

Resumen del Estudio
EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y
SEQUIAS EN ESPAÑA. INFORME FINAL.
CEDEX -Julio 2017

FEBRERO 2018



Contenido

1. ÁMBITO DE TRABAJO	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y PROYECCIONES	3
3.1. Consideraciones sobre los modelos climáticos y las incertidumbres.	5
3.2. Criterio de selección de las proyecciones en el estudio.	8
3.3. Antecedentes y evolución del conocimiento.	11
4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	14
4.1. Tratamiento y análisis de la proyección.	17
4.2. Obtención de ficheros en formato LEMA.....	17
4.3. Contraste de la proyección en el Periodo de Control:.....	18
4.4. Valoración General del Contraste y el sesgo:.....	18
5. PREPARACIÓN DE DATOS PARA ENTRADA AL MODELO SIMPA. OBTENCIÓN DE MAPAS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS.	21
5.1. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial	22
5.2. Cambios de Precipitación	23
5.3. Cambios en la Evapotranspiración Potencial (ETP).	28
6. SIMULACION MEDIANTE SIMPA. RESUMEN DE TENDENCIAS Y CAMBIOS EN VARIABLES VARIABLES DEL CICLO HIDROLOGICO.	31
6.1. Cambios anuales para el conjunto de España: evapotranspiración real (ETR)	32
6.2. Cambios anuales para el conjunto de España: humedad del suelo (HMS)	33
6.3. Cambios anuales para el conjunto de España: recarga subterránea (REC)	33
6.4. Cambios anuales para el conjunto de España: escorrentía (ESC)	35

6.5. Cambios anuales para el conjunto de España: aportaciones (APN)	37
7. RESUMEN DEL IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LAS SEQUIAS.....	41
7.1. Resultados generales sobre los Recursos Hídricos.....	41
7.2. Resultados generales sobre el impacto sobre sequias:.....	45
8. APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS A LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA.....	47
9. APLICACIÓN INFORMÁTICA CAMREC.....	50

1. ÁMBITO DE TRABAJO

El ámbito del trabajo es el territorio de España. No obstante, el ámbito se ha ampliado a zonas limítrofes de Portugal y Francia con objeto de simular en aquellas zonas que vierten agua al territorio español y que por lo tanto le aportan Recursos Hídricos (en adelante RRHH).

La base del estudio es cada una de las celdas en las que se ha compartimentado el territorio español. El tamaño de celda donde se realizan los cálculos básicos es de 1 km x 1 km, si bien también se realizaron cálculos adicionales en celdas del doble de resolución (0,5 km x 0,5 km). De ese modo, el análisis básico se hace de manera distribuida en cada una de las aproximadamente 500.000 celdas de 1 km² en las que discretiza España.

El impacto sobre los RRHH en el estudio llevado a cabo en 2017, se hace, expresado como tendencias y cambios hidrológicos futuros, se presenta agregado para el conjunto de España y para cada Demarcación Hidrográfica (DH), habida cuenta de que la cuenca hidrográfica es la unidad física integral del ciclo hidrológico donde, salvo excepciones, se encuadran los procesos de transferencia de agua en la fase terrestre. Para este trabajo, las islas Canarias se han agrupado en una única DH y Ceuta y Melilla se han integrado en la DH de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

2. INTRODUCCIÓN

Este informe contiene los resultados principales de la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Supone una actualización de otro anterior llevado a cabo por el CEDEX (2010). La actualización ha consistido básicamente en utilizar unas nuevas proyecciones climáticas, resultado de simular con los nuevos modelos climáticos de circulación general (MCG) y con los nuevos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero que fueron usados para elaborar el 5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) del año 2013. El anterior informe (CEDEX 2010) partía de MCG y escenarios de emisiones usados en el 3º informe del IPCC del año 2001.

Los MCG de donde parten las proyecciones utilizadas en este informe son modelos del sistema terrestre (ESM) más completos que los modelos acoplados atmósfera-océano utilizados en CEDEX (2010). Los ESM incluyen además la representación de varios ciclos bioquímicos como aquéllos implicados en el ciclo del carbono, del azufre o del ozono.

Los **RCP** (siglas del inglés: **Representative Concentration Pathways**) son los nuevos escenarios de emisión de GEI del último informe de evaluación del IPCC considerados en este informe. Sustituyen a los escenarios de emisiones (Special Reports on Emission Scenarios) SRES, que se utilizaron en anteriores informes de evaluación del IPCC y en CEDEX 2010 y que se definían respecto a diferentes evoluciones en las condiciones socioeconómicas globales. Los RCP se refieren exclusivamente a la estimación de emisiones y forzamiento radiativo y pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

La metodología utilizada en el presente estudio ha sido la misma que la utilizada en CEDEX 2010. El ámbito de estudio ha variado ligeramente ya que en el presente estudio se han incluido aquellas zonas fronterizas de Portugal y Francia que vierten agua a España.

3. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y PROYECCIONES

Un escenario climático se obtiene simulando el **clima global con un modelo de circulación general (MCG)** al cual se le ha dado una hipótesis determinada de **escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**. El IPCC pone a disposición pública un conjunto de escenarios climáticos elaborados a escala global por diferentes organismos.

No obstante, la escala de esos escenarios climáticos globales es muy alta para ser utilizada en los estudios de impacto, por lo que es necesario proceder a su regionalización. De ese modo se obtienen los denominados escenarios climáticos regionalizados, también **llamados proyecciones** climáticas (Figura 1) al haberse llevado a cabo una proyección local. En consecuencia, en este trabajo se utilizará el término “proyección climática” para identificar un escenario climático generado por un modelo climático global, bajo un escenario de emisión determinado y regionalizado mediante una técnica dada de proyección local

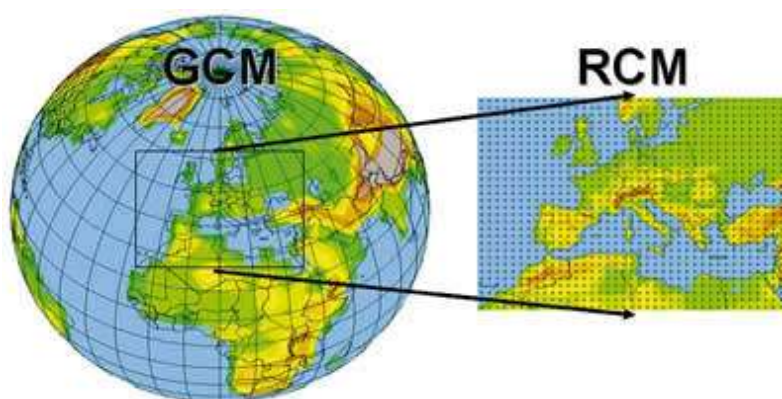


Figura 1. Esquema de paso de MCG a escenarios regionalizados.

Se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se identifican por su forzamiento radiativo¹ total para el año 2100 que varía desde 2.6 a 8.5 W/m² (vatios por metro cuadrado). Los cuatro RCP son: **RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5**.

¹ El forzamiento radiativo en **clima** significa cualquier cambio en la radiación (calor) entrante o saliente de un sistema climático. Puede deberse a cambios en la radiación solar incidente, o a diferentes cantidades de gases activos radiativos. El IPCC lo expresa como : “Variación, expresada en W m⁻², del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente)

3.1. Consideraciones sobre los modelos climáticos y las incertidumbres.

El proceso que conduce a la obtención de los escenarios de cambio climático regionalizados está sujeto, en los pasos sucesivos, a alguna fuente de incertidumbre, que hay que tener en consideración en su conjunto, cuando aquellos se empleen para evaluar impactos del cambio climático.

A pesar de la continua mejora en modelos, metodologías y las características, cada vez más realistas, de los escenarios, la existencia de incertidumbres es inevitable, como en todo proceso predictivo. Las principales fuentes de incertidumbre son los forzamientos naturales, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las concentraciones GEI y los aerosoles, los modelos globales y las técnicas de regionalización; estas se van acumulando en cada paso del proceso de *downscaling* a modo de cascada (Mitchell y Hulme, 1999).

La incertidumbre respecto al posible porcentaje de reducción del recurso deriva sobre todo de los modelos climáticos y, en menor medida, de los modelos hidrológicos.

La disponibilidad de diversas proyecciones del clima regional de España para el siglo XXI aumenta la complejidad de los procesos de evaluación del impacto, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático.

Las incertidumbres asociadas a las proyecciones de cambio climático no son iguales según las variables, las regiones geográficas y las escalas temporales consideradas.

Resulta esencial tener en cuenta estas incertidumbres en las evaluaciones de impactos y vulnerabilidad, y también en la definición de medidas de adaptación, que tendrán que planificarse de forma ajustada a la magnitud de estas incertidumbres, que es creciente a medida que ampliamos el plazo u horizonte temporal de las proyecciones.

A modo de ejemplo, las gráficas de la Figura 3 muestran el rango de las proyecciones de distintos modelos para algunas variables climáticas a lo largo del siglo XXI, en distintas regiones de España.

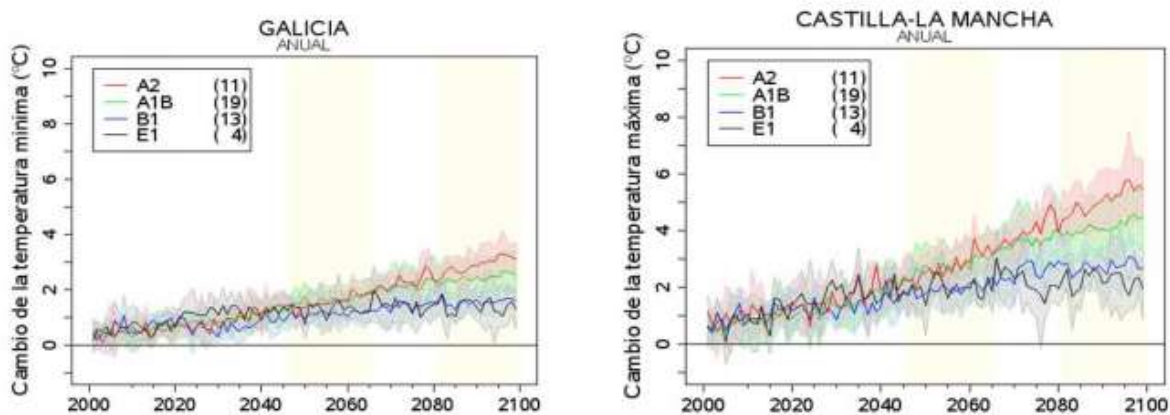


Figura 3. Cambio en la temperatura media anual mínima en Galicia y en la temperatura media anual máxima en Castilla La Mancha a lo largo del siglo XXI. La amplitud de las bandas sombreadas da una medida de las incertidumbres asociadas a las proyecciones.

La consideración de la incertidumbre precisa emplear rangos de posibles resultados, afectando al proceso de decisión que se derive de ello. En las evaluaciones de impactos y vulnerabilidad, es conveniente no considerar nunca unos únicos escenarios posibles, sino un conjunto de ellos que recoja una representación equilibrada de la incertidumbre. La selección de escenarios vendrá, en este caso, condicionada por las fuentes de incertidumbre a barrer: consideración de uno o varios escenarios de emisiones, modelos globales y/o técnicas de regionalización.

Los últimos escenarios climáticos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) de la Organización de las Naciones Unidas indican que para España las precipitaciones anuales disminuirán y las temperaturas aumentarán. Ante estos cambios previstos, en el futuro se producirá una disminución de los recursos hídricos.

El reto principal consiste en incorporar la incertidumbre del cambio climático en la planificación y gestión de los recursos hídricos, ya que dadas las incertidumbres que actualmente existen sobre la evolución futura del clima, no se puede suponer que el futuro régimen hidrológico sea similar al del pasado.

Es importante investigar cuáles serían las consecuencias del cambio climático en los recursos hídricos, y así empezar a incorporar sus efectos en la planificación y la gestión de los recursos hídricos.

La Planificación Hidrológica no debería orientarse tanto a determinar el porcentaje de reducción de recursos hídricos, -dada la imposibilidad de eliminar la incertidumbre-, sino a **analizar la robustez y resiliencia del sistema frente a situaciones de estrés, para identificar dónde es más vulnerable y proponer medidas de adaptación.**

3.2. Criterio de selección de las proyecciones en el estudio.

En el estudio que nos ocupa se han utilizado 12 proyecciones:

- 6 proyecciones en RCP 4.5
- 6 respectivas en RCP 8.5

Estas proyecciones son fruto de regionalizar mediante análogos el resultado de forzar los Modelos Climáticos Globales (MCG) cada uno de los dos escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5. El escenario de emisiones RCP8.5 es el más negativo de los 4 RCP que se han definido, ya que supone los niveles más altos de CO₂ equivalente en la atmósfera para el siglo XXI. El escenario de emisiones RCP4.5 es más moderado y, a priori, presentará un menor impacto sobre el ciclo hidrológico que el RCP8.5.

En la Tabla 1 se detalla el país e institución de origen de cada MCG.

Tabla 1. Modelos Climáticos Globales utilizados en este estudio.

Modelo MGC	País e institución de origen
bcc-csm1-1	CHINA: Centro Climático de Pekín, China. Acopla la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino e incorpora el ciclo global del carbono y la cubierta vegetal
CNRM-CM5	FRANCIA: Centre National de Recherches Meteorologiques – Coupled Model 5. Los modelos que acopla son: atmósfera (ARPEGE), océano (NEMO), hielo marino (GELATO), superficie terrestres (SURFEX) y escorrentía (TRIP)
inmcm4	RUSIA: Institute of Numerical Mathematics Climate Model Version 4, es un modelo acoplado atmósfera-océano. El modelo consiste en dos modelos principales: el modelo atmosférico y el modelo oceánico. Usado para proyectar la sensibilidad climática a incrementos de CO ₂ .

MIROC.ESM	JAPÓN: Universidad de Tokio, el Instituto Nacional de Estudios Medioambientales de Japón y la Agencia de Ciencia Marina y Terrestre y de Tecnología de Japón Model for Interdisciplinary Research on Climate Institute – Earth System Model, es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y CO ₂ .
MPI-ESM-MR	ALEMANIA. Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo. Es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y el CO ₂ . Ha sido desarrollado por el (Alemania)
MRI.CGCM3	JAPÓN: Meteorological Research Institute (MRI) –es un modelo acoplado atmósfera – océano, mediante el intercambio de energía entre ambos.

Siguiendo los criterios indicados anteriormente, en la siguiente Tabla 2 se reflejan las 12 proyecciones climáticas con las que se ha trabajado en el presente estudio, detallando las siglas con los que serán referidas a lo largo del texto para cada RCP considerado (RCP4.5 y RCP.8.5).

Sigla	Sigla	Escenario RCP	MCG	Método de Regionalización	Estaciones series
FA	F4A	4.5	CNRM-CM5	Análogos AEMET	PRE: 2321 TEM: 374
	F8A	8.5			
MA	M4A	4.5	MPI.ESM.MR		
	M8A	8.5			
NA	N4A	4.5	inmcm4		
	N8A	8.5			
QA	Q4A	4.5	bcc-csm1-1		
	Q8A	8.5			
RA	R4A	4.5	MIROC.ESM		
	R8A	8.5			
UA	U4A	4.5	MRI.CGCM3		
	U8A	8.5			

Tabla 2. Siglas utilizadas en el estudio para referenciar de Modelos Climáticos Globales combinados según el los dos RCP utilizados.

Las proyecciones deben reproducir razonablemente los valores observados de **precipitación y temperaturas** para el conjunto de España y deben recoger el margen de variación del conjunto de proyecciones para el conjunto de España.

La variable climática más crítica es la **precipitación**, por su fuerte relación hidrológica y por ser la variable más difícil de simular.

Como ejemplo del margen de variación entre proyecciones para escenarios futuros, y ambas de un mismo país: Japón:

- Proyección **UA** (proveniente del Modelo de Circulación Global **MRI.CGCM3** del Meteorological Research Institute de Japón) es la que da los mayores aumentos de precipitación.
- Proyección **RA** (proveniente del Modelo de Circulación Global **MIROC.ESM** de la Universidad de Tokio, el Instituto Nacional de Estudios Medioambientales de Japón y la Agencia de Ciencia Marina y Terrestre y de Tecnología da los mayores descensos de precipitación, abarcando de ese modo, los valores más diferentes (Figura 4).

Por otro lado, la proyección **MA** (MPI-ESM-MR, Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo, ALEMANIA), es una de las más centradas en el rango anterior.

El resto de las proyecciones seleccionadas dan cambios en la precipitación media para España que están centrados respecto a los cambios que dan el conjunto de proyecciones. Así, la proyección **MA** (MPI-ESM-MR, Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo, ALEMANIA), es una de las más centradas en el rango anterior.

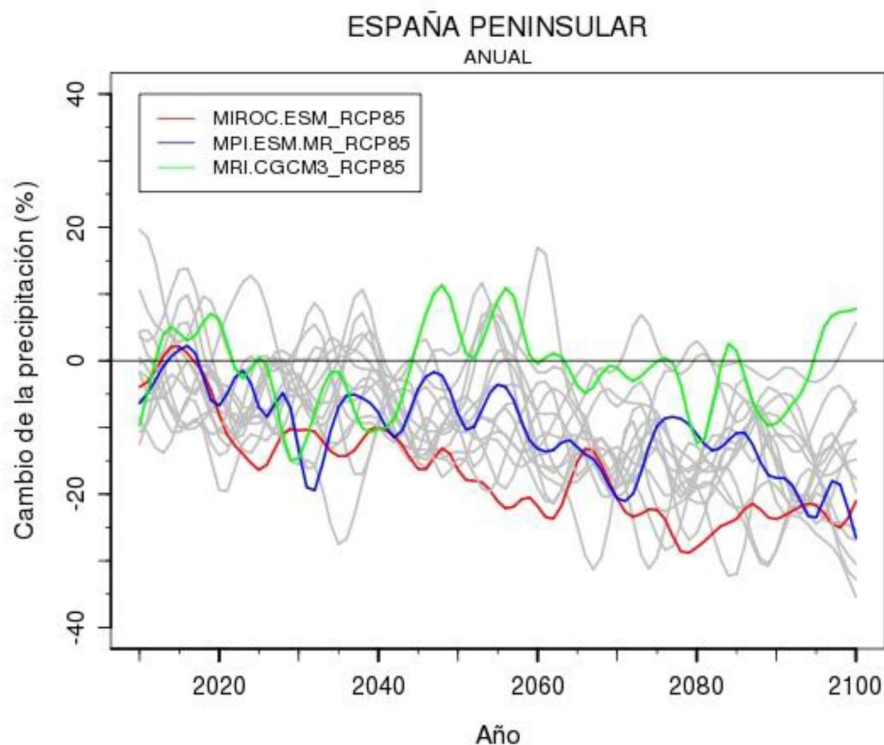


Figura 4. Estimación orientativa de cambio (%) de precipitación media anual para España según las proyecciones climáticas regionalizadas por AEMET del RCP 8.5, donde se han identificado las extremas (UA, MRI.CGCM3, y RA, MIROC.ESM) y una de las centradas (MA, MPI.ESM.MR) (figura cedida por AEMET).

3.3. Antecedentes y evolución del conocimiento.

Los antecedentes de estudios del impacto del cambio climático sobre Recursos Hídricos en España son muy variados, tanto en la metodología, como en los supuestos climáticos de partida, en los periodos analizados y en el ámbito territorial estudiado (escala de trabajo), por lo que los resultados son muy dispares y de difícil comparación.

Los estudios de impacto hidrológico del cambio climático de ámbito global o europeo sintetizados en los informes de IPCC (Kundzewicz et al. 2007; Bates et al. 2008; AEMA 2008, 2017; Jiménez Cisneros et al. 2104), dan para el entorno geográfico de España una estimación futura pesimista.

Hay consenso en pronosticar un gradiente norte-sur para Europa, con aumento de escorrentía (ESC) en el norte y descenso en el sur. En la Tabla 3 se presenta en forma de cuadro-resumen los antecedentes más destacados sobre estudios de Impacto del CC en los RRHH en España.

Tabla 3. Cuadro-resumen de los antecedentes de estudios destacables de Impacto del CC en los RRHH en España

ORGANISMO	Año del estudio	ámbito	periodo considerado	Escenarios	Horizontes	↓ Descensos en Variables HIDROLÓGICAS				Observaciones
						P	ESC	APORT	RRHH	
AEMET	1996	España	1940-1985		2060	8%	Sobre todo en el Sur y de un 34% en Guadalquivir		17%	
CEDEX	1999	España	1940-1995	1-Aumento de 1°C en la temperatura media anual	2030			5%		La disminución sería más acusada en el SE peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular. Esta disminución vendría acompañada con una mayor variabilidad anual, interanual y estacional.
				2-Aumento de 1°C en la temperatura media anual y una disminución de un 5% en la precipitación media anual.				14%		
Estudio del impacto sobre la ESCORRENTÍA MEDIA en España para la década 2050-60 (Cabezas 2004).	2004	España			2071-2100		35%			Impacto mayor en la mitad meridional peninsular, con descensos simulados superiores al 50% en algunas zonas.
				SRES A2 (equivalente a un RCP 8,5)						
AEMET	2008	AEMET escenarios climáticos regionalizados para España								Aumento de las TMX Y TMN a lo largo del siglo XXI, más acusado en el interior de la Península, para el SRES A2 y hacia final de siglo, y un cambio menos claro de Precipitaciones, con una amplia variación de resultados según proyecciones y zonas. Descenso de lluvias medias hacia el Sur peninsular y más acusado conforme avanza el siglo XXI.

Tabla 3. Cuadro-resumen de los antecedentes de estudios destacables de Impacto del CC en los RRHH en España

ORGANISMO	Año del estudio	ámbito	periodo considerado	Escenarios	Horizontes	↓ Descensos medios en variables hidrológicas				Observaciones
						P	ESC	APORT	RRHH	
CEDEX	2010	España		General Media	2011-2040		8%			Siendo las disminuciones más acusadas hacia el SO de España y Canarias. Los descensos serían porcentualmente mayores en invierno que en verano
				SRES B2	2041-2070		11%			
				SRES A2			16%			
				SRES B2	2071-100		14%			
				SRES A2			28%			
Institut d'Estudis Catalans y la Generalitat de Catalunya,	2016	Cataluña	1971-2000		2012-2021	cambio poco significativo			11%	
					2031-2050	7%			18%	
Universitat Politècnica de València	2017	Sistema de Explotación Júcar	1940-2009		2011-2040			20%		dispersión de resultados Y alta incertidumbre y la variabilidad espacial de los cambios previstos, con diferencias entre las zonas de cabecera y las partes bajas de la cuenca
				RCP 4,5	2040-2070			29%		
				RCP8,5	2040-2070			36%		

4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

El trabajo parte de cada proyección climática elegida. A partir de ahí, los pasos seguidos se presentan de manera resumida a continuación y en orden cronológico:

- Tratamiento y análisis de las proyecciones.

1. Obtención de ficheros en formato LEMA² con valores mensuales de PRE, TMN y TMX proyectados en estaciones.
2. Contraste de la proyección en el Periodo de control.

-Preparación de datos de cara a su incorporación al Modelo SIMPA

1. Obtención de mapas de las variables climáticas
2. Simulación del ciclo hidrológico mediante el modelo hidrológico SIMPA. y obtención de mapas mensuales para cada variable hidrológica
3. Acumulación de la ESC según las direcciones de flujo para obtener las aportaciones hídricas (APN) en la red de drenaje
4. Agregación de mapas de cada variable hidroclimática.

-Caracterización del impacto.

-Evaluación del impacto sobre el régimen de sequías

El impacto se ha evaluado en 3 periodos futuros de 30 años hidrológicos, denominados en lo sucesivo **periodos de impacto (PI)**

- PI1: 2010-2040 (octubre de 2010 a septiembre de 2040)
- PI2:2040-2070 (octubre de 2040 a septiembre de 2070)
- PI3:2070-2100 (octubre de 2070 a septiembre de 2100)

Se ha tomado referencia en base a datos de observación **al periodo de control (PC):**

- 1961-2000 (octubre de 1961 a septiembre de 2000)

² Formato necesario para el tratamiento posterior de la información y la introducción de los valores climáticos en el modelo hidrológico de SIMPA.

PERIDO DE CONTROL (PC)	PERIODOS DE IMPACTO (PI)		
1961-2000	2010-2040	2040-2070	2070-210

Los datos del PC (periodo de control 1961-2000) permiten valorar el grado de ajuste de la simulación climática a los datos observados; los de los PI, evaluar el impacto del cambio climático por comparación de los valores simulados del PI con los del PC.

La extracción del Periodo Futuro (2006-2100) en esos 3 PI, se ha realizado teniendo en cuenta la información de los datos de partida y con objeto de que fueran los mismos que se utilizaron en el anterior estudio (CEDEX 2010) para poder comparar los resultados.

En consecuencia, el impacto evaluado en este estudio se ha expresado como cambios de propiedades estadísticas medias en variables hidrológicas de periodos futuros de 30 años con relación a un periodo de control de 39 años.

Para llevar a cabo este trabajo se han utilizado principalmente dos paquetes informáticos de libre difusión: el programa estadístico R (R Development Core Team 2015) y el sistema de información geográfica GRASS (GRASS Development Team 2015)

Los resultados se presentan para todo el territorio de España. No obstante, el ámbito de este trabajo se ha ampliado a zonas limítrofes de Portugal y Francia con objeto de simular en aquellas zonas que vierten agua al territorio español y que por lo tanto aportan recursos hídricos.

Los mapas se generan con GRASS en un mallado de celdas de 1 km de lado, salvo los mapas de APN (aportación) cuyas celdas son de 0.5 km de lado. De ese modo, cada mapa resultado contiene aproximadamente unas 500.000 celdas (resolución de 1 km²) o 2.000.000 celdas (resolución de 0.25 km²).

El Esquema metodológico general seguido se representa en es el siguiente esquema de la Figura 5 y se describe brevemente en los puntos siguientes:

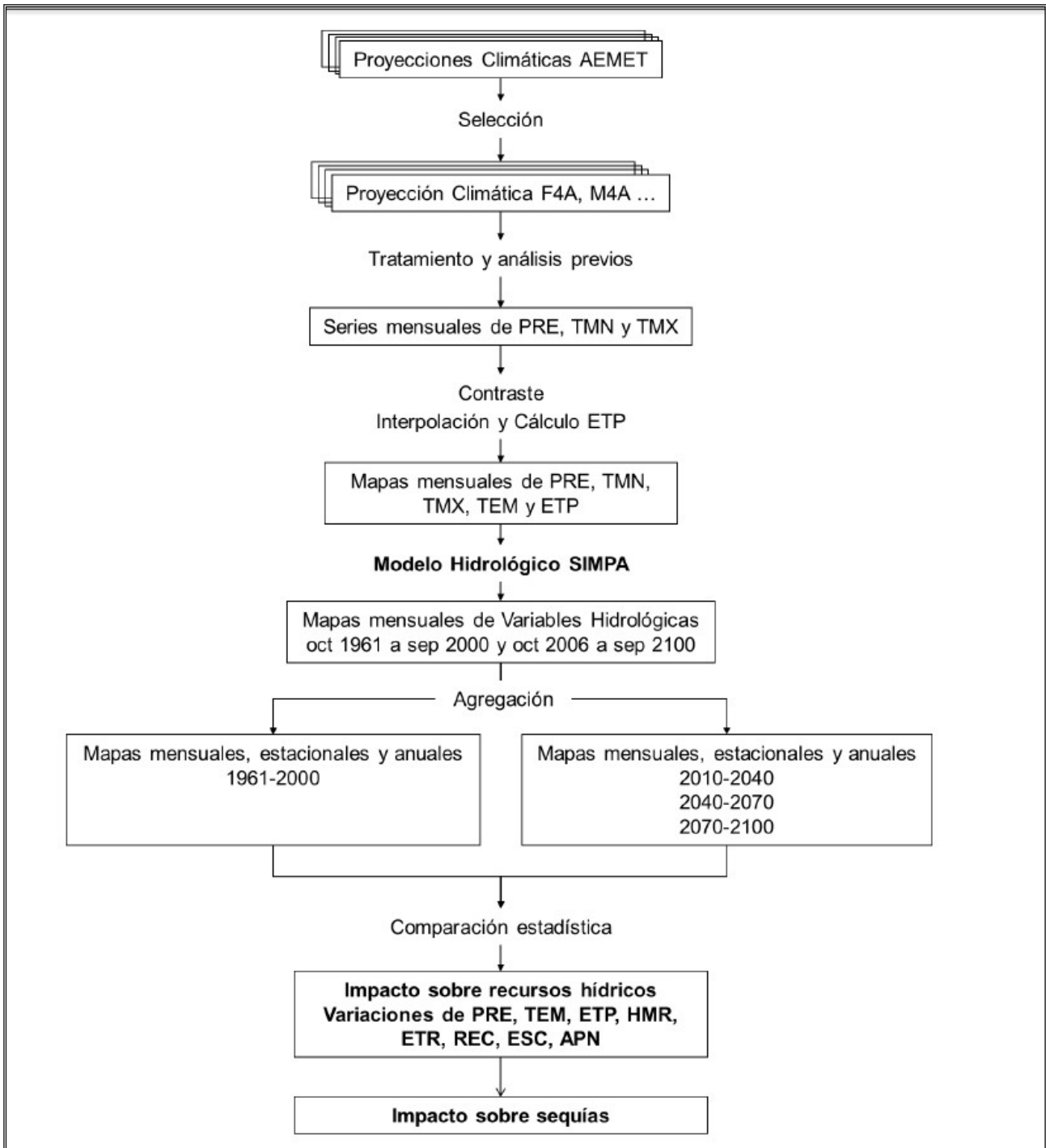


Figura 5. Metodología seguida en el estudio.

4.1. Tratamiento y análisis de la proyección.

El tratamiento consistió en la transformación de valores³ diarios en mensuales.

A partir de los valores diarios de Precipitación (PRE), Temperatura Máxima (TMX) y Temperatura Mínima (TMN) de las proyecciones climáticas, se elaboraron series mensuales con un formato necesario para el tratamiento posterior de la información y la introducción de los valores climáticos en el modelo hidrológico SIMPA , desarrollado por el CEDEX.

La información de partida que caracteriza cada proyección climática consiste en 6138 ficheros en formato ASCII que se han descargado de la página web de AEMET. Así por ejemplo, el fichero tmax.9041.MPI-ESM-MR.RCP85.2006-2100.ANALOGOS.dat contiene la TMX simulada en la estación meteorológica con código AEMET 9041 para todos los días comprendidos entre el 1 de enero de 2006 y el 31 de diciembre de 2100.

4.2. Obtención de ficheros en formato LEMA

Los valores diarios de PRE, TMN y TMX de la proyección climática se transformaron en series mensuales en formato LEMA mediante la suma de los valores diarios, en el caso de las PRE, y mediante la media de los valores diarios, en los casos de las TMN y TMX.

Los ficheros con formato LEMA guardan las **series temporales mensuales** de variables climáticas e hidrológicas en formato ASCII (datos diarios).

El formato LEMA es necesario para el tratamiento posterior de la información y la introducción de los valores climáticos en el modelo hidrológico de SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización Precipitación Aportación).

³ Se utilizará el término “datos” para hacer referencia a observaciones registradas y que utilizáramos “valores” para los simulados.

4.3. Contraste de la proyección en el Periodo de Control:

El objetivo de la realización de este contraste es analizar el desajuste o sesgo de las series simuladas y valorar su repercusión en la incertidumbre de los resultados.

Se ha realizado el contraste de las series de las proyecciones comparándolas con las series observadas en las mismas estaciones durante el PC. Los datos mensuales observados de PRE, TMN y TMX correspondientes a las estaciones donde hay datos simulados de las proyecciones fueron extraídos de la base de datos HIDRO del CEDEX (Quintas 1996), donde se almacena la información climática observada en las estaciones de AEMET.

Los ficheros LEMA de datos observados tienen lagunas durante el PC, al contrario que los de las proyecciones que están completos. Por lo tanto, se seleccionaron aquellas estaciones que tienen al menos 35 años completos de datos observados de PRE, TMN y TMX (de los 40 del PC). Con objeto de conseguir un número significativo de estaciones, las series de TMN y TMX de HIDRO se han completado previamente mediante modelización. De ese modo, el contraste de la PRE se ha llevado a cabo en 621 estaciones y el de las TMN y TMX en 229 estaciones

Para realizar el contraste, se han agrupado las DDHH (Demarcaciones Hidrográficas) de las Islas Canarias en un único conjunto. Además, las series de Ceuta y Melilla se han incorporado a la DH de C. Mediterráneas de Andalucía.

4.4. Valoración General del Contraste y el sesgo:

Es habitual encontrar sesgos en las proyecciones climáticas, especialmente en el caso de la Precipitación. Este hecho se debe a que, tal como indica el IPCC, los MCG simulan bien la temperatura global, pero tienen más dificultades en simular bien la precipitación.

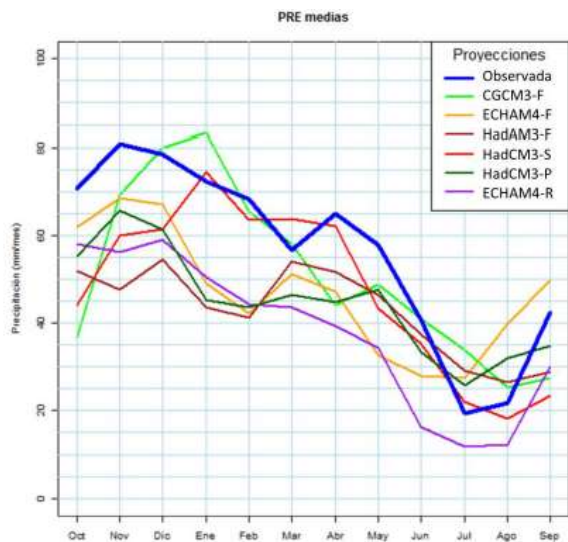
Las proyecciones **reproducen razonablemente bien los valores medios anuales** de las **TMN y TMX observadas**, así como la distribución espacial y estacional de las temperaturas.

El sesgo es más notable en el caso de las Precipitación (PRE):

- El ajuste de los valores medios y la variabilidad para el conjunto de España es aceptable en líneas generales.
- El sesgo de valores medios está polarizado espacialmente, de Este a Oeste, con notables diferencias entre zonas: se sobreestima mucho la PRE en las grandes cuencas atlánticas en los meses invernales, cuando más llueve, lo que va a implicar un aumento general de los valores simulados, mientras que todas las proyecciones infravaloran la PRE en el Este peninsular y en los archipiélagos.
- Finalmente, el patrón del ciclo anual se recoge a grandes rasgos, salvo en las cuencas mediterráneas, donde las proyecciones tienen más dificultades.
- Este desajuste, o sesgo, condiciona en gran medida la simulación hidrológica y, por lo tanto, la evaluación del impacto.
- Hay diferencias con relación a los resultados de contraste obtenidos con en el informe CEDEX (2010). (Figura 6).
 - Es cierto que las proyecciones son diferentes, así como el Periodo de Control (PC). Hay también que indicar que las diferencias de los valores observados entre ambos estudios se deben a que el PC y las estaciones de comparación son diferentes.
 - Cuatro de las seis proyecciones de este trabajo 2017 tienden a sobreestimar la precipitación del PC mientras que todas las proyecciones del informe anterior 2010 la subestimaban.
 - En general, las proyecciones de este trabajo 2017, ajustan mejor la estacionalidad en las cuencas atlánticas que en el trabajo anterior. En ambos casos, las proyecciones tienen problemas en ajustar la distribución mensual de la PRE en las DDHH mediterráneas.

Estudio 2010- PC(1961-1990).

Las proyecciones subestiman la PRE



Estudio 2017-PC: (1961-2000)

Las proyecciones sobreestiman la PRE

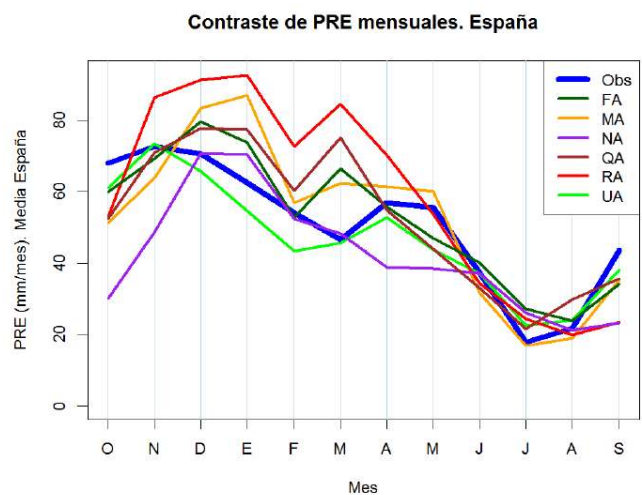


Figura 6. Diferencias en los estudios CEDEX de 2010 y 2017 sobre distribución mensual de la Precipitación observada y la simulada según las distintas proyecciones para el conjunto de España, según valores en estaciones

5. PREPARACIÓN DE DATOS PARA ENTRADA AL MODELO SIMPA. OBTENCIÓN DE MAPAS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS.

Interpolación de valores climáticos de partida.

Las proyecciones climáticas de partida tienen valores de PRE y TMN y TMX en una serie de estaciones. Para utilizar el modelo hidrológico de evaluación de recursos hídricos se han de interpolar esos valores para disponerlos en celdas de 1 km², que es la resolución adoptada por el modelo hidrológico que se utiliza en este trabajo para el cálculo de los recursos hídricos.

Se ha llevado a cabo la interpolación por el método de residuos basados en patrones mensuales de PRE y temperaturas (Álvarez-Rodríguez 2011). La interpolación por residuos pretende solucionar el problema de la mala representatividad de los valores climáticos en algunas áreas sin medidas registradas, especialmente en altas cotas.

Los patrones mensuales son mapas que representan la distribución espacial de la variable (PRE, TMN o TMX) en cada uno de los 12 meses del año. Los estadísticos representados son dos: Media y desviación típica. Son los mapas característicos para enero, febrero, etc.

Finalmente, se obtuvieron para cada proyección, mapas mensuales con valores de PRE, TMN y TMX para cada mes de los años hidrológicos del PC y del PF; en **total 4788 mapas**, desde octubre de 1961 a septiembre de 2000 y de octubre de 2006 a septiembre de 2100.

En la Figura 7 siguiente se muestran a modo de ejemplo los mapas de PRE, TMN y TMX para abril de 1990 y de 2090 según la proyección M8A.

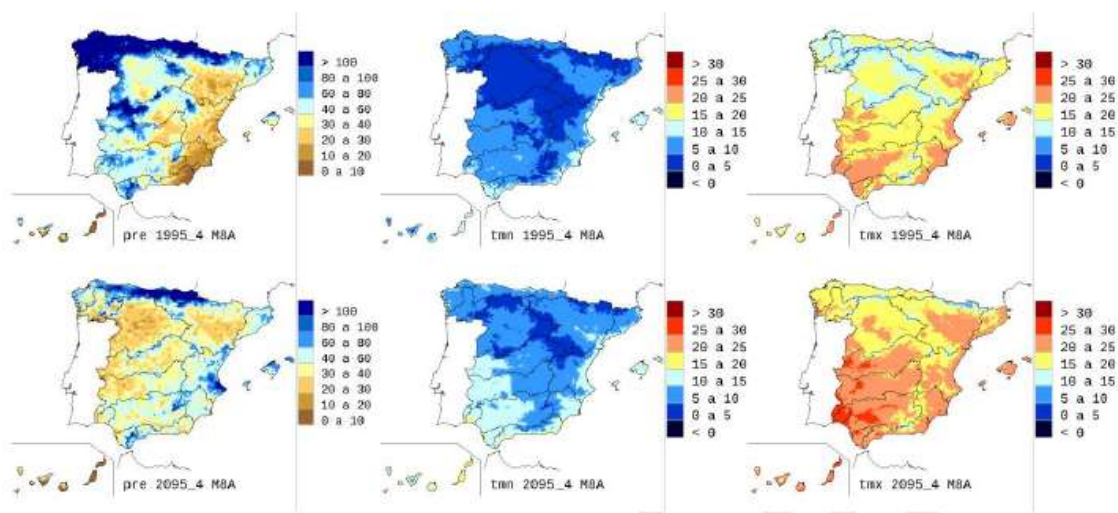


Figura 7. Mapas de PRE (izquierda), TMN (centro) y TMX (derecha) para abril de 1995 (arriba) y de 2095 (abajo) según la proyección M8A.

Por otro lado y a partir de los mapas de TMN y TMX para cada mes se obtienen, como semisuma de los anteriores, los correspondientes **mapas de temperaturas medias (TEM)** y cada proyección climática. De ese modo, se obtienen otros **1596 mapas mensuales de TEM** (desde octubre de 1961 a septiembre de 2000 y de octubre de 2006 a septiembre de 2100).

5.1. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial

La precipitación (PRE) y la evapotranspiración (ETP) son las dos variables climáticas que se utilizan como valores de entrada en el modelo hidrológico

Para el cálculo de la ETP, se ha utilizado el método de Hargreaves (Hargreaves y Allen 2003), ya que es un método experimental recomendado por la FAO en zonas de alta variabilidad climática (Allen et al. 2006) y es de fácil aplicación ya que es función de variables que se pueden tener en la mayoría de la estaciones. Aunque también recomienda la utilización de ecuaciones de regresión usando como referencia los resultados de Penman Monteith.

Siguiendo la recomendación anterior, se ha calculado la ETP por el método de Hargreaves en cada celda de España a partir de los mapas de temperaturas interpolados en el paso anterior.

El resultado final fueron **1.596 mapas** mensuales de ETP para cada proyección climática, abarcando desde octubre de 1961 a septiembre de 2000 y de octubre de 2006 a septiembre de 2100. En la Figura 8 se muestran a modo de ejemplo los mapas de ETP para abril de 1995 y de 2095 según la proyección M8A.

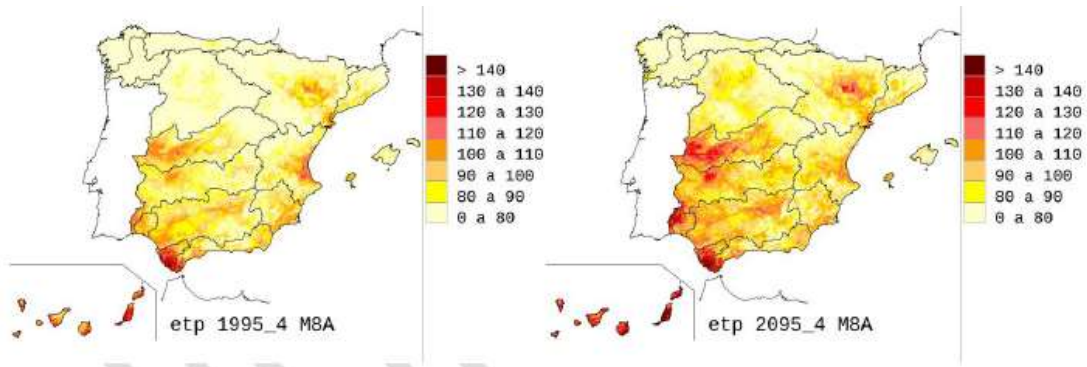


Figura 8. Mapas de ETP para abril de 1995 (izquierda) y de 2095 (derecha) según la proyección M8A.

5.2. Cambios de Precipitación

Los cambios en la PRE anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia decreciente según el conjunto de las proyecciones para ambos RCP (Figura 9).

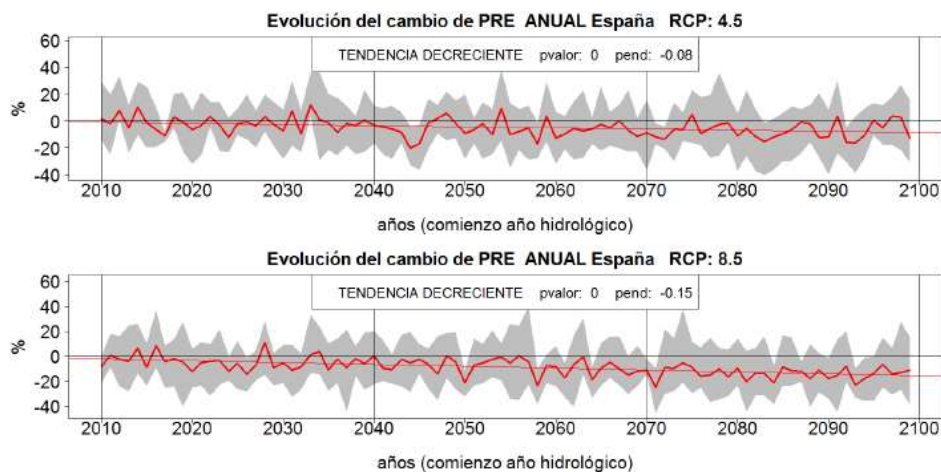


Figura 9. Tendencia del Δ (%) PRE del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España.

Curiosamente dos Modelos (MCG) Japoneses, son los que ofrecen los valores más extremos. La **proyección RA** (Universidad de Tokio, el Instituto Nacional de Estudios Medioambientales de Japón y la Agencia de Ciencia Marina y Terrestre y de Tecnología de Japón) es la que suele dar las mayores disminuciones y la **proyección UA** (del Japonés Meteorological Research Institute) los mayores aumentos o menores descensos.

Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre descensos de PRE, superiores en RCP 8.5 que en RCP 4.5 y mayores cuanto más avanza el siglo XXI.

La variación (%) de la PRE en cada Periodo de impacto (PI) según cada proyección para el conjunto de España se refleja en la Tabla 4. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP.

PRE ESPAÑA Δ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	1	-2	-5	-4	-8	9	9	-2	-8	1	-5	-6	-8	-7	-3	1	-4	-8
2040-2070	-4	-5	-5	-7	-13	-1	-1	-6	-13	-4	-11	-11	-9	-16	3	3	-8	-16
2070-2100	-2	-10	-9	-5	-17	1	1	-7	-17	-11	-17	-8	-19	-24	-2	-2	-14	-24

Tabla 4. Δ (%) PRE en cada PI según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

En general, hay un similar patrón de reducción, más intenso hacia el SO peninsular y en Canarias y menor reducción, o incluso aumento de PRE en algunas zonas del este peninsular. Por el contrario, U4A y U8A muestran un patrón contrario, con mayores descensos hacia el este.

Por Demarcaciones Hidrográficas (DH)

Las tendencias de la PRE anual de las DH durante el periodo futuro se muestran en el Anexo 2⁴ del estudio original.

Al igual que pasa para el conjunto de España, la banda de variación de cambios es amplia, síntoma de la incertidumbre, el promedio de las proyecciones para cada DH y RCP da tendencias decrecientes significativas y la pendiente de ese promedio de cambios es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, indicando un mayor descenso de PRE cuando se considera el RCP 8.5.

Los cambios de PRE para cada uno de los tres PI en cada DH muestran en primer lugar las diferencias en los resultados de cada proyección.

- Los descensos son mayores para el RCP 8.5 que el RCP 4.5 y conforme se avanza en el siglo XXI.
- El rango de variación es mayor en las DDHH del sur de la Península, en el RCP 8.5 y en los Periodos de Impacto más lejanos.
- Las proyecciones U4A, U8A y, en menor medida, F4A y F8A dan ascensos de PRE, mientras que R8A y R4A dan los mayores descensos.
- Así, los descensos son superiores al 30% en las DDHH del sur y Canarias para el Periodo de Impacto 3 (207-2100) según R8A.
- En contraposición, los aumentos de PRE son superiores al 10% en las DDHH del centro y sur peninsulares para el Periodo de Impacto 1 (2010-2040) según U4A.

Con relación al promedio de Δ de las proyecciones:

- Para el RCP 4.5 y para el **Periodo de Impacto 1 (2010-2040)**, muchas DDHH tienen un valor próximo al -2%, con el mayor descenso en Canarias (-4%) y el ascenso mayor en las CCII de Cataluña (+2%). Para el RCP 8.5, los valores oscilan entre el 1% (Cuencas internas de Cataluña) y el -8% (Canarias).
- Para el **Periodo de Impacto 2 (2040-2070)** y el RCP 4.5, oscilan entre el 0% y el -7%, con los mínimos descensos hacia el este de España. Para el RCP 8.5, se nota una clara doble polaridad N-S y O-E, con valores de -7% en el norte, alrededor de -11% en el sur, 0% en las CCII de Cataluña y -14% en Canarias.

⁴ Anexo 2 del presente estudio, donde se presentan as gráficas de la tendencia del Δ (%) de PRE, ETP, ETR, REC y ESC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 y 8.5 en cada ámbito territorial. (DDHH y España).

- Para el **Periodo de Impacto 3 (2070-2100)**, esa doble polaridad se aprecia también ; para el RCP 4.5, los Δ oscilan entre -4% y el -13%, con los máximos descensos hacia el sur de la Península y Canarias; para el RCP 8.5, los descensos rondan el 13% en el norte, el 18% en el sur, el 21% en Canarias, el 15% en Baleares y el Segura, el 10% en el Ebro y Júcar y el 4% en las CCII de Cataluña.

En relación a los **cambios del ciclo anual**. No se observan unos claros patrones de cambio en el ciclo anual. Lo más destacado es la tendencia a concentrarse la PRE de España en febrero en todos los PI y RCP, en contraposición con una reducción al final del verano. Hacia finales de siglo y el RCP 8.5 se hace más patente la reducción en mayo-junio y sobre todo en septiembre-octubre. La media de las proyecciones da para los dos RCP y los tres PI un aumento notable de la PRE en febrero y en menor grado en marzo, y una disminución en junio y septiembre.

En los gráficos de la Figura 10 se observan estos patrones descritos.

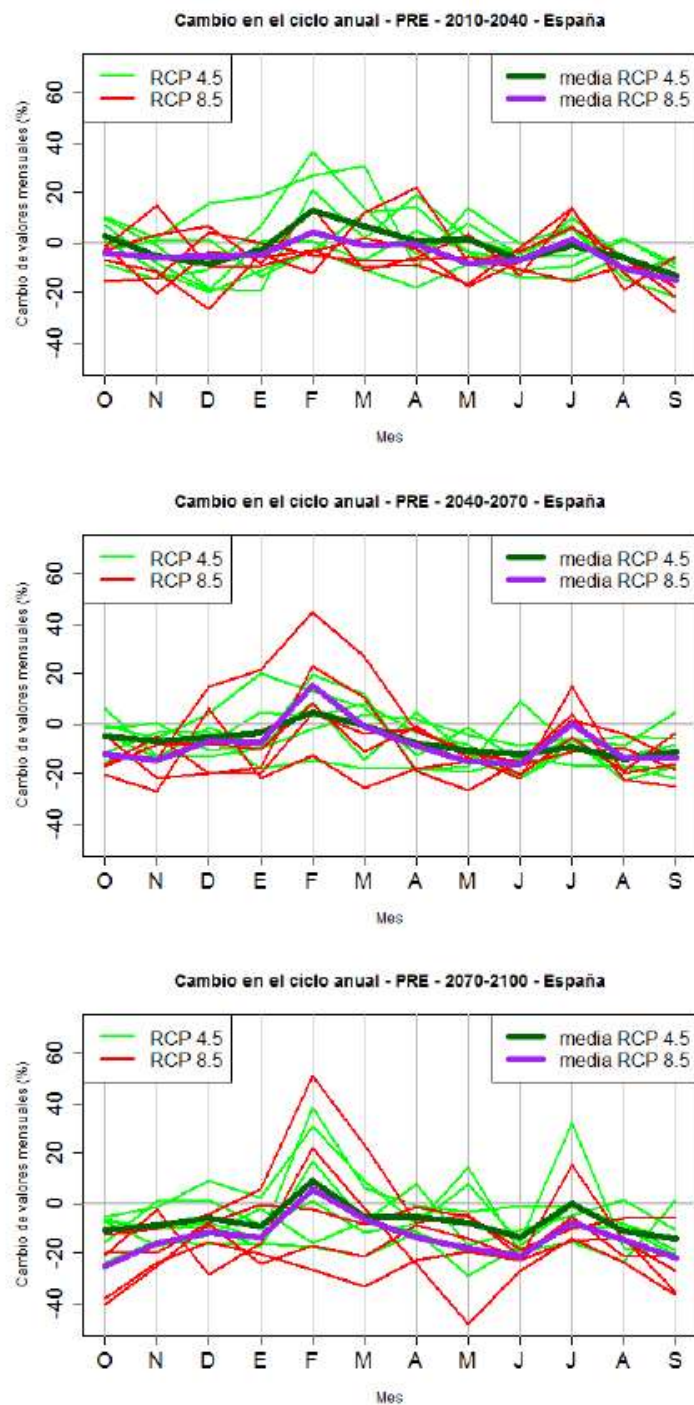


Figura 10 .Cambios (%) en el ciclo anual de PRE para cada PI respecto al PC para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP.

5.3. Cambios en la Evapotranspiración Potencial (ETP).

Tanto las temperaturas medias (TEM, como las Temperaturas mínimas (TMN) y las Temperaturas máximas (TMX) aumentan en cada PI con relación al PC según todas las proyecciones.

El aumento es mayor cuanto más nos acercamos al final del siglo XXI, es mayor en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5 y es mayor en las TMX que en las TMN, llegando la media de las proyecciones a sobrepasar los 4 ° C para las TMX en el PI3 y el RCP 8.5.

Los cambios en la ETP anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia creciente según todas las proyecciones y en ambos escenarios de emisiones RCP (Figura 11).

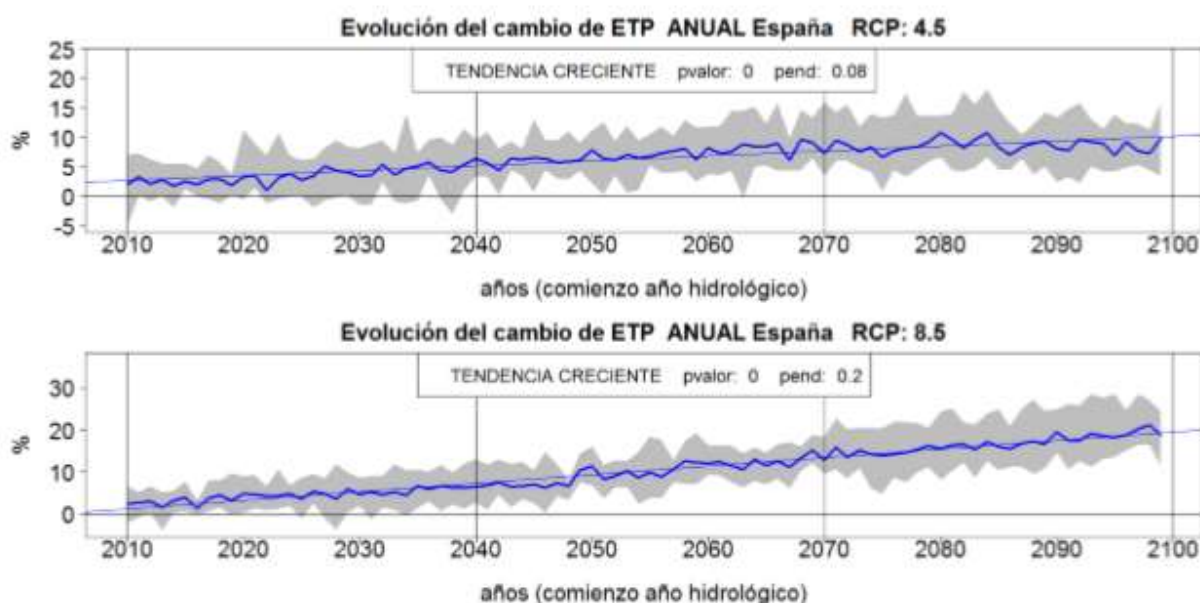


Figura 11. Tendencia del Δ (%) ETP del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente.

La distribución espacial de los cambios anuales de ETP responde sobre todo a la variación de temperaturas. La ETP sube en todos los periodos y en todas las zonas según todas las proyecciones.

Esa subida es inferior al 10% en el PI1 y va siendo mayor conforme avanza el siglo XXI. Las proyecciones del RCP 8.5 dan mayores subidas de ETP que las respectivas del RCP 4.5.

El incremento es, en general, mayor en las zonas interiores que en las zonas costeras. Destacan los altos incrementos que se dan en general en las divisorias de aguas de las grandes cuencas hidrográficas, lo que va a implicar un aumento de la evapotranspiración real (ETR) allí donde hay más disponibilidad de agua y, por lo tanto, una previsible reducción de RRHH en esas zonas. La proyección que sugiere mayor incremento de ETP es R8A, llegando a pasar del 25% en amplias zonas del centro de España para el PI3. Por el contrario, U4A es la que da un menor incremento de ETP, inferior al 10% en casi todas las partes de España para el P3.

Con carácter general, los mapas de variaciones de PRE y ETP muestran un descenso de la PRE y un aumento de la ETP. Por lo tanto, se espera una reducción de RRHH. Estas características se van acentuando conforme avanza el siglo XXI.

Por Demarcaciones Hidrográficas

- **Periodo 2010-2040:**

La mayoría se muestran en el rango +/-5%. Las proyecciones RA, QA y MA son las que dan más aumento de ETP, superior al 5 % en gran parte del territorio, sobre todo del centro peninsular, y superior al 10% en zonas de cabecera de las cuencas del Duero, Ebro y Tajo.

Todas las proyecciones muestran de manera consistente la insignificante variación de la ETP en la cornisa Cantábrica y el NO de Galicia. El SE de Galicia sin embargo sí aparece afectado en las proyecciones MA, QA y RA. La proyección RA es la única que muestra aumentos significativos en los archipiélagos Canario y Balear para ambos RCP.

- **Periodo 2040-2070:**

Aumento de ETP por encima del 5% según casi todas las proyecciones, salvo la N4A, que muestra una mayoría de zonas con variación todavía poco notable).

La cornisa cantábrica y Galicia NO continúan con poca afección según todas las proyecciones y escenarios.

Se detecta un claro patrón de cambios, con aumentos de ETP más significativos en las zonas limítrofes de los límites de las cuencas del interior peninsular, debido a su orografía y situación de lejanía al mar. En las zonas más costeras e insulares en general se dan las menores variaciones de ETP.

- **Periodo 2070-2100:**

Continúa la tendencia de aumento de ETP generalizada.

Hay ya una clara distinción entre ambos RCP, siendo los aumentos mucho mayores en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5.

Se observa el mismo patrón de cambio espacial que en el anterior periodo, afectando más a las áreas del interior peninsular y en menor medida a la cornisa cantábrica y zonas del levante septentrional. Ambos archipiélagos sólo se muestran afectados de manera notable en las proyecciones MA, QA y RA del escenario RCP 8.5.

6. SIMULACION MEDIANTE SIMPA. RESUMEN DE TENDENCIAS Y CAMBIOS EN VARIABLES DEL CICLO HIDROLOGICO.

El modelo SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación) permite la evaluación de recursos hídricos en régimen natural.

Los mapas climáticos anteriormente generados a partir de las nuevas proyecciones climáticas alimentan el modelo hidrológico SIMPA y representan los valores climáticos simulados en los Periodos de Impacto (PI) y los valores climáticos simulados en el Periodo de control (PC).

Los datos de entrada al modelo son las PRE y ETP de los meses para los que se va a realizar la simulación.

El modelo SIMPA se ha utilizado para obtener los mapas mensuales de las principales variables terrestres del ciclo hidrológico durante el PC y los PI, básicamente:

- Humedad del suelo
- Evapotranspiración real (ETR),
- Recarga subterránea,
- Escorrentía
- Aportación hídrica en los ríos.

Para utilizar el modelo hidrológico en este trabajo, el territorio de España se ha reticulado en celdas de 1 km x 1 km, con lo que se han realizado balances hídricos en cada una de las aproximadamente 500.000 celdas resultantes. El balance hídrico se lleva a cabo mediante unas ecuaciones que de modo progresivo modelizan los procesos que tienen lugar en una cuenca desde que se produce la Precipitación (PRE) hasta que se obtiene la Escorrentía (ESC) en el punto de desagüe de la cuenca y se ha aumentado el detalle hasta una resolución mayor de celda, de 500 x 500 m. para el cálculo de las Aportaciones (APN) en unas 2500000 celdas en las que se ha reticulado el territorio español.

Como resultado se han elaborado unos 300.000 mapas de resolución 1 km².

6.1. Cambios anuales para el conjunto de España: evapotranspiración real (ETR)

Los cambios en la ETR anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia decreciente significativa según el conjunto de todas las proyecciones para ambos escenarios de emisiones RCP (Figura 12). El rango de dispersión de resultados de cada proyección se muestra en la banda sombreada de gris e indica una incertidumbre que con frecuencia se acerca o supera el 10% tanto en positivo como en negativo.

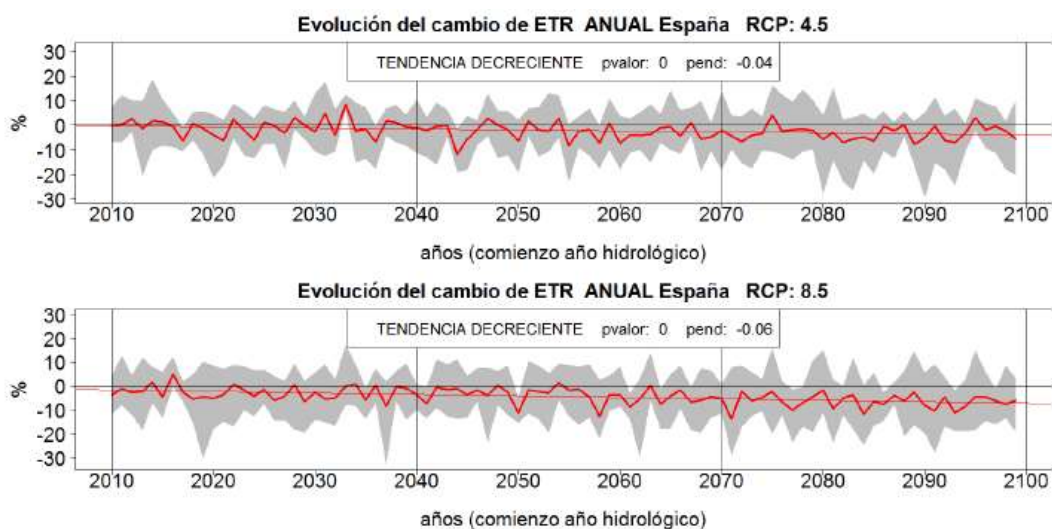


Figura 12. Tendencia del Δ (%) ETR del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente.

En el estudio original se aportan en tablas las variaciones (%) de ETR en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio.

En el anexo 2 del estudio se incluyen las gráficas de las tendencias de la ETR anual de las Demarcaciones Hidrográficas (DDHH) durante el siglo XXI. El promedio de las proyecciones para cada DH y RCP da tendencias crecientes significativas en las DDHH del norte peninsular y decreciente significativas en el resto. La tendencia es estacionaria solamente en el Ebro y CCII de Cataluña para el RCP 8.5.

6.2. Cambios anuales para el conjunto de España: humedad del suelo (HMS)

Debido al descenso de PRE y al aumento de ETP durante la mayor parte del año, es previsible que el suelo pierda humedad, causando importantes impactos para los ecosistemas y la agricultura. La HMS se puede considerar como una variable acotada por el valor máximo del contenido de agua que puede almacenar el suelo.

Se pronostica una pérdida progresiva de la humedad de agua en el suelo a lo largo del siglo XXI. Eso hace que la cantidad de agua al inicio de un periodo sea mayor que al final del mismo, lo que influirá en una ESC menor.

Los incrementos varían del +2% al -12%, y las medias del -2% al -8%. Como era de esperar, las mayores reducciones se dan para el RCP 8.5 y PI3.

Los mayores descensos se dan en las DDHH atlánticas, sobre todo en el NO, donde hay más disponibilidad de agua. Los menores descensos se dan en el SE y Canarias, donde el suelo ya está tan seco durante el PC que no hay variación de humedad en los PI. Los descensos van siendo más notables del PI1 al PI2 y al PI3. Los descensos son mayores en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5.

6.3. Cambios anuales para el conjunto de España: recarga subterránea (REC)

Para el cálculo de la recarga, el modelo SIMPA hasta la fecha, ha de simplificar en función del agua de lluvia que no cabe en el suelo y de la capacidad máxima de infiltración al mes (parámetro *I_{max}*). Lo que hace que la REC en un mes es directamente proporcional a la PRE de ese mes y al parámetro *I_{max}*, que se ha supuesto invariable en el tiempo.

La necesidad de simplificar procesos tan complejos como son la infiltración y la REC subterránea lleva asociadas una serie de incertidumbres en aquellos resultados expresados como valores absolutos. No obstante, los resultados expresados como tendencias o como cambios en periodos de impacto contrarrestan esas limitaciones, rebajando el grado de incertidumbre.

Hay una tendencia decreciente en la REC anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 según todas las proyecciones y en ambos RCP (Figura 13), siendo más acusado ese descenso en la pendiente media del RCP 8.5 (-0.28 %) que en la

del RCP 4.5 (-0.14 %). Se observan disparidades entre las diferentes proyecciones tal como indica la anchura de la banda de cambios. Las pendientes medias para todo el periodo dan siempre valores negativos que oscilan entre -0.07 % (N8A) y -0.48 % (R8A).

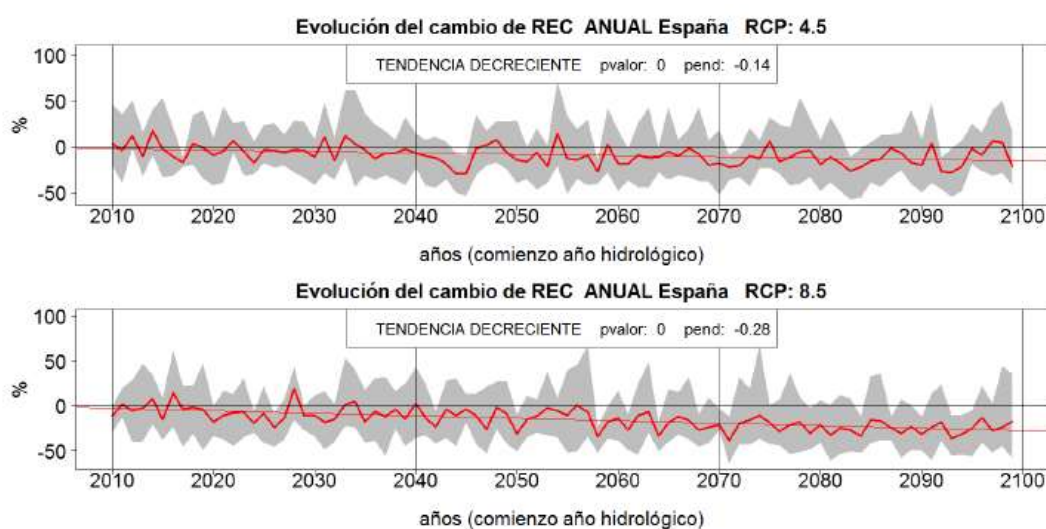


Figura 13. Tendencia del Δ (%) REC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones. La línea gruesa indica su promedio y la recta delgada su pendiente.

El rango de cambios de la REC para el periodo 2010-2040 va del +15% (U4A) al -13% (Q8A) y para el periodo 2070- 2100 va del +1% (U4A) al -40% (R8A).

Los cambios medios para los RCP 4.5 y 8.5 son, respectivamente, del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

La proyección RA es la que suele dar las mayores disminuciones y la UA los mayores aumentos o menores descensos. Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre descensos de REC, superiores en RCP 8.5 que en RCP 4.5 y superiores cuando más avanza el siglo XXI.

Las tendencias de la REC anual de las DDHH durante el siglo XXI se muestran en el anexo 2 2 del estudio original, donde se aportan una tabla de cambios (%) REC en cada DH y PI según cada proyección. Se indican los valores máximo (Mx), mínimo (Mn) y el promedio (Med) para cada RCP.

Al igual que pasa para el conjunto de España, la banda de variación de cambios es amplia, síntoma de la incertidumbre. El promedio de las proyecciones para cada DH y RCP da tendencias decrecientes significativas en todos los casos.

Todas las DH desde Miño-Sil hacia el sur muestran las mismas tendencias para todas las proyecciones y son las que determinan la general para España: tendencia decreciente estadísticamente significativa para la proyección R4A del RCP 4.5 y para cuatro del RCP 8.5 (F8A, M8A, Q8A y R8A).

Los resultados de las tendencias para las DDHH del norte, levante y archipiélagos difieren algo del comportamiento general; así, por ejemplo, casi todas las proyecciones, salvo Q4A y U4A, dan tendencias decrecientes significativas en Galicia-Costa

6.4. Cambios anuales para el conjunto de España: esorrentía (ESC)

Los cambios en la ESC anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia decreciente según todas las proyecciones y en ambos RCP (Figura 14). La incertidumbre de resultados se hace patente por la anchura de la banda de cambios según las diferentes proyecciones. La tendencia decreciente es sólo estadísticamente significativa para una proyección del RCP 4.5 (R4A) y para cuatro del RCP 8.5 (F8A, M8A, Q8A y R8A), mientras que el resto de proyecciones no muestran tendencia significativa alguna.

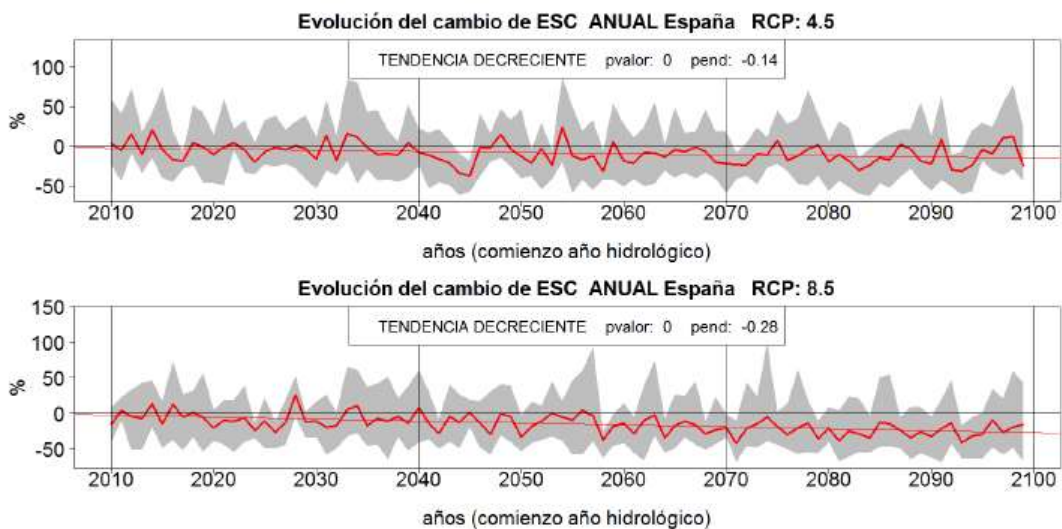


Figura 14. Tendencia del Δ (%) ESC del año 2010 al 2099 para los RCP 4.5 (arriba) y 8.5 (abajo) para el conjunto de España. La banda gris indica el rango de resultados de las proyecciones

Promediando los resultados de las proyecciones, se estiman siempre descensos de ESC, superiores en RCP 8.5 que en RCP 4.5 y más superiores cuando más avanza el siglo XXI. La diferencia entre ambos RCP se hace más patente conforme se avanza en el siglo XXI.

Los cambios medios para España indican siempre reducción de ESC. Para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

En relación a la distribución espacial y por periodos de impacto:

En general, hay una reducción más intensa hacia el SO peninsular y en Canarias y menor reducción, o incluso aumento de ESC en algunas zonas del este peninsular. Por el contrario, U4A y U8A muestran un patrón contrario, con mayores descensos hacia el este.

- Para el periodo 2010-2040: notables diferencias en la distribución espacial de los cambios de ESC anual según la proyección climática. Para el RCP 4.5, U4A da aumentos generalizados, más patentes en los tres cuartos occidentales y en Canarias, con leves descensos en Levante. Por otro lado, M4A, N4A y Q4A dan descensos en la parte central y occidental y aumentos en zonas de Levante. R4A muestra descensos generalizados. Los patrones de cambio son similares para el RCP 8.5
- Para el periodo 2040-2070 continúa la dispersión de resultados. El patrón de cambios para el RCP 4.5 es similar que el del Periodo 2010-2040, resaltando los menores aumentos según las proyecciones U4A y F4A y los mayores aumentos según Q4A en Levante. Para el RCP 8.5, destaca como las reducciones de ESC se van haciendo dominantes en casi todas las proyecciones, con las salvedades de U8A, que muestra patentes ascensos en las cuencas desde el Duero hacia el sur, en el Pirineo y en las islas occidentales de Canarias, y de F8A, que muestra ascensos ligeros y aislados en el centro y NE peninsular. U8A y U4A intercambian sus resultados, siendo en este periodo U8A la que pronostica mayores aumentos de ESC, superiores al 25% en algunas zonas del centro, oeste, sur, Canarias y del Pirineo.
- Para el periodo 2070_2100 sigue la diferencia de resultados si bien la reducción de ESC es la tónica dominante y es mayor que en el periodo de impacto anterior. La mayoría de las proyecciones muestran descensos en todas las zonas salvo en el Levante.
Hay fuertes descensos que sobrepasan el 50% en amplias zonas del centro y SO peninsular y de Canarias (R8A, R4A, Q8A y N4A). U4A y U8A son la excepción ya que muestran amplias zonas con aumentos en el oeste peninsular, superando el 25% en algunas zonas y, en menor medida, F4A, con aumentos menos notables repartidos por la Península.

No hay ninguna proyección que dé tendencia creciente significativa en los cambios de ESC para el siglo XXI en ninguno de los ámbitos territoriales.

6.5. Cambios anuales para el conjunto de España: aportaciones (APN)

Una variable hidrológica relacionada con la ESC es la aportación, o **Aportación hídrica (APN)**, que indica el volumen de agua que circula por el río en un periodo de tiempo dado. Este volumen se ha calculado integrando la ESC de todas las celdas de la cuenca vertiente a cada celda. De ese modo, los mapas de ESC reflejan la ESC generada en cada celda, mientras que los mapas de APN reflejan el caudal que pasa por cada celda de río y que por tanto recoge el agua de las celdas que le vierten agua.

El impacto se ha analizado en aquellas celdas que constituyen los ríos más representativos. Para ello, se han adoptado aquellos ríos que fueron identificados como masas de agua superficiales para la Directiva Marco del Agua.

Los criterios seguidos para asignarle el carácter de río a una celda son: celdas en las que la cuenca vertiente es mayor de 10 km² o el caudal medio observado es superior a 100 l/s. De ese modo, el mapa de APN diferencia claramente los cauces de los ríos del resto del territorio.

En este apartado se presentan los resultados del análisis de los mapas de APN estimados en los ríos de España por las diferentes proyecciones para cada uno de los 3 periodos de impacto (PI). Lógicamente, los mapas de cambio de aportaciones son similares a los de cambio de ESC, anteriormente comentados, con la particularidad de que los primeros reflejan también la ESC de la cuenca vertiente.

Si bien los cálculos se han hecho en todos los ríos masas de agua superficiales, en el estudio original se ha hecho una extracción de esos ríos para facilitar su visualización, como en el ejemplo que se ofrece en la Figura 15 para el PI 2010-2040 en el RCP 4.5 para celdas en las que la cuenca vertiente es mayor de 50 km².

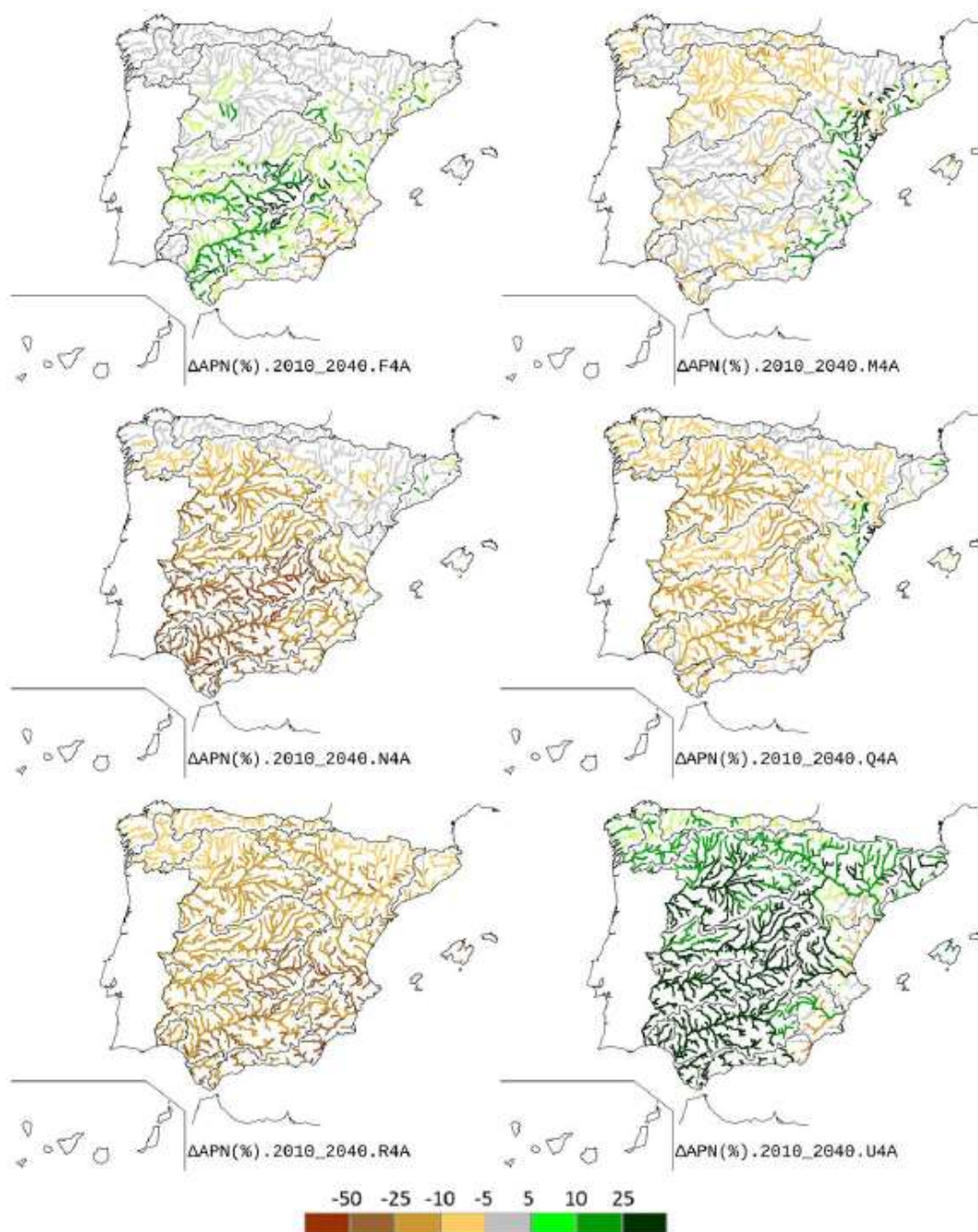


Figura 15. Variación (%) APN anual para 2010-2040 según las proyecciones RCP 4.5.

Por tanto a partir de esos mapas de variación de APN, se pueden obtener las APN de los ríos en régimen natural estimadas para los periodos de impacto según las diferentes proyecciones analizadas. Para ello, se aplican esos porcentajes de variación a las APN

obtenidas mediante la simulación hidrológica en régimen natural de los datos climáticos observados durante el periodo de control (PC) 1961-2000.

Hay que recalcar que estos valores del PC se han obtenido sin tener en cuenta las alteraciones del régimen hidrológico de origen humano, tales como presas, canalizaciones, trasvases, bombeos. Por lo tanto, son valores que difieren de los aforados

En la Figura 16 se han seleccionado una serie de puntos representativos de la hidrología española donde se ha calculado la APN anual en el PC y en los tres PI del siglo XXI. Se han incluido los resultados de utilizar los cambios de las 12 proyecciones directas.

De nuevo se hace patente que las variaciones de APN son bastantes diferentes según las proyecciones climáticas. El margen de variación es acusado en todos los periodos y en todos los casos representados, siendo mayor hacia el sur.

A modo de ejemplo, las aportaciones en régimen natural del río Ebro a su paso por Zaragoza para el periodo 2010-2040, podrían oscilar en un margen alrededor de los 9000 hm³/año actuales, desde unos 7.700 hm³/año a los 10.100 hm³/año. Para finales de siglo podrían oscilar desde los aproximadamente 8.400 hm³/año a descender hasta unos 5000 hm³/año. Lógicamente, esta incertidumbre tiene importantes implicaciones prácticas a la hora de elaborar estrategias de planificación para actuar ante el cambio climático.

En general, se pronostica una reducción de la APN anual, que sería más acusada conforme avanzara el siglo XXI. No obstante, hay proyecciones que darían también aumentos de menor entidad, la mayoría durante el PI1, pero también de manera más ocasional durante los periodos posteriores (como por ejemplo en el río Miño en Ourense o el Duero en Zamora). El escenario de emisiones RCP 8.5 da mayores reducciones de RRHH que el RCP 4.5, más patentes hacia finales de siglo.

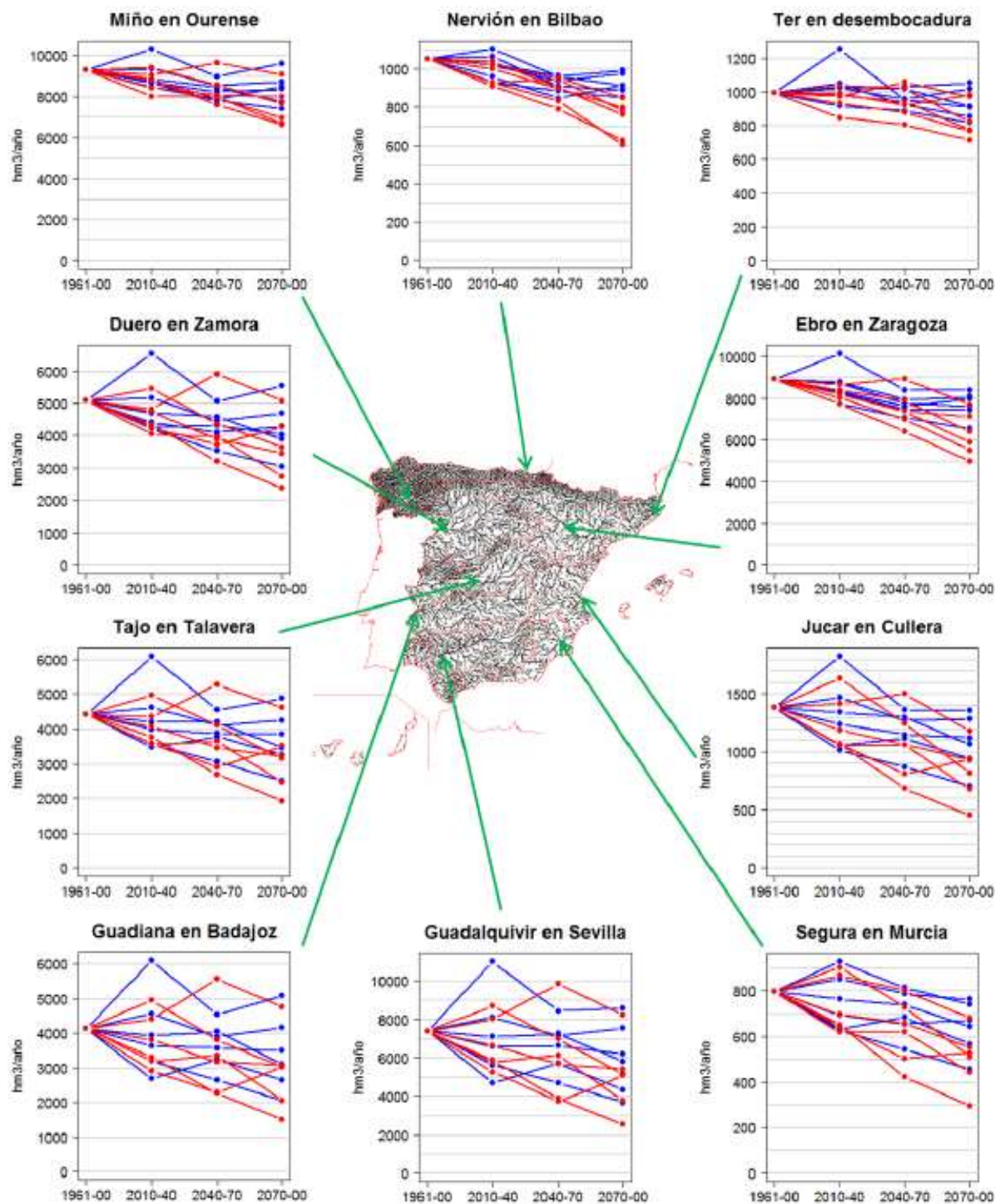


Figura 16. APN anual en algunos puntos fluviales representativos, simulados a partir de datos climáticos observados para el PC y estimados para los tres PI según proyecciones climáticas del RCP 4.5 (azul) y RCP 8.5 (rojo).

7. RESUMEN DEL IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LAS SEQUIAS

7.1. Resultados generales sobre los Recursos Hídricos

En las Figuras 17 y 18 se muestran los cambios porcentuales estimados para las variables PRE, ETP, ETR y ESC en el ámbito Peninsular y Canarias. En el estudio original se presentan por los diferentes ámbitos de DDHH para los tres PI con relación al PC.

Se observa claramente la incertidumbre reflejada por el rango de resultados de cambio, así como la tendencia general a una reducción de RRHH: reducción de la PRE, aumento de la ETP, ligeras reducciones de ETR y fuertes reducciones de ESC. Las reducciones son mayores conforme avanza el siglo XXI y en el RCP 8.5, siendo la diferencia entre ambos RCP muy clara para el PI3 (2070-00).

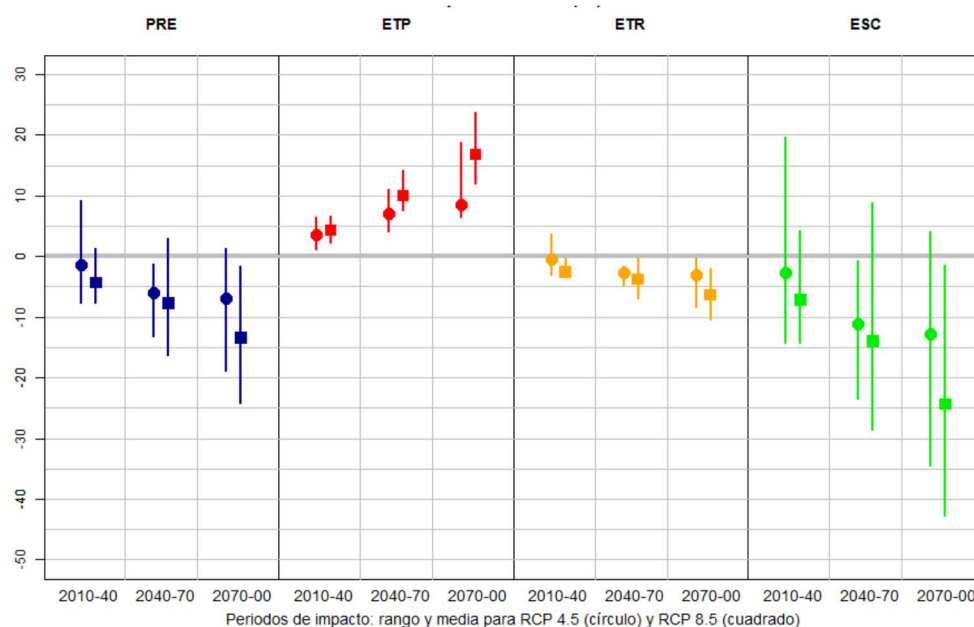


Figura 17. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para el conjunto de la Península. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

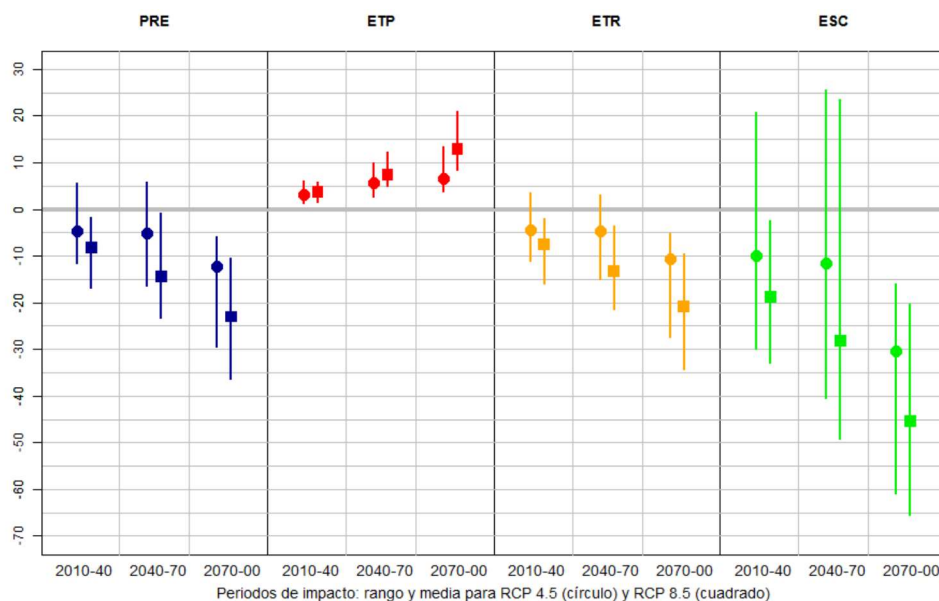


Figura 18. Cambio (%) en las principales variables hidrológicas en los tres PI respecto al PC para las DDHH de Canarias. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados).

Se estiman mayoritariamente **descensos de precipitación**, siendo mayores estos descensos en el cuadrante SO de la Península y en los archipiélagos. Para el conjunto de España, la media de los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -2% y -4% para 2010-2040, -6% y -8% para 2040-2070 y -7% y -14% para 2070-2100.

La escorrentía es la variable que mejor caracteriza los recursos hídricos de una zona y tiene mayor aplicación práctica. Promediando los resultados de las proyecciones para España, se **estiman siempre descensos de escorrentía**; los cambios para los RCP 4.5 y 8.5 son respectivamente del -3% y -7% para 2010-2040, -11% y -14% para 2040-2070 y -13% y -24% para 2070-2100.

En las gráficas de la Figura 19 se representan las variaciones medias porcentuales en las variables hidrológicas más destacadas: precipitación (P), escorrentía (ESC) (recarga acuíferos (REC) y evapotranspiración (ETP)).

