **Recursos hídricos potenciales**

Aquellos recursos hídricos a los que se les ha descontado las restricciones ambientales, socioeconómicas y geopolíticas.

## **Recursos hídricos disponibles**

Aquellos recursos hídricos potenciales a los que se les ha descontado aquéllos con restricciones técnicas para su uso. Serían los que podrían movilizarse para uso humano.

## **Régimen alterado**

Régimen hidrológico de un río en el que intervienen condicionantes debidos a actividad antrópica (regulación, extracción-aporte, o cualquier acción derivada de asentamientos humanos que impacte o altere el régimen hidrológico natural)

## **Régimen natural**

Régimen hidrológico de un río en el que no intervendrían condicionantes debidos a actividad antrópica (regulación, extracción-aporte, o cualquier acción derivada de asentamientos humanos que impacte o altere el régimen hidrológico natural)

## Regionalización

Técnicas de proyección regional (“downscaling”) que trasladan los resultados obtenidos por los modelos climáticos globales a regiones de más detalle considerando las características locales, como la orografía, influencia oceánica, usos de suelo, etc.

## Sequía

Fenómeno que se produce cuando la precipitación ha estado muy por debajo de los niveles normalmente registrados, causando unos serios desequilibrios hidrológicos que afectan de manera adversa a los sistemas terrestres de producción de *recursos*.

## Series temporales

Caso especial de una matriz de datos en la que los datos están ordenados cronológicamente con preferencia a cualquier otro orden.

## Simulación climática

Representación numérica del *sistema climático* basada en las propiedades físicas, químicas, y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de respuesta, que incluye todas o algunas de sus propiedades conocidas. El *sistema climático* se puede representar por simulaciones de diferente complejidad— es decir, que para cualquier componente o combinación de componentes se puede identificar una ‘jerarquía’ de simulaciones, que varían en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el punto en que los procesos físicos, químicos o biológicos se representan de forma explícita, o el nivel al que se aplican las parametrizaciones empíricas. Junto con las simulaciones generales de circulación atmosférica/oceánica/ de los hielos marinos (AOGCM) se obtiene una representación completa del sistema climático. Existe una evolución hacia simulaciones más complejas con química y biología activas. Las simulaciones climáticas se aplican, como herramienta de investigación, para estudiar y simular el clima, pero también por motivos operativos, incluidas las previsiones climáticas mensuales, estacionales e interanuales.

## Simulación hidrológica

Representación numérica del *sistema hidrológico* basada en las propiedades físicas, hidrológicas y climáticas de sus componentes, sus interacciones y procesos de respuesta, que incluye todas o algunas de sus propiedades conocidas. En este trabajo la simulación de procesos hidrológicos se ha basado en la implementación del Sistema Integrado para la Modelización Precipitación Aportación, SIMPA (Ruiz García, 1999)

## Sistema climático

Sistema muy complejo que consiste en cinco componentes principales: la *atmósfera*, la *hidrosfera*, la *criosfera*, la superficie terrestre y la *biosfera*, y las interacciones entre ellas. El *sistema climático* evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna debido a forzamientos externos (por ejemplo, erupciones volcánicas, variaciones solares, y forzamientos inducidos por el hombre tales como la composición cambiante de la atmósfera y el *cambio en el uso de las tierras*).

## Temperatura

Cantidad medida con un termómetro. Los cuerpos en equilibrio termal con otro tienen igual temperatura. En dinámica de fluidos gaseosos, la temperatura representa la energía cinética molecular, consistente con la ecuación de estado, con la presión, como la fuerza media de impactos moleculares, y con la densidad, como el total de masa de moléculas respecto a un volumen. Para un gas ideal, la temperatura es la relación entre la energía interna y la capacidad de calor específica a volumen constante. En este informe se han utilizado, fundamentalmente, los datos de Temperatura máxima media diaria mensual, Temperatura mínima media diaria mensual y Temperatura media anual.

## Transpiración

Proceso por el cual el agua de la vegetación pasa a la atmósfera en forma de vapor.

### **Variabilidad del clima**

La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las *escalas temporales y espaciales*, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del *sistema climático* (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos *antropogénicos* (variabilidad externa). Véase también *Cambio climático*.

### **Volumen del acuífero**

Define la *capacidad de almacenamiento* de un acuífero, y queda determinado por los límites superior (lleno) e inferior (vacío) que alcanza el nivel piezométrico durante su fluctuación. La capacidad de almacenamiento de los acuíferos permite redistribuir volúmenes de agua en el tiempo, los que se pueden aprovechar en periodos de escasez.



**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS