

Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación?

Climate change and water planning: is a single reduction coefficient appropriate for the whole river basin district?

Marcos-García, P.^{a1}, Pulido-Velázquez, M.^{a2}

^{a1}Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n 46022 Valencia.
E-mail: ^{a1}patmarg5@doctor.upv.es, ^{a2}mapuve@hma.upv.es

Recibido: 13/07/2016

Aceptado: 13/10/2016

Publicado: 31/01/2017

RESUMEN

La incorporación del cambio climático a la planificación hidrológica no es tarea sencilla, dada la alta incertidumbre asociada. En España, actualmente se consideran los escenarios futuros aplicando un coeficiente de reducción único a las series históricas de aportaciones. El presente artículo analiza la cuestión para el Sistema de Explotación Júcar, a la luz de los últimos escenarios de cambio climático (AR5) y comparando los resultados de tres modelos hidrológicos conceptuales. De los resultados se deduce que la disminución de precipitación y el aumento de temperatura podrían ser mayores en cabecera que en las subcuencas mediterráneas. Asimismo, la dispersión respecto al posible porcentaje de reducción del recurso es elevada, pudiendo resultar muy superior a las previsiones del Plan Hidrológico. Por tanto, sería necesario analizar la robustez y resiliencia del sistema frente a un rango plausible de situaciones de estrés, para identificar dónde es más vulnerable y proponer medidas de adaptación.

Palabras clave | planificación hidrológica; cambio climático; incertidumbre; análisis de tendencias.

ABSTRACT

The inclusion of climate change in water planning is not an easy task, due to its high uncertainty. In Spain, climate change effect on water resources is quantified through the application of an only reduction coefficient to the historical time series of inflows in every river basin district. This paper is intended to provide further insight into this topic, using the new climate change scenarios and three conceptual rainfall-runoff models to simulate future inflows for the Jucar river basin. Our results suggest that the headwaters basins are prone to suffer higher rainfall reductions and temperature increases than the Mediterranean basins. Moreover, great uncertainty about resources' reduction exists, which could be significantly greater than current water plan projections. In our opinion, system's resilience should be confronted with a plausible rank of climatic stress conditions, to identify vulnerabilities and propose adaptation measures.

Key words | water planning; climate change; uncertainty; trend detection.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014a), las emisiones actuales de gases de efecto invernadero aumentarán el calentamiento global y producirán cambios duraderos en el clima, incrementando la aparición de eventos extremos. En estas condiciones, las sequías podrían ser más frecuentes y severas a escala global (Dai, 2013), aumentando sus impactos en los recursos hídricos. Asimismo, se ha identificado un patrón de cambio mundial de la escorrentía anual, incrementándose en regiones pertenecientes a altas latitudes y disminuyendo en zonas como el sur de Europa, África occidental o el sur de Latinoamérica (Bates *et al.*, 2008). En este contexto, la región Mediterránea emerge como un punto de especial incidencia del cambio climático (Diffenbaugh y Giorgi, 2012), proyectándose reducciones en la precipitación media anual, aumentos en la evapotranspiración a consecuencia del incremento de la temperatura, veranos más secos y mayor riesgo de episodios de sequía, reduciéndose la recarga de los acuíferos y la escorrentía superficial (Howard, 2011). No obstante, existe una alta incertidumbre respecto a los impactos del cambio climático en la respuesta hidrológica de las cuencas mediterráneas, debida a la elevada dispersión de las señales climáticas simuladas por diferentes modelos (Deidda *et al.*, 2013; Girard *et al.*, 2015). En cualquier caso, se espera que los impactos negativos del cambio climático afecten principalmente a las zonas semiáridas con escasez de agua y un balance frágil entre recursos hídricos y demandas (Estrela *et al.*, 2012).

El proceso más común para evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos combina el uso de proyecciones climáticas con la modelización hidrológica. Es posible identificar cuatro fases principales en este tipo de estudio: 1) construcción de escenarios de emisiones/concentraciones de gases de efecto invernadero; 2) modelización del clima global; 3) reescalado y corrección del sesgo de las proyecciones meteorológicas y; 4) estimación de impactos mediante modelos hidrológicos. Sin embargo, existe un intenso debate en la comunidad científica sobre la aplicación más adecuada del amplio abanico de métodos y modelos disponibles para efectuar cada uno de estos pasos, sin que exista en la actualidad una metodología universalmente aceptada que prepondere el uso de un determinado método o modelo en detrimento de otros. Por tanto, a la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas (asociada principalmente a los niveles futuros de emisiones de gases de efecto invernadero, a la representación simplificada de los procesos climáticos, al conocimiento imperfecto de las condiciones climáticas actuales y a la dificultad que implica representar las variaciones interanuales en proyecciones a largo plazo), es preciso añadir la que introducen las decisiones respecto a los procedimientos de reescalado, corrección del sesgo y selección de modelos, tanto climáticos (globales y regionales) como hidrológicos. En el caso de estos últimos, en algunas regiones la dispersión de los cambios proyectados debida a la elección de un determinado modelo hidrológico podría ser incluso mayor que la resultante de los modelos climáticos (Hagemann *et al.*, 2013; Mendoza *et al.*, 2015). Esta “cascada” de incertidumbre (Wilby y Dessai, 2010) puede plantear ciertas dudas respecto al “realismo” de los resultados del análisis de impacto y la pertinencia de incorporarlos en los procesos de planificación hidrológica a corto plazo. No obstante, es necesario considerar que incierto no significa desconocido o falso, máxime cuando la incertidumbre puede ser cuantificada y se encuentra presente en múltiples decisiones de la vida cotidiana. Así, la información incierta se revela siempre de mayor utilidad que las certezas erróneas (Blöschl y Montanari, 2010).

En España, se consideraron por primera vez los impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España (MIMAM, 2000), a través de dos escenarios: el primero establecía un aumento de 1°C en la temperatura media anual, mientras que el segundo, además de este incremento de temperatura, introducía una disminución de un 5% en la precipitación media anual. De este modo, se obtuvieron unos porcentajes de reducción del recurso respecto a la serie histórica variables en función de la Demarcación Hidrográfica (del 2 al 11% para el primer escenario y del 9 al 22% en el segundo). Posteriormente, la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, Orden ARM/2656/2008) estableció la necesidad de evaluar el efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos de cada Demarcación, señalando que, hasta que dichas evaluaciones no estuviesen disponibles, se deberían aplicar los coeficientes de reducción global especificados en dicha Instrucción (que se correspondían con los obtenidos para el primer escenario del Libro Blanco del Agua). Por tanto, en España la incorporación del cambio climático a los Planes Hidrológicos de cuenca se produjo por primera vez en el ciclo de planificación anterior (2009-2015). En general, el tratamiento de esta cuestión en el primer ciclo de planificación ha sido escueto y, la mayoría de los casos, se ha limitado a aplicar a la serie histórica los porcentajes de reducción de volúmenes de agua contenidos en la IPH para obtener los recursos de agua disponibles con horizonte 2027 (Olcina Cantos, 2014). Asimismo, los nuevos Planes Hidrológicos de las cuencas intercomunitarias para el ciclo de planificación 2015-2021 (recientemente aprobados por el RD 1/2016), tampoco incorporan novedades metodológicas en este aspecto (se sigue aplicando un porcentaje único a las aportaciones de la serie histórica larga

(1940-2005)). En este caso, los coeficientes reductores han sido revisados a raíz del estudio del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEDEX-DGA, 2011), adoptando generalmente las previsiones del escenario más desfavorable de emisiones, el A2 (*Special Report Emissions Scenarios*, SRES), correspondiente al 3^{er} informe (AR3) del IPCC (2001).

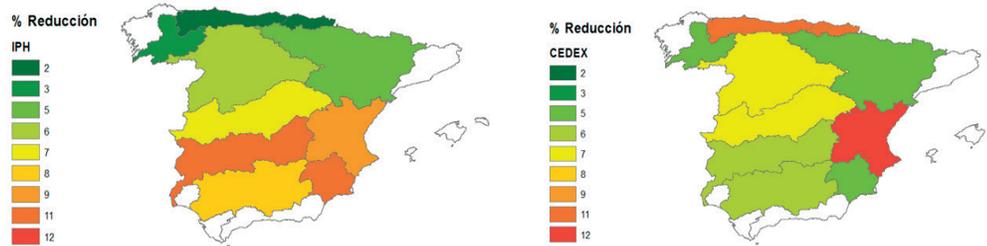


Figura 1 | Reducción de las aportaciones en las cuencas intercomunitarias según la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, Orden ARM/2656/2008) y CEDEX (CEDEX-DGA, 2011).

Como se puede observar en la Figura 1, los porcentajes de reducción recomendados en el estudio del CEDEX (CEDEX-DGA, 2011) muestran cambios importantes en algunas zonas respecto a los considerados por la IPH. Así, mientras que en el caso de la IPH es posible identificar un gradiente norte-sur que asigna las menores reducciones a las cuencas septentrionales (Cantábrico y Miño-Sil), no sucede lo mismo en el escenario A2 considerado por el CEDEX, que atribuye las mayores reducciones a las cuencas cantábricas (11%, cuando en la IPH se recomendaba un 2%) y al Júcar (12%). Por el contrario, en las demarcaciones hidrográficas del Guadalquivir, Gadiana y Segura, las más pesimistas según la IPH (hasta el 11% en las dos últimas), el nuevo documento considera reducciones muy inferiores (5-6%). Otra cuestión interesante que ya apuntaba el Plan Hidrológico del Júcar en el ciclo de planificación anterior (CHJ 2014; CHJ 2015) es que esta disminución de la aportación dista mucho de ser espacialmente homogénea para el periodo histórico. Concretamente, tras comparar la serie larga de aportaciones (1940/41-2008/09) con la corta (1980/81-2008/09), se concluyó que las reducciones más importantes se concentraban en las zonas de cabecera y del interior, produciéndose un ligero incremento en las zonas costeras, donde el recurso generado es menos aprovechable desde el punto de vista de la planificación hidrológica. A este respecto, no deja de ser significativo el hecho de que el sistema de explotación que aporta más del 50% de los recursos totales de la cuenca (sistema Júcar) presente un porcentaje de reducción de la aportación superior en un 40% al porcentaje de reducción medio para el total de la demarcación (Tabla 1). Por tanto, el sistema Júcar ya ha experimentado en los últimos años una reducción similar a la aplicada en el Plan Hidrológico para considerar el efecto del cambio climático.

Tabla 1 | Reducción de las aportaciones (hm³/año) en el periodo histórico en la DHJ (fuente: CHJ 2015)

	Serie larga	Serie corta	Reducción
Cenia-Maestrazgo	160.5	162.3	1.12%
Mijares-Plana de Castellón	340.2	344.0	1.12%
Palancia-Los Valles	55.5	59.3	6.85%
Turia	496.6	463.8	-6.60%
Júcar	1747.9	1548.1	-11.73%
Serpis	197.9	200.5	1.31%
Marina Alta	151.8	154.4	1.71%
Marina Baja	65.6	63.2	-3.66%
Vinalopó-Alacantí	61.8	60.4	-2.27%
TOTAL DHJ	3277.9	3056.00	-6.77%

Hernández Barrios (2007) simuló los impactos sobre los recursos hídricos naturales de los escenarios A2 y B2 de cambio climático procedentes del modelo HadCM3 para la cuenca del Júcar. La reducción estimada de la escorrentía para el conjunto de la cuenca del Júcar fue del 40%, pero con variaciones geográficas significativas, siendo las áreas interiores las más afectadas (reducciones del 50%) frente a las costeras (reducciones aproximadamente del 25%). Asimismo, Miró *et al.* (2015), tras estudiar los patrones locales de cambio en la temperatura para el periodo 1948-2011 en la Comunidad Valenciana, hallaron mayores incrementos

en las zonas altas de mayor relieve que en los fondos de valle y en la zona costera, concluyendo que las áreas más expuestas al cambio climático (zonas montañosas del interior) eran también aquéllas donde se generaba la mayor parte de los recursos hídricos.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, cabe preguntarse si es correcto aplicar un porcentaje de reducción único, o si se trata de una simplificación excesiva a efectos de abordar la evaluación del efecto del cambio climático en la planificación hidrológica. A este respecto, el presente artículo tiene por objeto analizar esta cuestión para el caso concreto del sistema de explotación del río Júcar, considerando 14 combinaciones de modelos climáticos globales (MCGs) y regionales (MCRs) para 2 de los nuevos escenarios (RCPs, trayectorias de concentración representativas) del último informe del IPCC (2014b) a corto y medio plazo. Se analizan las tendencias históricas de precipitación y temperatura mediante el uso de una herramienta de análisis exploratorio de datos capaz de abordar simultáneamente la estacionalidad y la variabilidad interanual. La generación de escenarios meteorológicos futuros requiere la selección previa de las proyecciones y su reescalado mediante corrección del sesgo, corrigiendo de esta forma las desviaciones entre las series observadas y simuladas para el periodo de control. En este caso se usa la técnica de mapeo de cuantiles (Li *et al.*, 2010), corrigiendo la función de distribución de las variables meteorológicas en el futuro con base en la diferencia entre la distribución observada y simulada para el periodo de control. A efectos de cuantificar la incertidumbre asociada al modelo hidrológico se emplean tres modelos conceptuales agregados diferentes, para la transformación de la precipitación en escorrentía: Témez (Témez, 1977), GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) y HBV-light (Seibert y Vis, 2012). Los resultados nos permiten extraer conclusiones sobre las incertidumbres y variabilidad espacial y temporal del impacto del cambio climático en la cuenca.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio seleccionado es el Sistema de Explotación del río Júcar que, con una superficie de 22261 km², es el sistema más extenso de la demarcación. El sistema presenta un alto grado de regulación, con una demanda de agua para riego que supone alrededor del 80% de la demanda total. La escasez de agua, la hidrología irregular y la sobreexplotación de los recursos subterráneos de la cuenca hacen que las sequías sean un fenómeno recurrente, con importantes consecuencias económicas, sociales y medioambientales. La mayoría de los recursos hídricos superficiales se regulan mediante tres embalses principales: Alarcón (1112 hm³ de volumen útil) y Contreras (872 hm³ de volumen útil), que se ubican en paralelo en las cabeceras de los ríos Júcar y Cabriel, y Tous aguas abajo (314 hm³ de volumen útil). Las mayores demandas consuntivas se concentran en la parte baja de la cuenca y se corresponden con regadíos y abastecimientos urbanos (incluyendo el abastecimiento a la ciudad de Valencia). Es necesario destacar que existe un equilibrio vulnerable entre el recurso disponible (1748 hm³/año; media anual para el periodo 1940 a 2009) y la demanda total (1640 hm³/año). A efectos del presente estudio, el Sistema de Explotación se ha dividido en 7 subcuencas, atendiendo a las características fisiográficas y a la disponibilidad de puntos con series de datos de caudales asimilables o restituidos a régimen natural (Figura 2).

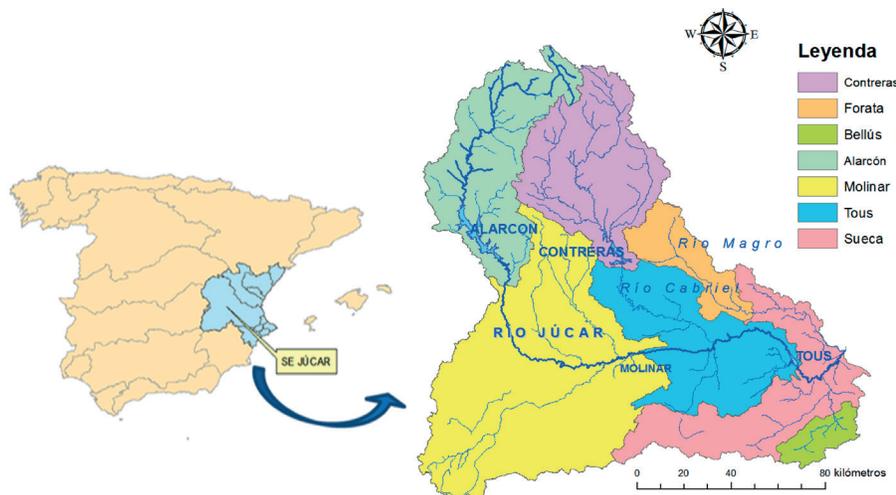


Figura 2 | Sistema de explotación del río Júcar y subcuencas consideradas.

Se pueden identificar tres áreas geográficas atendiendo a la climatología. La zona de cabecera presenta un clima continental, con una precipitación media anual de 630 mm/año y una temperatura media de 11.6°C. En esta zona se incluyen la cuenca de aportación al embalse de Alarcón (entrada media anual de 287.5 hm³/año para el periodo 1980-2011), denominada de aquí en adelante como subcuenca de Alarcón, y la cuenca del río Cabriel (afluente principal del río Júcar, por margen izquierda, con una aportación anual de 253.3 hm³/año para el periodo 1980-2011), que se denominará de aquí en adelante subcuenca de Contreras. En cuanto a la zona de recarga del acuífero de la Mancha Oriental ubicada dentro del Sistema de Explotación (7260 km², se corresponde casi en su totalidad con la subcuenca denominada Molinar), aunque presenta también clima continental, a efectos del presente estudio se ha incluido junto con la subcuenca de Tous (que se extiende desde el embalse de Molinar hasta la presa de Tous) dentro de la zona intermedia. El acuífero de la Mancha Oriental se encuentra hidráulicamente conectado al río Júcar y, debido a la intensa explotación que ha sufrido en las últimas décadas, ha cambiado la relación río-acuífero (Sanz, 2011), pasando de aportar agua al río Júcar (río ganador) a drenarlo (río perdedor), con importantes implicaciones en la gestión del mismo (Apperl *et al.*, 2015). La recarga del acuífero se estima en 169 hm³/año, las pérdidas del río en 76.8 hm³/año y el recurso renovable en 359.7 hm³/año (CHJ, 2014). La zona intermedia con clima transicional entre el clima continental y el Mediterráneo se extiende desde la presa de Embarcaderos hasta la de Tous, con una precipitación media anual de 482 mm/año y una temperatura media de 14.8°C. Finalmente, la zona baja de la cuenca se ubica aguas abajo de la presa de Tous (subcuencas de Sueca y Bellús) y presenta el clima típico de la costa mediterránea, con una precipitación media anual de 450 mm/año y una temperatura media de 17°C (CHJ, 2014). En esta zona se ha incluido, asimismo, la subcuenca de Forata.

MATERIAL Y MÉTODOS

Análisis de tendencias históricas

Para la caracterización de las variables climáticas en el periodo histórico (1971-2007) se ha recurrido a las series diarias de precipitación y temperatura del proyecto SPAIN 02 (Herrera *et al.*, 2010), con una resolución espacial de 0.11°.

Dentro de las metodologías de detección de tendencias, es posible distinguir dos grupos: los métodos estadísticos formales y las técnicas de Análisis Exploratorio de Datos (EDA, por sus siglas en inglés), que generalmente emplean herramientas gráficas para mejorar la comprensión de los datos y procesos. Ambas metodologías son complementarias: mientras que las EDA son útiles para seleccionar técnicas y herramientas estadísticas adecuadas, los test estadísticos pueden confirmar la importancia de las tendencias detectadas visualmente. Otro aspecto importante cuando se analizan tendencias en variables climáticas es la dificultad que introducen la estacionalidad y la variabilidad interanual. En el presente estudio, se ha optado por una herramienta EDA capaz de abordar simultáneamente ambos aspectos, MASH, *Moving Average over Shifting Horizon* (Anghileri *et al.*, 2014). En ella, el patrón estacional se representa mediante 365 valores de la variable media diaria (precipitación o temperatura) a lo largo del año, promediando los valores incluidos en una ventana temporal de varios días y comparándolos con el promedio de la misma ventana en años consecutivos (horizonte). Con el fin de identificar tendencias, este horizonte se mueve progresivamente a lo largo del registro histórico. Por tanto, es necesario especificar tanto el número de días que componen la ventana temporal como el número de años del horizonte seleccionado, considerando que una agregación excesiva puede suavizar demasiado las tendencias y que periodos de agregación muy pequeños no son capaces de filtrarlas. No existe una regla general para seleccionar estos dos parámetros. Por tanto, en este caso se han analizado diversas combinaciones de ambos parámetros, seleccionando finalmente una ventana temporal de 9 días y un horizonte de 20 años.

Selección de proyecciones de cambio climático y reescalado local

Las proyecciones futuras se han obtenido a partir de una combinación de Modelos Climáticos Globales (MCGs) y Modelos Climáticos Regionales (MCRs). Los MCGs representan procesos físicos en la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre, por lo que permiten simular el impacto de concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero en el sistema climático global. No obstante, presentan la desventaja de la escala o resolución, que normalmente se sitúa entre 250 y 600 km y

de 10 a 20 capas verticales en el caso de la atmósfera (IPCC, 2014b). Por esta razón, se usan MCRs para mejorar las proyecciones a escala regional a través de técnicas de reescalado (*downscaling*). En este caso, se ha recurrido a los resultados del proyecto CORDEX (disponibles en la plataforma Earth System Grid Federation), cuyo fin es mejorar este proceso de reescalado y producir conjuntos de proyecciones para diferentes regiones del mundo (Christensen *et al.*, 2014). Estas proyecciones están basadas en los nuevos escenarios del IPCC, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs por sus siglas en inglés). Su principal ventaja respecto a los escenarios anteriores (SRES; IPCC 2001) es que permiten considerar los efectos de acuerdos internacionales y otras políticas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (Van Vuuren *et al.*, 2011). Concretamente, en el presente estudio se han considerado dos escenarios, RCP 4.5 y RCP 8.5, a fin de incluir un escenario medio y otro extremo. Para ambos se han considerado dos periodos temporales: corto plazo (2011-2040) y medio plazo (2040-2070).

Para la selección de la combinación MCG-MCR más adecuada para el caso de estudio, se han comparado las series de precipitación y temperaturas medias mensuales observadas con las procedentes de los modelos para el periodo de control (1971-2000), calculando el error medio relativo de ambas variables (precipitación y temperatura) respecto a los estadísticos media y desviación típica mensuales para el periodo de control, como en Pulido-Velázquez *et al.* (2014).

Una vez seleccionados los modelos, es necesario corregir el sesgo de las variables climáticas para obtener estimaciones fiables de las condiciones locales. En mayor o menor medida, todos los modelos climáticos presentan un error sistemático (diferencia entre el valor simulado y el observado), que debe corregirse antes de que los resultados del modelo climático puedan emplearse en aplicaciones específicas. No obstante, la corrección del sesgo presenta dos inconvenientes: por un lado, no puede paliar la existencia de representaciones incorrectas de procesos dinámicos y/o físicos (asume que los resultados de los modelos son correctos, aunque se encuentren “desviados” de las observaciones históricas) y, por otro, considera que el sesgo es estacionario incluso a largo plazo. De las diferentes metodologías existentes, se ha seleccionado la corrección estadística cuantil a cuantil, o “quantile mapping” (Li *et al.* 2010). Este método presenta la ventaja de ajustar una función de distribución para el periodo futuro en base a la diferencia entre la función de distribución de los valores observados y simulados para el periodo de control (1971-2000). El proceso se ha realizado mediante la herramienta estadística “qmap” (Gudmunsson *et al.*, 2012), implementada en R, que permite diversas opciones de ajuste y selección de la transformación cuantil a cuantil entre la serie observada y la procedente del modelo. Tras corregir el sesgo, es posible obtener las variables temperatura y precipitación para los escenarios de cambio climático, que posteriormente se utilizarán para generar las series de aportaciones futuras.

Modelización hidrológica

A fin de considerar la incertidumbre introducida por la elección del modelo hidrológico, se ha procedido a comparar los resultados de tres modelos hidrológicos conceptuales agregados a escala mensual: el modelo de Témez (Témez, 1977), el modelo GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) y el modelo HBV (Bergström, 1976) en su versión HBV-light (Seibert y Vis, 2012).

El modelo hidrológico de Témez (Témez, 1977) es un modelo continuo, conceptual, determinístico y agregado de pocos parámetros, que es capaz de reproducir los procesos esenciales de transferencia de agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico, usando ecuaciones de balance y leyes específicas de reparto. Considera dos zonas de almacenamiento: el suelo (zona no saturada) y el acuífero (zona saturada). Por lo tanto, las variables de estado del modelo al final del mes i son la humedad del suelo (H_i) y el volumen de agua en el acuífero (V_i). En su formulación original, el modelo de Témez consta de cuatro parámetros: humedad máxima, parámetro de excedente, infiltración máxima y coeficiente de descarga del acuífero (se considera un único tanque). No obstante, para mejorar la representación de la relación río-acuífero, en el presente estudio se ha modelizado el acuífero con dos embalses o tanques lineales independientes con distinto coeficiente de descarga exponencial, por lo que cuenta con seis parámetros (un coeficiente de descarga adicional y un parámetro de reparto de la recarga del acuífero entre los dos tanques considerados).

El modelo GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) es un modelo conceptual agregado de sólo 2 parámetros. Consta de dos tanques o almacenamientos, el primero de ellos de producción (almacenamiento en el suelo, el parámetro X1 regula su capacidad máxima) y el segundo de propagación. Los intercambios con el exterior de la cuenca se establecen mediante el parámetro X2 (coeficiente de intercambio). Si X2 es mayor que 1, indica que existe una aportación desde el exterior, en caso contrario, indica una pérdida. Por tanto, el tanque de propagación experimenta un intercambio con el exterior proporcional a su contenido.

Por último, la nueva versión HBV-light (Seibert y Vis, 2012) del modelo semidistribuido HBV (Bergström, 1976) incorpora hasta cuatro rutinas que representan distintos procesos del ciclo hidrológico (acumulación y fusión nival, almacenamiento en el suelo, almacenamiento en acuífero y propagación). El número total de parámetros que emplea es superior al de los dos modelos anteriores (14), aunque en el caso de la cuenca del Júcar se reducen a 9 al prescindir del módulo nival.

Los modelos se han calibrado usando series mensuales de aportaciones para el periodo 1971-2000, previamente restituidas a régimen natural (CHJ, 2014). Se presenta la bondad de ajuste de los modelos según el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe ordinario (NSE) y logarítmico (LNSE, para dar más peso a los caudales bajos) y el coeficiente de correlación R para las distintas subcuencas (Tabla 2). Como se puede observar, en general el modelo de Témez muestra el mejor ajuste para la mayoría de las subcuencas, sobre todo en las de clima mediterráneo (Tous, Sueca, Forata y Bellús). Por tanto, el de Témez es el modelo elegido para el cálculo de las aportaciones futuras en todo el sistema. Sin embargo, a efectos de analizar la incertidumbre que introduce la elección del modelo hidrológico se ha procedido a comparar los resultados de los tres modelos en las subcuencas de Alarcón y Contreras. En ambas subcuencas se muestran también los resultados de los modelos para el periodo de validación (2000-2007).

Tabla 2 | Bondad de ajuste de los modelos hidrológicos.

		% Aportación natural	TÉMEZ			GR2M			HBV-light		
			NSE	LNSE	R	NSE	LNSE	R	NSE	LNSE	R
CALIBRACIÓN	Alarcón	24	0.73	0.73	0.85	0.70	0.76	0.88	0.70	0.73	0.84
	Contreras	22	0.73	0.77	0.86	0.74	0.63	0.86	0.71	0.73	0.85
	Molinar	20	0.49	0.41	0.70	0.45	0.39	0.68	0.42	0.51	0.65
	Tous	15	0.60	0.58	0.60	0.25	0.16	0.53	0.45	0.23	0.67
	Forata	1	0.75	0.69	0.85	0.45	0.51	0.88	0.50	0.18	0.71
	Sueca	15	0.61	0.57	0.80	0.48	0.33	0.66	0.62	0.57	0.79
	Bellús	3	0.75	0.69	0.89	0.53	0.53	0.72	0.66	0.72	0.82
VALIDACIÓN	Alarcón		0.72	0.98	0.87	0.77	0.73	0.92	0.77	0.81	0.89
	Contreras		0.63	0.75	0.91	0.64	0.69	0.88	0.55	0.50	0.86

RESULTADOS

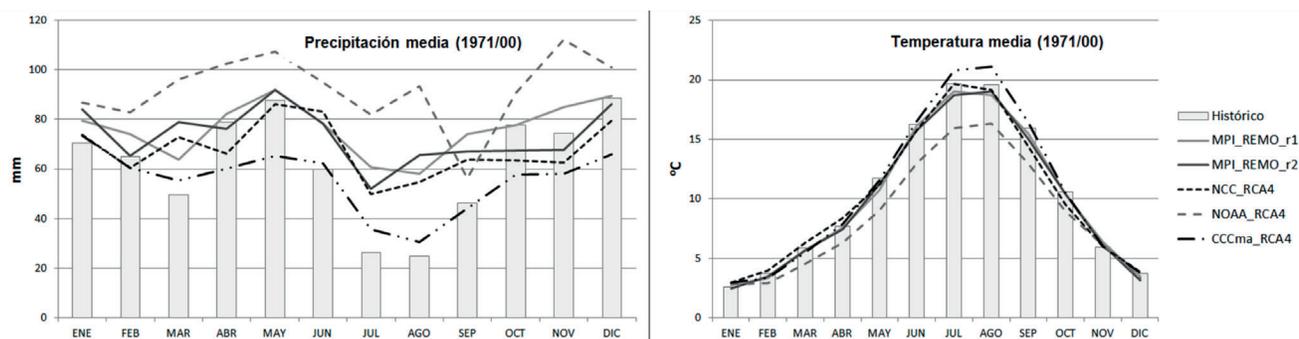
Selección de modelos

En la Tabla 3 se resumen las combinaciones de modelos globales y regionales consideradas en el presente estudio, con una resolución espacial de 0.44° (≈ 50 km) y paso mensual:

Tabla 3 | Combinaciones de modelos climáticos globales (MCG) y regionales (MCR) analizadas.

	MCR	SMHI-RCA4	KNMI-RACMO22E	CLMcom-CCLM4-8-17	MPI-CSC-REMO2009
MCG					
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5		X			
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0		X			
ICHEC-EC-EARTH		X	X		
IPSL-IPSL-CM5A-MR		X			
MIROC-MIROC5		X			
MOHC-HadGEM2-ES		X			
MPI-M-MPI-ESM-LR		X		X	X
NCC-NorESM1-M		X			
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M		X			
CCCma-CanESM2		X			

La Figura 3 muestra la precipitación y temperatura media mensual calculada por varios de los modelos respecto a las observaciones históricas de ambas variables para el periodo de control. Como se puede observar, los modelos son capaces de reproducir mejor las temperaturas que las precipitaciones.



*En el caso de MPI-M-MPI-ESM-LR/MPI-CSC-REMO2009 se han contemplado dos simulaciones (r1 y r2), correspondientes a dos conjuntos de resultados diferentes del modelo

Figura 3 | Comparativa entre las variables observadas y las generadas por los modelos climáticos para el periodo de control en Alarcón.

Tras comparar el error medio relativo de los modelos respecto a los estadísticos media y desviación típica, se ha decidido descartar los 3 modelos que presentaban un peor ajuste en el conjunto de la cuenca (IPSL-IPSL-CM5A-MR/RCA4, NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M/RCA4 e ICHEC-EC-EARTH/RACMO22). Asimismo, este error relativo se ha empleado para realizar un ensamblado de los modelos seleccionados, asignando mayor peso a los que reproducían mejor su comportamiento en el periodo de control mediante la optimización de la función objetivo error relativo medio en media y desviación típica de precipitación y temperatura.

Tendencias históricas

El análisis de tendencias históricas en las series de precipitación y temperatura mediante la metodología expuesta en el apartado “Análisis de tendencias históricas” ha permitido identificar diferentes patrones en las cuencas de cabecera, de clima más continental, y las ubicadas dentro de la zona de clima mediterráneo. La Figura 4 muestra los gráficos MASH para la variable precipitación en las cuencas de Alarcón y Bellús. En el caso de la primera, es posible identificar dos tendencias principales: una disminución importante de la precipitación durante los meses de invierno (especialmente en enero y febrero) y primavera (aunque de menor entidad que en invierno), así como un incremento puntual en octubre.

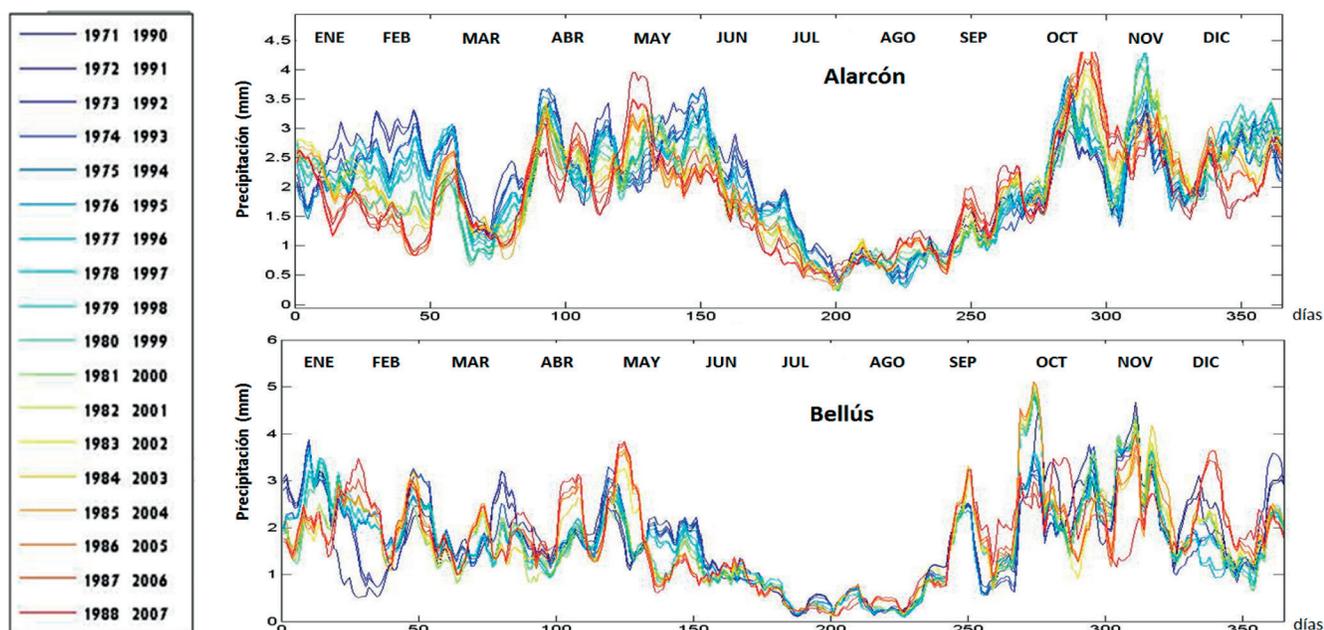


Figura 4 | Gráficos MASH de media móvil de precipitación.

Sin embargo, en las subcuencas ubicadas en la zona de clima mediterráneo (como es el caso de Bellús), la disminución de la precipitación durante los meses de invierno no es en general tan pronunciada. En primavera, aparece un aumento puntual en el mes de mayo, seguido de una disminución en el resto de la estación. Por último, no es posible señalar una tendencia clara durante los meses de otoño.

En cuanto al análisis de temperaturas, la Figura 5 muestra un incremento importante durante los meses de primavera y verano para la cuenca de Alarcón, que alcanza 2.3°C en marzo en el periodo 1988-2007 respecto al periodo 1971-1990.

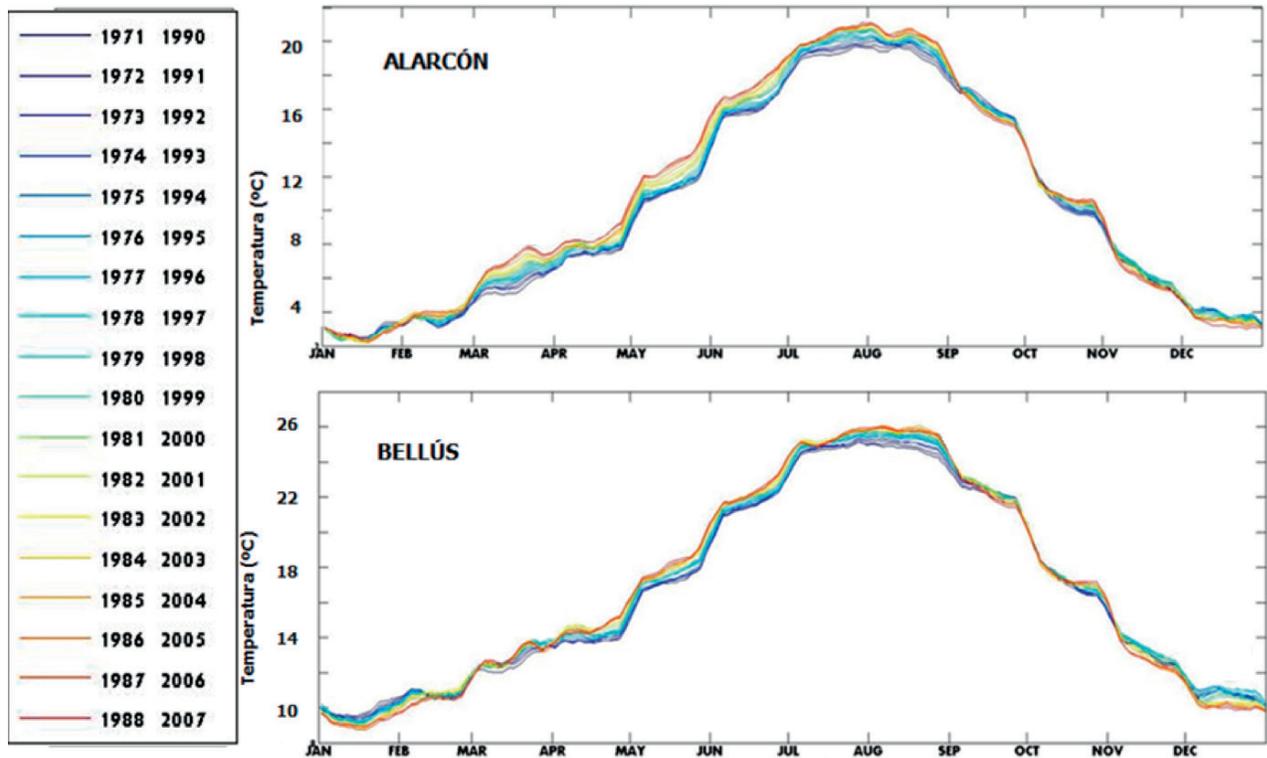


Figura 5 | Gráficos MASH de media móvil de temperatura.

No obstante, tras aplicar la misma metodología en la subcuenca de Bellús, se observa que el mayor incremento aparece en el mes de agosto y que alcanza 1.4°C (significativamente inferior al máximo incremento detectado en Alarcón). Asimismo, es posible identificar una disminución de la temperatura durante la estación invernal (hasta 1.2°C a mediados de diciembre).

Escenarios futuros de precipitación y temperatura

A efectos de presentar los cambios en las variables precipitación y temperatura, una vez corregido el sesgo y según el ensamblado de los modelos climáticos seleccionados, se ha dividido el sistema en tres zonas: cuenca alta (Alarcón y Contreras), intermedia (Molinar y Tous) y baja (Forata, Sueca y Bellús).

En cuanto a los cambios en la precipitación, la Figura 6 muestra la comparativa entre la precipitación histórica media mensual y el ensamblado para los escenarios seleccionados (RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto y medio plazo) en la cuenca alta. De acuerdo con las proyecciones, para el escenario más desfavorable (RCP 8.5 a medio plazo) en la cuenca alta se produciría una disminución de la precipitación alrededor del 35% en los meses de primavera (abril, mayo y junio) y superior al 24% en los meses de otoño (septiembre, octubre y noviembre). Por el contrario, en los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) la precipitación se

incrementaría alrededor del 8%. Respecto a la temperatura, para el mismo escenario (RCP 8.5 a medio plazo) el mayor incremento se produce en septiembre (superior a 3.75°C).

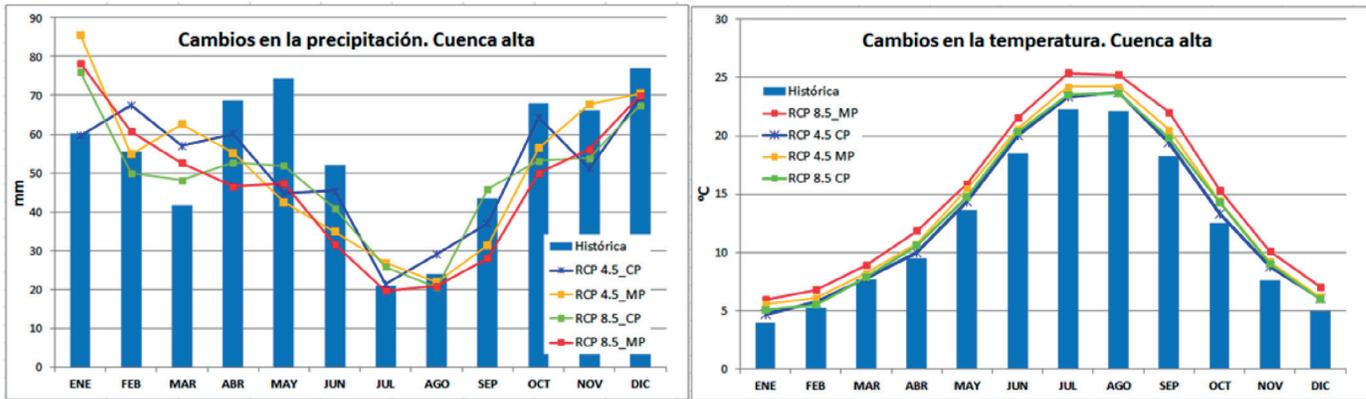


Figura 6 | Comparación entre la precipitación y la temperatura en el periodo de control (1971-2000) y en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto (CP) y medio plazo (MP) en la cuenca alta.

En la cuenca media (Figura 7), para el escenario RCP 8.5 a medio plazo, la precipitación experimentaría una mayor reducción en primavera (superior al 40%) y una menor disminución en otoño (alrededor del 16%). Por el contrario, en los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) la precipitación se incrementaría hasta el 13%. Respecto a la temperatura, para el mismo escenario, el mayor incremento se produce en junio (en torno a 3.5°C).

Por último, en la cuenca baja (Figura 8), para el escenario RCP 8.5 a medio plazo las reducciones de precipitación en primavera (27%) y otoño (7%) son bastante inferiores a las de las otras dos, mientras que en invierno superan el 25%. Para el mismo escenario, el mayor incremento de temperatura tiene lugar en agosto (en torno a 3.5°C). A excepción de los meses estivales, durante el resto del año los incrementos registrados en la parte baja son bastante inferiores (alrededor de 0.3°C menos) a los de las zonas alta y media. El mes que menor incremento registra en los tres casos es marzo (alrededor de 1.3°C).

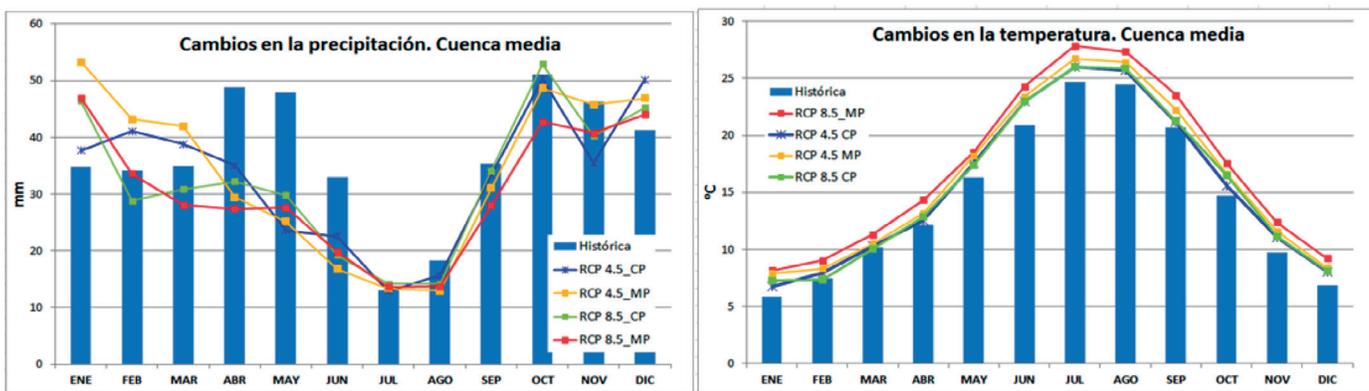


Figura 7 | Comparación entre la precipitación y la temperatura en el periodo de control (1971-2000) y en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto (CP) y medio plazo (MP) en la cuenca media.

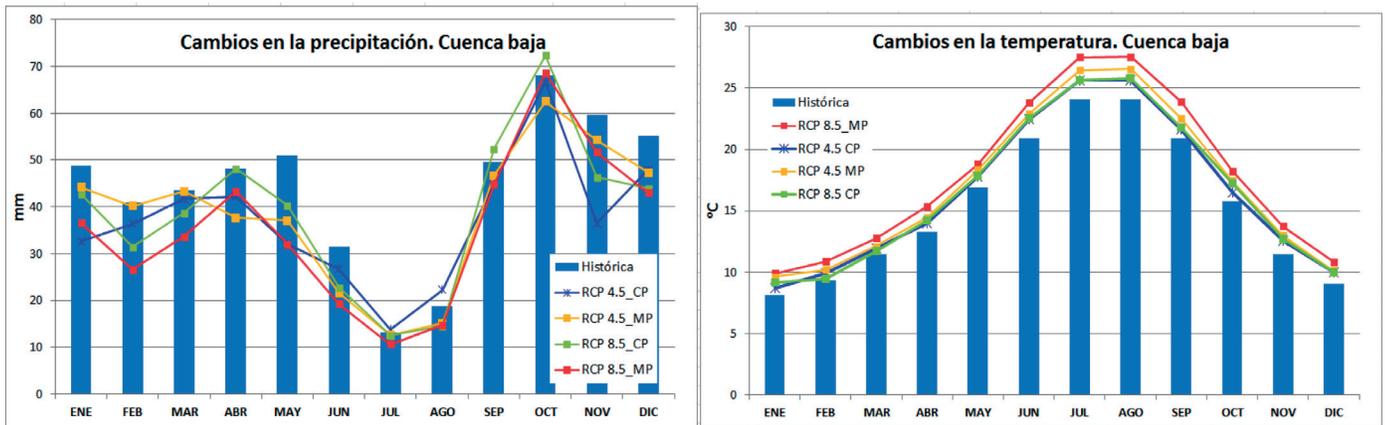


Figura 8 | Comparación entre la temperatura en el periodo de control (1971-2000) y en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto (CP) y medio plazo (MP) en la cuenca baja.

Aportaciones futuras

Una vez corregido el sesgo de las variables precipitación y temperatura resultantes de los modelos climáticos seleccionados, se han empleado como variables de entrada para simular las series de aportaciones futuras mediante el modelo de Témex (Témex, 1977), previamente calibrado para cada una de las subcuencas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, incluso a corto plazo (CP, 2011-40), la reducción prevista por la mediana de los modelos respecto a la serie de aportaciones 1940/41-2008/09 resultaría muy superior a la prevista en el nuevo ciclo de planificación (12%), situándose en torno al 20-21% para el total de la cuenca en ambos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5), si bien cabe destacar una mayor dispersión de los resultados en el escenario RCP 4.5 respecto al RCP 8.5 (Figura 9).

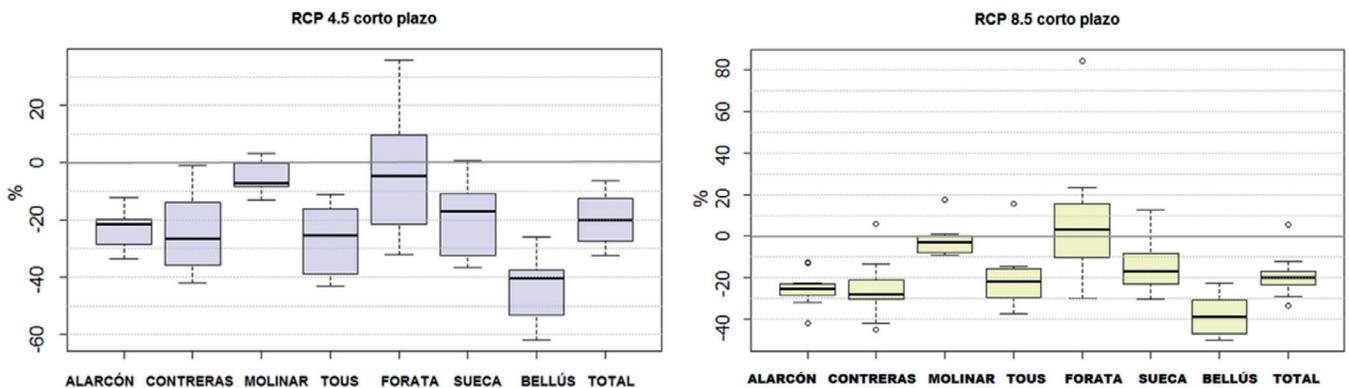


Figura 9 | Porcentaje de reducción de la aportación anual a corto plazo (2011-40) respecto a la media histórica (1940/41-2008/09). La línea horizontal gruesa muestra la mediana, los extremos de la parte coloreada el primer y el tercer cuartil, los extremos de los bigotes son los límites del rango de valores inferido a partir del primer y el tercer cuartil y los círculos representan valores fuera de este rango.

Respecto a la variabilidad observada entre las subcuencas consideradas, cabe destacar que, de acuerdo con la mediana de los modelos considerados, todas a excepción de Forata, experimentan reducciones a corto plazo aunque de entidad variable (entre 21-28% en Alarcón y Contreras, 3-7% en Molinar, 22-25% en Tous, 17% en Sueca y 39-40% en Bellús). Según los modelos más desfavorables, estas reducciones podrían superar el 40% en varias de las subcuencas estudiadas, incluidas las de los principales

embalses del sistema (Alarcón, Contreras y Tous), que representan en conjunto el 61% de la aportación en régimen natural. En el caso de Forata, la dispersión de resultados es muy elevada. No obstante, es preciso señalar que la aportación de esta subcuenca al cómputo total del recurso en la cuenca del Júcar es muy pequeña (inferior al 1%, Tabla 2), siendo muy elevada la variabilidad interanual de la serie histórica.

A medio plazo (MP; 2040-70) el porcentaje medio de reducción del recurso en el sistema se incrementaría respecto al corto plazo (Figura 10). Concretamente, para el total del sistema se situaría en torno al 29% para el escenario RCP 4.5 y en el 36% para el escenario RCP 8.5, de acuerdo con la mediana de los modelos empleados. En cuanto a la variabilidad entre las diversas subcuencas, de nuevo la mayoría de modelos predicen reducciones variables en todas ellas (a excepción de Forata y Sueca). En Alarcón, el porcentaje de reducción correspondiente a la mediana ascendería a un 39-40% dependiendo del escenario, en Contreras al 44-48%, Molinar (28-34%), Tous (22-28%) y Bellús (26-35%). No obstante, según los modelos más desfavorables, estas reducciones podrían superar el 50% en las cuencas de aportación a los principales embalses (Alarcón, Contreras y Tous). En Sueca, la mediana de los modelos para el escenario RCP 4.5 predice un ligero incremento (4%, respecto a la serie de aportaciones 1940/41-2008/09), mientras que en el caso de Forata caben las mismas consideraciones realizadas para el corto plazo.

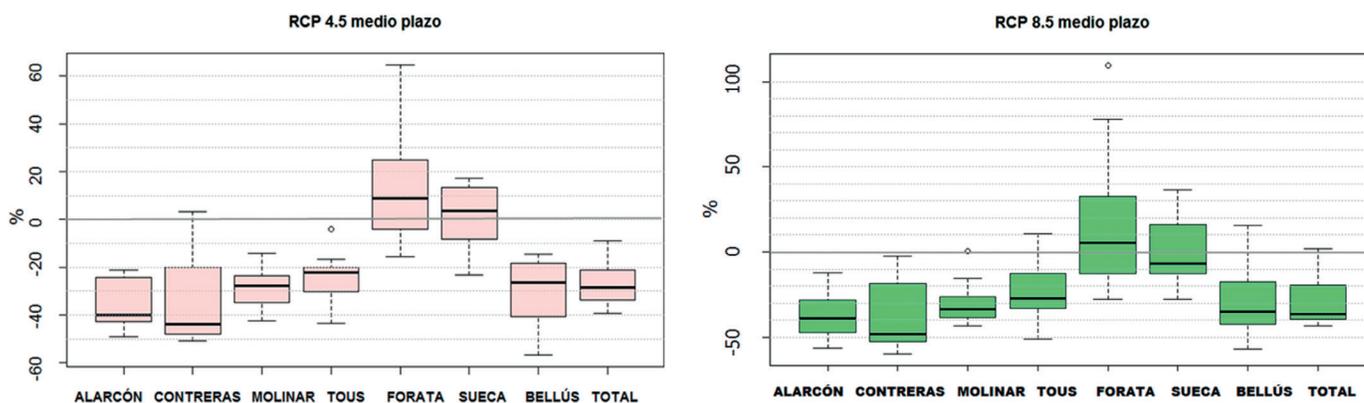


Figura 10 | Porcentaje de reducción de la aportación anual a medio plazo (2041-70) respecto a la media histórica (1940/41-2008/09). La línea horizontal gruesa muestra la mediana, los extremos de la parte coloreada el primer y el tercer cuartil, los extremos de los bigotes son los límites del rango de valores inferido a partir del primer y el tercer cuartil y los círculos representan valores fuera de este rango.

Respecto a la disminución mensual de la aportación, las bandas de la Figura 11 representan los valores máximo y mínimo y los tres cuartiles de los porcentajes de reducción del conjunto de los modelos para el escenario más desfavorable (RCP 8.5 a medio plazo) en las cuencas de Alarcón y Contreras, conjuntamente con las reducciones previstas por el ensamblado de los modelos (denominado “ENSEMBLE” en el gráfico). Según la mediana de los modelos seleccionados, en ambos casos las mayores reducciones se producirían en los meses de invierno (enero y febrero, entre un 46-50% en Alarcón y un 50-56% en Contreras) y las menores en los meses de otoño en el caso de Alarcón (octubre y noviembre, entre un 16-21%) y en los meses de verano y otoño en Contreras (28-31%). Esta tendencia guarda similitud con la observada en precipitaciones para el periodo histórico (1970-2000), descrita en el apartado “Tendencias históricas”. Sin embargo, el ensamblado de modelos muestra una tendencia diferente, produciéndose las menores reducciones en los meses de invierno en el caso de Alarcón (20-30%) y las mayores en agosto y septiembre (53-54%), mientras que en Contreras, aunque en los meses de invierno y primavera coincide con la mediana, en el resto del año predice reducciones superiores al 50%, fuera de la banda correspondiente al primer cuartil.

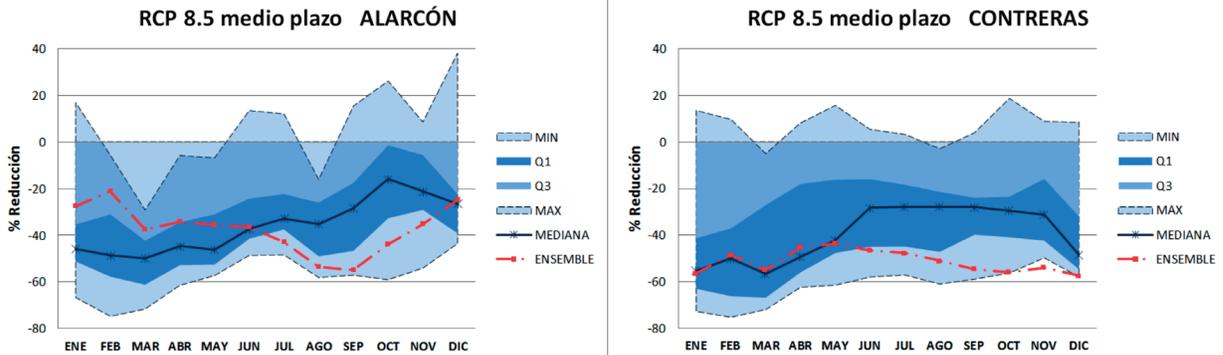


Figura 11 | Porcentaje de reducción de las aportaciones mensuales a medio plazo (2041-70).

Incertidumbre asociada a la modelización hidrológica

En relación a la incertidumbre que introduce el modelo hidrológico, la Figura 12 muestra una comparativa entre la reducción de las aportaciones en la subcuenca de Alarcón según los tres modelos hidrológicos considerados. Como se puede observar, el modelo GR2M siempre predice reducciones hasta un 10% superiores a los otros dos (Témez y HBV-light), que presentan diferencias menores entre ellos. Concretamente, para el escenario 4.5 a corto plazo (RCP 4.5 CP), la mediana de las aportaciones simuladas con el modelo GR2M supondría una reducción del 26% respecto a la serie 1940/41-2008/09, mientras que el modelo de Témez predice una reducción del 21% y el modelo HBV-light del 20%. Los resultados son similares en la subcuenca de Contreras (Figura 13), donde el modelo GR2M vuelve a predecir las mayores reducciones (hasta un 10% superiores a los otros dos modelos). Sin embargo, aunque el modelo de Témez y el modelo HBV-light predicen reducciones medias similares en todos los escenarios, el modelo de Témez muestra mayor variabilidad en la respuesta de la cuenca de Contreras frente a las series de entrada de los distintos modelos de cambio climático considerado que el modelo HBV-light.

El promedio de la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la aportación media anual simulada con los tres modelos hidrológicos para cada modelo climático, representa un porcentaje entre el 25-41% del rango de variación debido a los modelos climáticos para ese mismo escenario. El escenario que mayor variación presenta debido al modelo hidrológico es el RCP 4.5 a corto plazo (41% en Alarcón y 35% en Contreras del rango de variación debido a los modelos climáticos). Por tanto, la incertidumbre que introduce la selección del modelo hidrológico no es en ningún caso despreciable.

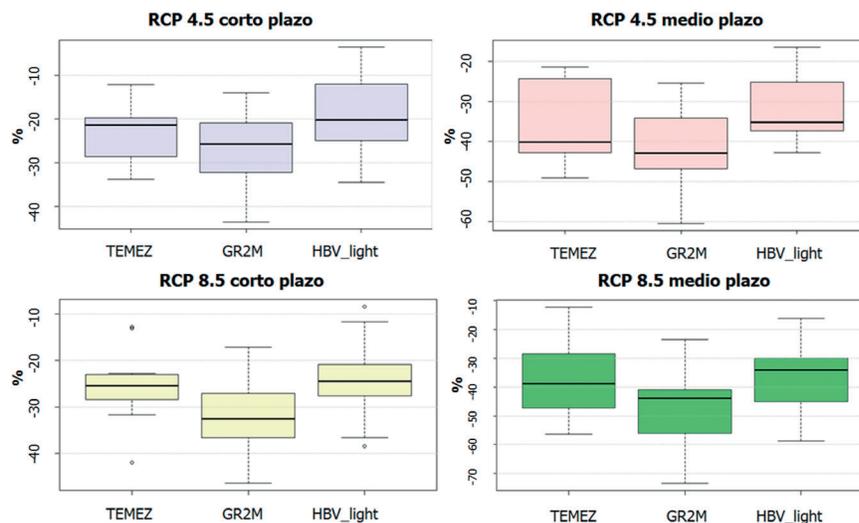


Figura 12 | Comparativa de la reducción en las aportaciones en Alarcón según los tres modelos hidrológicos. La línea horizontal gruesa muestra la mediana, los extremos de la parte coloreada el primer y el tercer cuartil, los extremos de los bigotes son los límites del rango de valores inferido a partir del primer y el tercer cuartil y los círculos representan valores fuera de este rango.

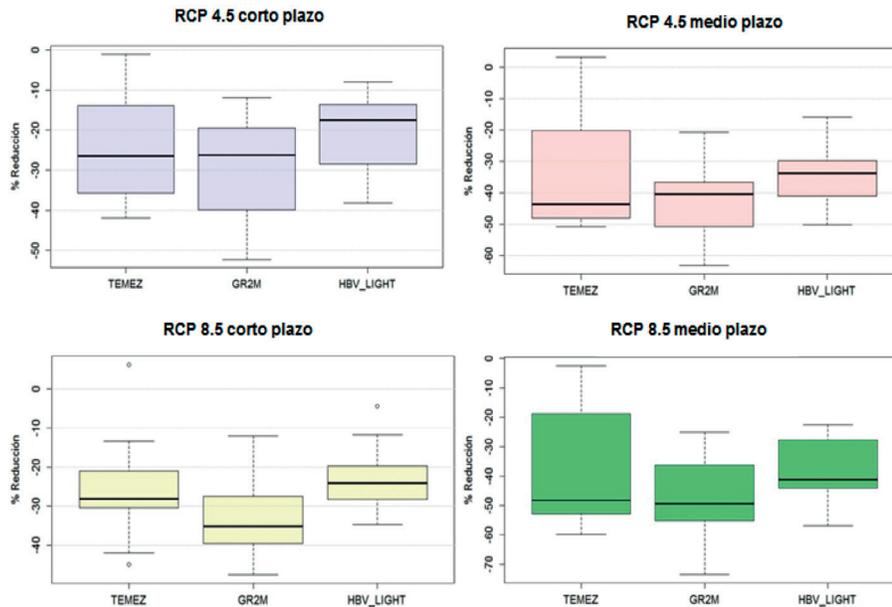


Figura 13 | Comparativa de la reducción en las aportaciones en Contreras según los tres modelos hidrológicos. La línea horizontal gruesa muestra la mediana, los extremos de la parte coloreada el primer y el tercer cuartil, los extremos de los bigotes son los límites del rango de valores inferido a partir del primer y el tercer cuartil y los círculos representan valores fuera de este rango.

DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos, es posible señalar los siguientes aspectos respecto a los escenarios hidrológicos futuros en la cuenca del Júcar: 1) Mayor incremento de temperatura y disminución de la precipitación en las cuencas de cabecera del sistema que en las de la parte baja, tanto en el periodo histórico como en los escenarios de cambio climático; 2) Alta incertidumbre respecto al posible porcentaje de reducción de los recursos, derivada de los modelos climáticos y, en menor medida, de los modelos hidrológicos; 3) Reducciones previstas por la mediana de los modelos muy superiores a la considerada en el Plan Hidrológico incluso a corto plazo; 4) Influencia considerable del modelo hidrológico; 5) Las aportaciones generadas a partir de los modelos climáticos sugieren una variabilidad muy superior a la del periodo histórico.

Respecto al primer aspecto, si consideramos que las cuencas de cabecera son las que aportan un mayor porcentaje de recursos para la cuenca, y que en ellas se encuentran los mayores embalses, su impacto es significativo en los volúmenes regulados en la cuenca. Esta tendencia parece mantenerse en los escenarios futuros, al igual que sucedía en los antiguos escenarios SRES derivados del MCG ECHAM4, considerado el más robusto para la zona de estudio por Chirivella Osma *et al.* (2015). Por tanto, la variabilidad espacial de los impactos hidrológicos del cambio climático podría ser un factor importante a efectos de valorar la adaptación del sistema a escenarios futuros de cambio climático.

En cuanto al segundo y tercer aspecto, evidencian la necesidad de un cambio de perspectiva: la planificación hidrológica no debería centrarse tanto en determinar qué porcentaje de reducción va a darse en un futuro, dada la imposibilidad de reducir las múltiples fuentes de incertidumbre en su evaluación, como en analizar la robustez y resiliencia del sistema frente a un rango plausible de situaciones de estrés, a efectos de identificar dónde es más vulnerable y proponer medidas de adaptación. Este programa de adaptación se puede diseñar para que sea posible aplicar medidas según evolucione el sistema, como sugiere la metodología de vías de adaptación dinámicas; (Haasnoot *et al.*, 2013; Kwakkel *et al.*, 2015), que especifica dos tipos de acciones: las que se deben adoptar de forma inmediata para prepararse a corto plazo y aquellas que se deben considerar ahora para posibilitar otras opciones de adaptación en un horizonte temporal mayor.

Respecto al cuarto aspecto, es importante señalar que, aunque la incertidumbre asociada al modelo hidrológico es inferior a la que introducen los modelos climáticos, no es en ningún caso despreciable dadas las diferencias existentes entre las aportaciones generadas con los tres modelos utilizados (Témez, GR2M y HBV-light). Una limitación del presente estudio es que en cuencas semiáridas, los parámetros de los modelos son muy sensibles al periodo de calibración elegido (Hughes, 2015; Osuch *et al.*, 2015) y, por tanto, un modelo calibrado en condiciones climáticas actuales puede no ser válido para la evaluación de los impactos del cambio climático. Por tanto, se debería analizar la dependencia de los modelos utilizados respecto a las condiciones climáticas del periodo de calibración, a fin de obtener modelos más robustos y flexibles en escenarios de cambio (Thirel *et al.*, 2015). Asimismo, algunos autores han concluido que el uso de modelos conceptuales no es adecuado en condiciones de cambio climático (Coron *et al.*, 2012; Seiller *et al.*, 2012; Lespinas *et al.*, 2014). Sin embargo, Fowler *et al.* (2016) han señalado recientemente que estas deficiencias aparentes en los modelos conceptuales no son tan comunes, y aparecen más a causa de técnicas pobres e insuficientes de calibración y evaluación que a la propia estructura del modelo. En cualquier caso, para seleccionar un modelo hidrológico es necesario buscar un equilibrio entre complejidad e incertidumbre (Blöschl y Montanari, 2010).

Por último, es preciso señalar que las funciones de densidad de probabilidad de las aportaciones anuales generadas a partir de los escenarios de cambio climático, aunque en general presentan tres características (menor probabilidad en la cola derecha, desplazamiento de la punta hacia la izquierda y mayor apuntamiento respecto al histórico) que también aparecen al aplicar un coeficiente de reducción a la serie histórica de aportaciones, muestran una variabilidad mucho mayor. Por tanto, aunque perturbar las series históricas de aportaciones multiplicándolas por un factor reductor presenta la ventaja de preservar los patrones de variabilidad espacial y temporal observados, a su vez constituye su principal limitación, puesto que modifica la media mensual ignorando cambios potenciales en la distribución de probabilidad de las aportaciones.

CONCLUSIONES

En primer lugar, es preciso señalar que la variabilidad espacial del impacto del cambio climático dentro del sistema parece adquirir singular relevancia, al observarse los mayores incrementos de temperatura en las cuencas de cabecera, tanto en la serie histórica como en los escenarios de cambio climático, así como importantes disminuciones de la precipitación en los meses de primavera y otoño. En los escenarios a medio plazo, el efecto combinado de ambas circunstancias produce reducciones de la aportación en Alarcón y Contreras superiores al 40%, según la mediana de los modelos climáticos seleccionados, mayores que en otras zonas del sistema Júcar. Por tanto, si consideramos que estas cuencas son las que aportan un mayor porcentaje de recursos, y que en ellas se encuentran los mayores embalses, su impacto podría ser significativo en los volúmenes regulados del sistema de explotación.

En cualquier caso, a la luz del amplio rango de variación en la aportación total del sistema de explotación (entre -33.6% y 5.5% para los escenarios a corto plazo y entre -43.5% y 2.0% a medio plazo para el conjunto del sistema, si bien hay que señalar que los valores positivos sólo los predice una única combinación de modelos, CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0/SMHI-RCA4), la principal conclusión es la necesidad de dar un paso más en lo que respecta al binomio planificación hidrológica-cambio climático. Mientras que tradicionalmente los mayores esfuerzos se han dirigido a reducir la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas, hoy en día se plantea un nuevo paradigma que asume la incertidumbre como inevitable y se orienta a conseguir sistemas más robustos y flexibles. Este enfoque no pretende restar utilidad a los resultados de los modelos, sino intentar sacar el máximo partido a toda la información disponible para plantear las medidas de adaptación más adecuadas.

La implantación de un programa de adaptación debería ser progresivo y dinámico en el tiempo: aunque las proyecciones climáticas actuales llegan hasta finales del presente siglo, los horizontes temporales de los ciclos de planificación son mucho más modestos. Por tanto, no todas las medidas de adaptación *plausibles* para un sistema dado serán *posibles* de implantar a corto plazo, pero su consideración puede significar dejar abiertas más opciones a medio o largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto IMPADAPT (CGL2013-48424-C2-1-R) con fondos FEDER europeos y del Ministerio de Economía y Competitividad. Los autores agradecen a AEMET y a la Universidad de Cantabria los datos proporcionados (Spain02 v4 EURO-CORDEX dataset, <http://www.meteo.unican.es/datasets/spain02>).

REFERENCIAS

- Anghileri, D., Pianosi, F., Soncini-Sessa, R. 2014. Trend detection in seasonal data: from hydrology to water resources. *Journal of Hydrology*, 511, 171-179. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.01.022
- Apperl, B., Pulido-Velázquez, M., Andreu, J., Karjalainen, T. P. 2015. Contribution of the multi-attribute value theory to conflict resolution in groundwater management – application to the Mancha Oriental groundwater system, Spain. *Hydrological Earth System Sciences*, 19, 1325-1337. doi:10.5194/hess-19-1325-2015
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P. 2008. *Climate Change and water*. Eds. IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Bergström, S. 1976. *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. SMHI, Report No. RHO 7, Norrköping, 134 pp.
- Blöschl, G., Montanari, A. 2010. Climate change impacts - throwing the dice? *Hydrological Processes*. 24(3), 374-381. doi:10.1002/hyp.7574
- CEDEX-DGA. 2011. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Encomienda de gestión de la Dirección General del Agua (MARM) para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua.
- Chirivella Osma, V., Capilla Romá, J.E., Pérez Martín, M.A. 2015. Modelling regional impacts of climate change on water resources: the Júcar basin (Spain). *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 30-49, doi:10.1080/02626667.2013.866711
- CHJ. 2014. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2009-2015.
- CHJ. 2015. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2015-2021.
- Christensen, O.B., Gutowski, W.J., Nikulin, G., Legutke, S. 2014. CORDEX Archive design. Available at <http://cordex.dmi.dk>. Último acceso: diciembre 2015.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., Hendrickx, F. 2012. Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48(5), W05552, doi:10.1029/2011WR011721
- Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3, 52-58. doi:10.1038/nclimate1633
- Deidda, R., Marrocu, M., Caroletti, G., Pusceddu, G., Langousis, A., Lucarini, V., Puliga, M., Speranza, A. 2013. Regional climate models' performance in representing precipitation and temperature over selected Mediterranean areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 5041-5059, 2013. doi:10.5194/hess-17-5041-2013
- Diffenbaugh, N.S, Giorgi, F. 2012. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, 114(3-4): 813-822. doi:10.1007/s10584-012-0570-x
- Estrela, T., Pérez-Martín, M.A., Vargas, E. 2012. Impacts of climate change on water resources in Spain, *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154-1167. doi:10.1080/02626667.2012.702213

- Fowler, K.J.A., Peel, M.C., Western, A.W., Zhang, L., Peterson, T.J. 2016. Simulating runoff under changing climatic conditions: Revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, 52(3), 1820-1846. doi:10.1002/2015WR018068.
- Girard, C., Pulido-Velázquez, M., Rinaudo, J-D., Pagé, C., Caballero, Y. 2015. Integrating top-down and bottom-up approaches to design global change adaptation at the river basin scale. *Global Environmental Change*, 34, 132-146. doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.07.002
- Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., Engen-Skaugen, T. 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3383-3390. doi:10.5194/hess-16-3383-2012
- Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., ter Maat, J. 2013. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change* 23(2), 485-498. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006
- Hagemann, S., Chen, C., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, S.N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F., Wiltshire, A.J. 2013. Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth System Dynamics*, 4, 129-144. doi:10.5194/esd-4-129-2013
- Hernández Barrios, L. 2007. *Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons, M.R., Frías, M.D., Fernández, J. 2010. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain 02). *International Journal of Climatology*, 32(1), 74-85. doi:10.1002/joc.2256
- Howard, K.W.F. 2011. Implications of climate change on water security in the Mediterranean region. En *Climate change and its effects on water resources*. Baba, A., Tayfur, G., Gündüz O., Howard, K.W.F., Friedel, M.J., Chambel, A. 2011. Ed. Springer. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Volume 3. doi:10.1007/978-94-007-1143-3_2
- Hughes, D.A. 2015. Simulating temporal variability in catchment response using a monthly rainfall-runoff model. *Hydrological Sciences Journal*, 60(7-8), 1286-1298. doi:10.1080/02626667.2014.909598
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: the Scientific Basis. *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (eds.). Cambridge University Press, 83 pp.
- IPCC. 2014a. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1132 pp.
- IPCC. 2014b. Climate Change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kwakkel, J.H., Haasnoot, M., Walker, W.E. 2015. Developing dynamic adaptive policy pathways: a computer-assisted approach for developing adaptive strategies for a deeply uncertain world. *Climatic Change*, 132(3), 373-386. doi:10.1007/s10584-014-1210-4
- Lepinas, F., Ludwig, W., Heussner, S. 2014. Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology*, 511, 403-422. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.01.033

- Li, H., Sheffield, J., Wood, E. F. 2010. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 115(D10). doi:10.1029/2009JD012882
- Mendoza, P.A., Clark, M.P., Mizukami, N., Newman, A.J., Barlage, M., Gutmann, E.D., Rasmussen, R.M., Rajagopalan, B., Brekke, L.D., Arnold, J.R. 2015. Effects of hydrologic model choice and calibration on the portrayal of climate change impacts. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 762-780. doi:10.1175/JHM-D-14-0104.1
- MIMAM. 2000. *Libro Blanco del Agua en España* (LBAE). MIMAM, Madrid. 637 pp.
- MAGRAMA. 2016. Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, por el que se aprueba la revisión de los Planes Hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro. *BOE núm. 16, 19 de enero de 2016*, Sec. I., 2972-4301
- MARM. 2008. Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica. *BOE núm. 229, 22 de septiembre de 2008*, 38472-38582
- Miró Pérez, J.J., Estrela Navarro, M.J., Olcina Cantos, J. 2015. Statistical downscaling and attribution of air temperature change patterns in the Valencia region (1948-2011). *Atmospheric Research*, 156, 189-212. doi:10.1016/j.atmosres.2015.01.003
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V. 2006. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 200-214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014
- Olcina Cantos, J. 2014. *Evaluación del primer ciclo de planificación. Riesgos climáticos y cambio climático*. Observatorio de las Políticas del Agua (OPPA), Fundación Nueva Cultura del Agua. Octubre de 2014, 17 pp.
- Osuch, M., Romanowicz, R., Booij, M.J. 2015. The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics, *Hydrological Sciences Journal*, 60(7-8), 1299-1316, doi:10.1080/02626667.2014.967694
- Pulido-Velázquez, D., García-Aróstegui, J.L., Molina, J.L., Pulido-Velázquez, M., 2014. Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate? *Hydrological Processes*, 29(6), 828-844. doi:10.1002/hyp.10191
- Sanz, D., Castaño, S., Cassiraga, E., Sahuquillo, A., Gómez-Alday, J.J., Peña, S., Calera, A. 2011. Modeling aquifer–river interactions under the influence of groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeology Journal*, 19(2), 475-487. doi:10.1007/s10040-010-0694-x
- Seibert, J., Vis, M.J.P. 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315-3325. doi:10.5194/hess-16-3315-2012
- Seiller, G., Anctil, F., Perrin, C. 2012. Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 1171-1189. doi:10.5194/hess-16-1171-2012
- Témez Peláez, J.R. 1977. Modelo matemático de transformación precipitación-aportación. ASINEL, 1977.
- Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C. 2015. On the need to test hydrological models under changing conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 60(7-8), 1165-1173. doi:10.1080/02626667.2015.1050027
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- Wilby, R. L., Dessai, S. 2010. Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65(7), 180-185. doi:10.1002/wea.543