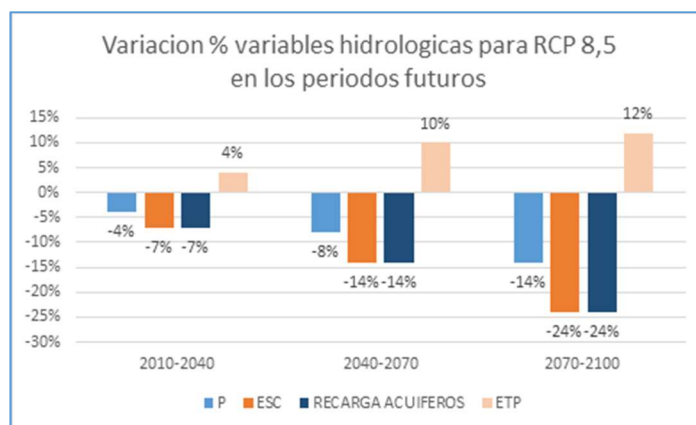
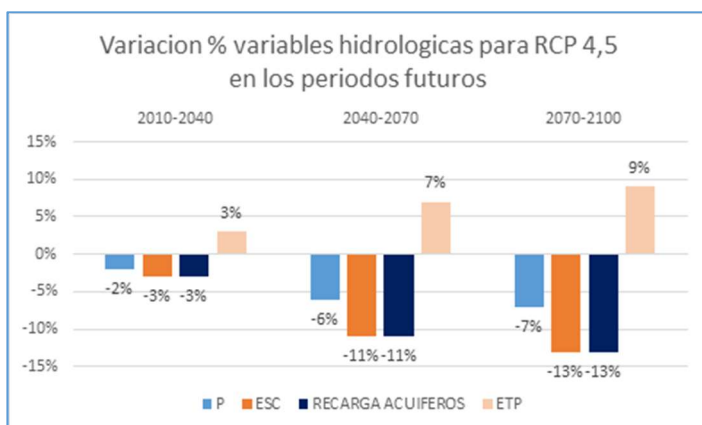


Figura 19 Variaciones % medias de las variables hidrológicas P, ESC, REC y ETP para los tres periodos de impacto.

Hay una gran disparidad de resultados según las proyecciones, síntoma de incertidumbre de los resultados.

La incertidumbre es mayor en el levante peninsular y archipiélagos.

Las proyecciones del modelo climático MRI.CGCM3 (UA) son las más favorables, ya que son las que pronostican un mayor incremento de recursos hídricos en la mayor parte de España, salvo en Levante. En el lado contrario, las proyecciones del modelo climático MIROC.ESM (RA) son muy desfavorables al pronosticar grandes reducciones de recursos hídricos. El resto de proyecciones dan, con carácter general, reducciones de recursos hídricos.

En general se pronostica una reducción de recursos hídricos que se irá acentuando conforme avance el siglo XXI, por lo que será más acusada en el último periodo de impacto (2070-2100).

La reducción de recursos hídricos es más notable en el RCP 8.5 que en el RCP 4.5, haciéndose más marcada esta diferencia conforme avanza el siglo XXI.

Hay una tendencia a aumentar los recursos hídricos en los meses alrededor de febrero, en detrimento de los recursos en los meses de verano

En general, hay una reducción de recursos hídricos más intensa hacia el sur peninsular y en los archipiélagos y menor reducción, o incluso aumento, en algunas zonas del este peninsular.

Desde el punto de vista de su distribución espacial

Los cambios pronosticados se resumen en los siguientes aspectos:

- La mayoría de las proyecciones pronostican una reducción de PRE en todos los ámbitos, siendo más acusada hacia finales de siglo y en el RCP 8.4.
- La reducción es más intensa en las DDHH del oeste y centro peninsular y Canarias, mientras que se estiman menores reducciones e incluso incrementos hacia el este peninsular. Por el contrario, las proyecciones UA muestran menores descensos y una polaridad contraria, con los mayores descensos hacia Levante
- Hay un aumento generalizado y progresivo de la ETP en todos los ámbitos territoriales. Es, en general, mayor en las zonas interiores que en las zonas costeras. Destacan los altos incrementos que se dan en general en las divisorias de aguas de las grandes cuencas hidrográficas, lo que implica un aumento de la ETR allí donde hay más disponibilidad de agua y, por lo tanto, una reducción de RRHH.
- No se observan unos claros patrones de cambio en el ciclo anual de la PRE ni la ESC de España, salvo la tendencia a concentrarse ambas alrededor de febrero en todos los PI y RCP, en contraposición con una reducción al final del verano.
- Apenas se aprecian cambios en la estacionalidad de la ETP, salvo una menor subida de la ETP en invierno. Los cambios en el ciclo anual de la ETR están determinados por los cambios en la ETP y la disponibilidad de agua; así, se estiman aumentos de la ETR en invierno y descensos de la ETR en verano, determinados por los descensos de la PRE. En invierno se da el mayor aumento de la PRE (o menores descensos) junto con el menor incremento de la ETP. Es en esos meses cuando se dan las precipitaciones de origen atlántico y, por tanto causa una atenuación en la reducción de RRHH, sobre todo hacia el oeste de España.
- En resumen, hay que destacar la disparidad de resultados de las proyecciones, desde aumentos de RRHH a fuertes disminuciones, si bien el conjunto de los resultados apunta a una reducción de RRHH que se acentúa en el RCP 8.5 y conforme avanza el siglo XXI.

7.2. Resultados generales sobre el impacto sobre sequías:

El estudio original del impacto de las sequías se ha reflejado como cambio en el Periodo de Retorno (T) de las sequías en cada uno de los PI con respecto al PC. En el informe se han incluido los gráficos para sequías de duración 2 y 5 años, proyección y ámbito. En abscisas se indica el déficit acumulado medio y en ordenadas el periodo de retorno en años. Se han representado las curvas para cada el PC y cada PI.

Los Periodos de Retorno (T) para un déficit mínimo dado, son superiores para una sequía de 5 años que para una de 2 años, puesto que es más improbable una sequía larga con un déficit medio anual que una sequía corta con ese mismo déficit medio anual.

Los resultados generales son los siguientes:

- Se pronostica de manera general una reducción de recursos hídricos en España conforme avance el siglo XXI y por lo tanto un aumento de la escasez de agua en España.
- **Por otro lado, también se pronostica un cambio en el régimen de sequías para cada periodo de impacto (PI) con relación al periodo de control (PC). La mayoría de las proyecciones climáticas muestran un futuro en el que las sequías serían más frecuentes, acusándose ese efecto cuanto más nos alejamos en el siglo XXI.**
- Así, para el RCP 4.5, las sequías de 2 años de duración serán más frecuentes (menor periodo de retorno para un mismo déficit) en el PI3 2070-2100 y PI2 2040-2070 y menos frecuentes en el PC 1961-2000 (tres proyecciones) y PI1 2010-2040 (tres proyecciones). Lo mismo ocurre con las sequías de 5 años de duración, si bien éstas tienen un mayor T para el mismo déficit medio anual que las de 2 años. No obstante, hay proyecciones que no muestran tan clara esa señal, especialmente en cuencas del Levante y Canarias.
- Se aprecian escasas diferencias entre los resultados aportados por ambos escenarios de emisiones, si bien las sequías tenderían a ser más frecuentes para el escenario RCP 8.5, sobre todo para los últimos periodos del siglo XXI.

Desde el punto de vista de su distribución espacial

En el anexo 4 del estudio original se encuentran los gráficos de cambio en el régimen de las sequías en los **diferentes ámbitos de las DDHH**.

- En líneas generales, al igual que se veía para el conjunto de España, en las DDHH del Norte y en concreto en la DH de Galicia-Costa, la mayoría de las proyecciones pronostican un aumento de la frecuencia de sequías cuánto más nos alejamos en el tiempo. Para el RCP 4.5, la mayoría de las proyecciones dan los mayores T para el periodo de control y los menores para el Periodo de impacto 3 o Periodo de impacto 2. Un patrón similar de cambios se observa para el RCP 8.5.
- Las DDHH del Duero, Tajo y Guadiana, dan resultados similares, un régimen más propenso a sequías que en el Norte.
- La DH del Guadalquivir es representativa de las DDHH del sur de la Península. El impacto de las sequías es de mayor frecuencia que en las cuencas anteriores.
- Para el SE de España, en concreto para la DH del Segura, los resultados del impacto son y frecuencia de sequías son más o menos como las del Tajo. Casi todas las proyecciones siguen la tónica general de una mayor frecuencia de sequías conforme avanza el siglo XXI.
- La DH del Ebro presenta características similares a las del norte de España, con sequías menos frecuentes que en el resto de ámbitos.
- Las CCII de Cataluña es la DH en la que se estima una menor reducción de RRHH. Incluso se estima un aumento para el PI1 y RCP 4.5. La frecuencia de sequías es bastante similar a la DH de la Segura. Hay bastantes discrepancias entre proyecciones ya que no se muestra tan clara la tendencia a aumentar las sequías conforme avanza el siglo XXI. Tan sólo las proyecciones NA y MA muestran dicha tendencia, mientras que RA y UA muestran comportamientos opuestos. Tampoco se observa que la frecuencia de sequías aumente en el RCP 8.5 con relación al RCP 4.5, sino más bien al contrario.
- Baleares muestra resultados similares a los de las CCII de Cataluña, con discrepancias entre proyecciones, donde es difícil interpretar un patrón común de cambio en el régimen de sequías.
- Las sequías siguen los cambios generales en casi todos los casos, con aumento de su frecuencia conforme avanza el siglo XXI, con excepciones como las de las proyecciones NA que muestran pocos cambios o son menos claros, o las de las proyecciones RA que dan un descenso de la frecuencia de sequías en el PI1 respecto al PC para sequías de 2 y 5 años y en ambos RCP.

8. APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS A LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA.

Según la normativa actual los planes hidrológicos de cuenca se han de aprobar cada 6 años. Los siguientes han de aprobarse en 2021 y deberán considerar dos horizontes temporales futuros: 2027 y 2039. La Instrucción de Planificación Hidrológica, (IPH) (Orden ARM/2656/2008), establece que en el análisis del horizonte temporal a largo plazo, correspondiente en los próximos planes al año 2039, debe tenerse en cuenta el posible efecto del cambio climático sobre los RRHH naturales de la DH.

La IPH establece además que las series de recursos hídricos (RRHH) que deben de utilizarse en la elaboración de los planes hidrológicos son la **serie larga** de observaciones del periodo histórico (**1940-2006**) y la **serie corta** del periodo histórico (**1980-2006**). El motivo de esta circunstancia es la mayor tendencia negativa que experimenta la serie larga, respecto a la serie corta.

Por otro lado, el impacto evaluado en este estudio se ha expresado como cambios de propiedades estadísticas medias de periodos futuros de 30 años con relación a un PC de 39 años 1961-2000. Habida cuenta de los valores disponibles, se tomaron los periodos futuros de impacto 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100.

En el anterior informe del CEDEX (2010) se daban cambios de RRHH en un periodo futuro simulado respecto a un periodo de control simulado. Para establecer los % de reducción de recursos hídricos por Demarcaciones hidrográficas se aplicó al % de reducción simulado a futuro, la relación existente a su vez entre el periodo de control observado respecto a las dos series (larga y corta) consideradas en la evaluación de recursos hídricos

En la Tabla 5 y siguiendo el mismo criterio se presenta una comparativa con los datos que arroja el informe de CEDEX 2017, respecto al estudios antecedentes (CEDEX 2010) y aparecen también los porcentajes dados en el LBAE (Libro Blanco del Agua en España), para el año 2030, que fueron luego adoptados en la IPH para considerar el efecto del cambio climático en el horizonte de planificación 2027 en las cuencas intercomunitarias.

DDHH - Ámbito ¹	IPH-LBAE	CEDEX 2010		Presente Informe	
		SRESB2	SRESA2	RCP 4.5	RCP 8.5
España	-5	-5	-6	-3	-7
Miño-Sil	-3	-2	-5	-4	-7
Galicia Costa	-2	-4	-7	-4	-7
Cantábrico Oriental	-2	-9	-11	-4	-8
Cantábrico Occidental	-2	-8	-11	-2	-6
Duero	-6	-5	-7	-5	-10
Tajo	-7	-7	-7	-5	-10
Guadiana	-11	-2	-6	1	-5
Guadalquivir	-8	-8	-6	0	-7
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-7	-7	-4	1	-7
Guadalete y Barbate				3	-4
Tinto, Odiel y Piedras				3	-7
Segura	-11	-8	-5	-8	-11
Júcar	-9	-12	-3	-8	-15
Ebro	-5	-5	-5	-1	-5
Cuencas Internas de Cataluña	-5	-7	0	7	-3
Islas Baleares	-7	-34	-25	-29	-36
Canarias	-10	-28	-20	-12	-20

Tabla 5.. Comparativa de porcentaje de cambio ESC para considerar el efecto del cambio climático para el periodo 2010-2040 en relación a 1940-2006, según la IPH (horizonte 2027), CEDEX 2010 y el presente informe

De cara a los próximos planes hidrológicos de cuenca que se aprueben para el 2021 deberán tener en cuenta el cambio climático para calcular los RRHH en el horizonte de planificación a largo plazo del año 2039.

Se considera, que lo más adecuado y sencillo es que se adopten los porcentajes intermedios que resultan para el periodo PI1 (2010-2040) y el periodo PI2 (2040-2070), puesto que el año 2039 está prácticamente en la frontera entre ambos. La incorporación del efecto del cambio climático supone aplicar a las series de ESC 1940-2006 (periodo indicado en la IPH) los porcentajes que se muestran en la Tabla 6.

Cambios para 2039 vs. 1940-2006	RCP 4.5	RCP 8.5
España	-7	-11
Miño-Sil	-8	-10
Galicia Costa	-9	-10
Cantábrico Oriental	-8	-11
Cantábrico Occidental	-6	-9
Duero	-9	-13
Tajo	-9	-13
Guadiana	-3	-10
Guadalquivir	-4	-12
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-1	-11
Guadalete y Barbate	0	-9
Tinto, Odiel y Piedras	-1	-11
Segura	-11	-18
Júcar	-12	-21
Ebro	-5	-9
Cuencas Internas de Cataluña	2	-5

Tabla 6. Porcentaje de cambio a aplicar a las series de ESC 1940-2006 para considerar el efecto del cambio climático en el horizonte 2039.

IMPORTANTE RESALTAR:

Los porcentajes de cambio de series anuales de una DH se pueden aplicar a todas las series de la DH, simplificando su uso al considerar la incertidumbre inherente a los estudios de cambio climático.

No obstante, podría ser conveniente aplicar diferentes porcentajes cuando haya diferencias relevantes en los cambios estimados en diferentes zonas dentro de una DH, (tal como plantean Marcos-García y Pulido- Velázquez (2017) en estudios de impacto de CC en la DH del Júcar), donde la reducción de RRHH pronosticada sería mayor en cabecera que en las subcuentas mediterráneas.

La aplicación informática que acompaña a este informe CAMREC posibilita la obtención de porcentajes de cambio para aquellas zonas que determine el usuario, de manera que se pueden aplicar los resultados de este estudio también a otras subzonas dentro del ámbito territorial de una DH.

9. APLICACIÓN INFORMÁTICA CAMREC.

Junto con el estudio CEDEX 2017 se presenta el atlas cartográfico preparado específicamente como un complemento de QGIS. Los objetivos del atlas son suministrar los mapas que mejor resumen los resultados del estudio y facilitar su consulta y análisis. Por ello, el atlas contiene una selección de los mapas más ilustrativos, habida cuenta del gran número de mapas generados en este trabajo y que la mayoría son básicamente mapas de trabajo.

Se encuentra disponible junto a su Manual de instalación y manejo en AdapteCCa.es <http://www.adaptecca.es/sectores-y-areas/recursos-hidricos>, la plataforma de intercambio y consulta de Información sobre adaptación al Cambio Climático en España.



Los mapas están organizados en una base de datos geográfica y se ha desarrollado una aplicación informática CAMREC que facilita su visualización, consulta y análisis. La aplicación se ha desarrollado en el entorno del sistema de información geográfica (SIG) QGIS. Se ha elegido QGIS al ser éste un SIG tipo *raster*, gratuito y de libre difusión, de manera que puede utilizarse fácilmente por cualquier tipo de interesado sin precisarse requerimientos económicos.



Los objetivos concretos de CAMREC son los siguientes:

- **Visualizar y consultar los mapas que sintetizan el estudio del impacto de cambio climático en los recursos hídricos.**

Se trata de los mapas mensuales de las principales variables del ciclo hidrológico durante el PC y los 3 Periodos de impacto, básicamente: precipitación, evapotranspiración real (ETR) y potencial (ETP), recarga subterránea, escorrentía y aportación hídrica en los ríos. (Ejemplo en Figura 20).

Como resultado se han elaborado unos 300.000 mapas de resolución 1 km².

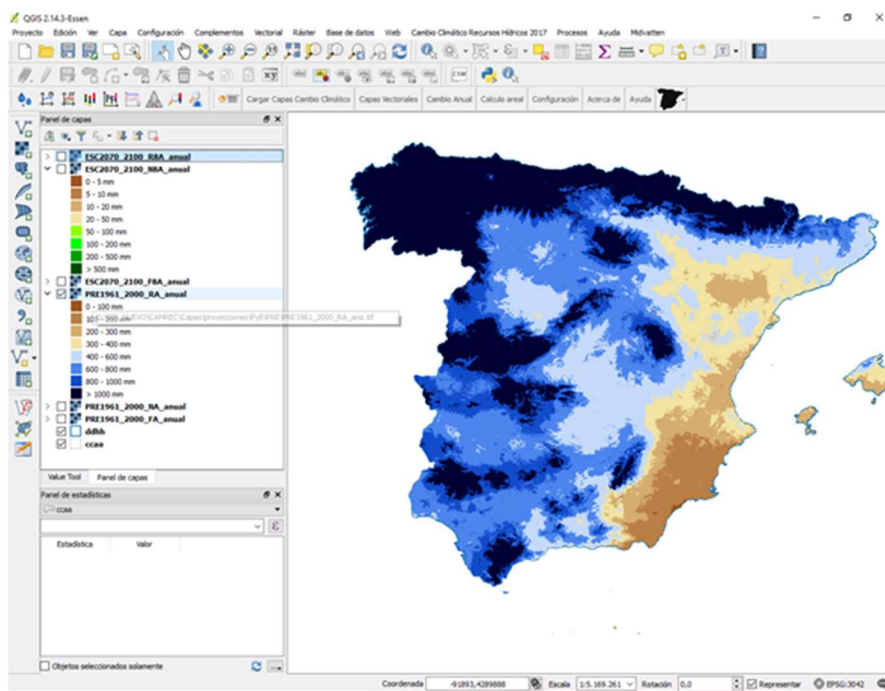


Figura 20. Distribución de la PRE media anual en el PC 1961-2000 en la proyección RA

- Calcular el cambio anual estimado en una variable hidro-climática expresado en porcentaje entre los periodos de impacto futuros y el periodo de control para cualquier capa vectorial (bien predefinidas en el proyecto o bien otras incorporadas)

Algunos ejemplos salidas gráficas: Figuras 21 a 24.

- Figura 21. Cambio anual de PRE % por masas de aguas subterráneas para el periodo de Impacto 2010- 2040 en la Proyección UA RCP 8.5.
- Figura 22. Cambio anual de escorrentía por subcuencas para el periodo de Impacto 2010- 2040 en la Proyección UA RCP 8.5.
- Figura 23. Cálculo areal de la Precipitación media anual por DDHH el periodo de Impacto 2010- 2040 en la Proyección UA RCP 8.5.
- Figura 24. Cálculo areal de la Recarga media anual por masas subterráneas en el periodo de Impacto 2010- 2040 en la Proyección QA RCP 4.5.

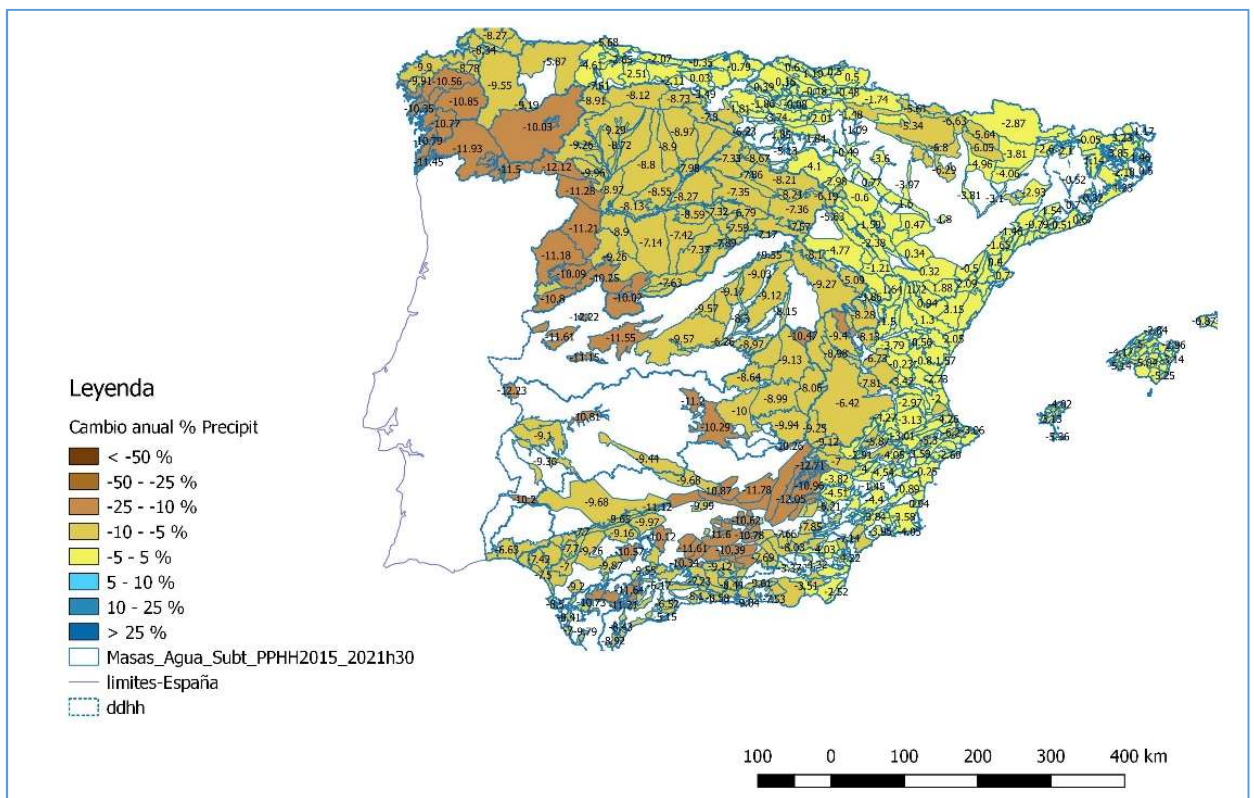


Figura 21. Cambio anual de PRE % por masas de aguas subterráneas ara el periodo de Impacto 2010- 2040 en la Proyección UA RCP 8.5.

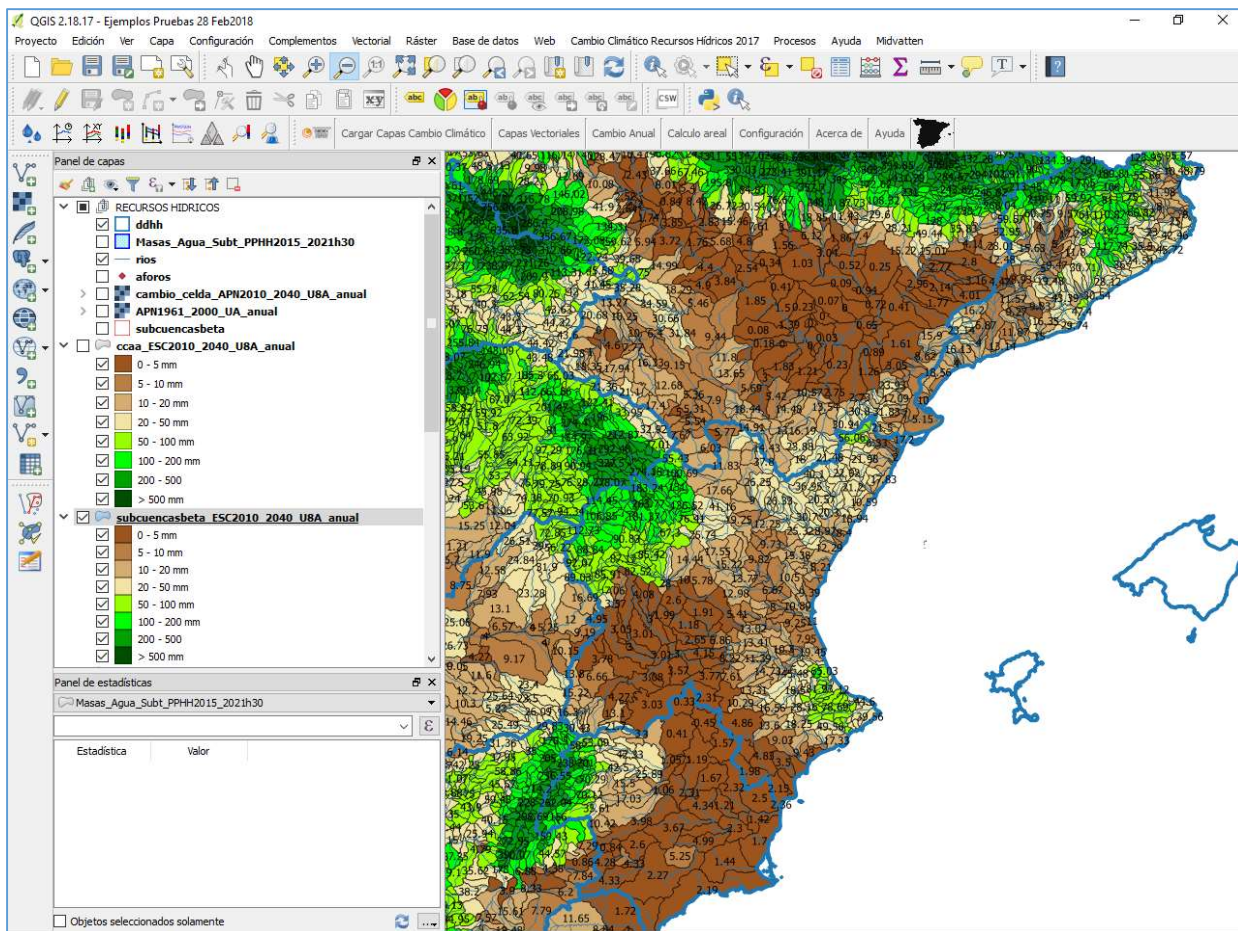


Figura 22. Cambio anual de escorrentía por subcuencas para el periodo de Impacto 2010- 2040 en la Proyección UA RCP 8.5.

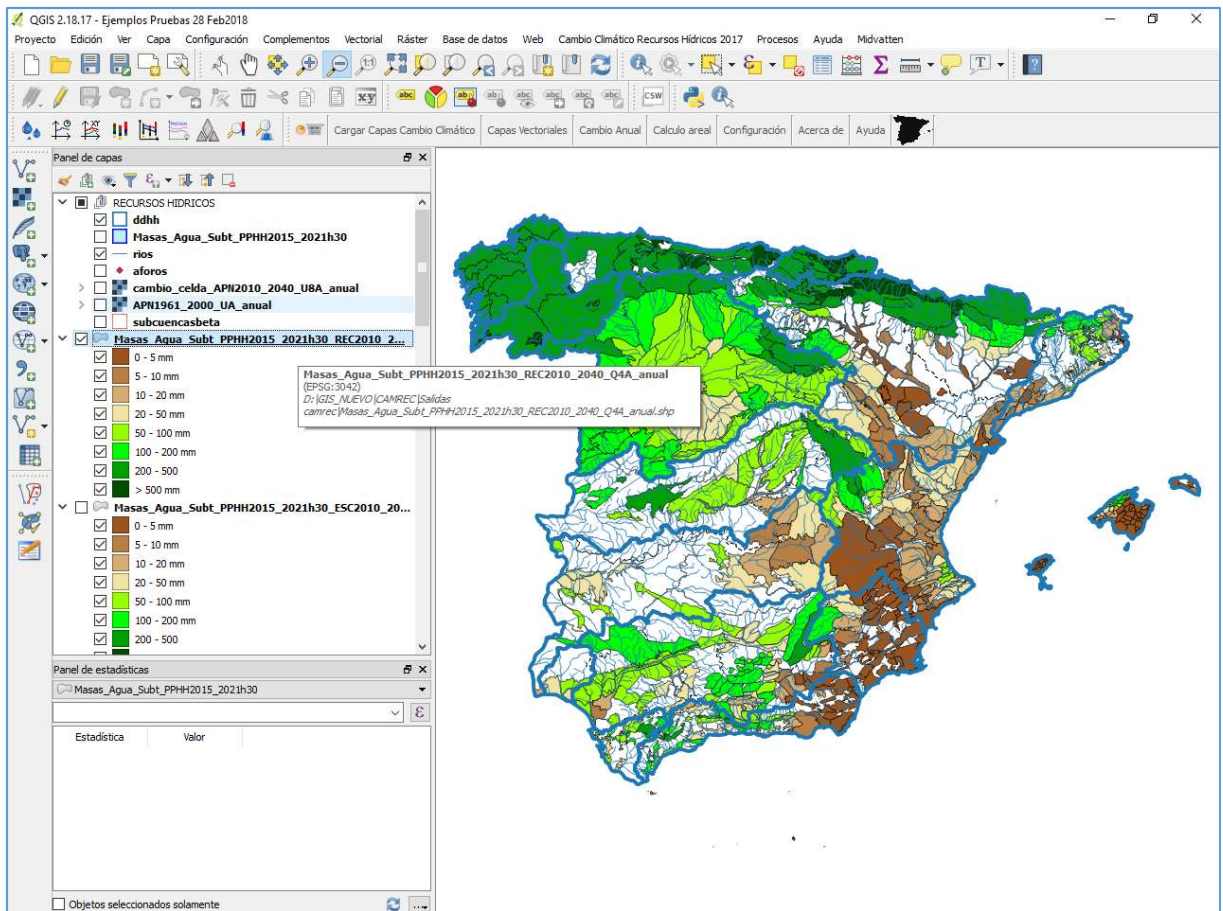


Figura 24. Cálculo areal de la recarga media anual por masas subterráneas en el periodo de Impacto 2010- 2040 en la Proyección QA RCP 4.5.