

CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SURESTE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA. EVALUACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO INVEST EN ESCENARIOS FUTUROS

Pedro Pérez Cutillas¹
Universidad de Friburgo

RESUMEN

El sureste de la Península Ibérica se caracteriza por una secular escasez de agua, cada vez más agravada por los efectos del cambio climático. Para valorar sus consecuencias, se elaboró un análisis combinado de 30 cuencas mediante el modelo hidrológico del programa de evaluación de servicios ecosistémicos InVEST. La metodología empleada se basó en escenarios de concentración de gases de efecto invernadero, representados en niveles de fuerza de radiación de condición intermedia(RCP4.5) y extrema(RCP8.5); y proyectados para dos periodos, a corto plazo (2020-2050) y medio plazo (2070-2100). Los resultados mostraron unas tendencias de cambio en los escenarios analizados, con descensos promedio respecto a los registros actuales del 15% en precipitación, y aumentos promedio del 5% en la evapotranspiración de referencia. La reducción en la disponibilidad hídrica de las cuencas, proporcionaron tasas de variación negativas entre el 30 y 50% para los escenarios más posibilistas (RCP45 2050 y RCP45 2100). Los efectos en la disminución de los recursos hídricos debidos al cambio climático son evidentes, siendo necesarias soluciones urgentes relacionadas con la gestión del agua y sus demandas futuras.

Palabras clave: Sequía, RCP, modelo climático regional

CONSEQUENCES OF CLIMATE CHANGE IN THE AVAILABILITY OF WATER IN THE SOUTHEAST OF THE IBERIAN PENINSULA. EVALUATION OF THE INVEST HYDROLOGICAL MODEL IN FUTURE SCENARIOS

ABSTRACT

Water scarcity characterizes the environments of the southeast of the Iberian Peninsula, and it is expected to increase due to the effects of climate change. An analysis of 30 basins was performed to assess their consequences through the hydrological model of the ecosystem services assessment InVEST. Scenarios of concentration of greenhouse gases were used, that represent intermediate and extreme conditions in the level of radiative forcing values (RCP4.5 and RCP8.5), projected for two periods, short term (2020-2050) and medium term (2070- 2100). In the analyzed scenarios, the results indicated some trends of change, showing average decreases of 15% in precipitation, and average increases of 5% in potential evapotranspiration, regarding current values. Water yield showed a decrease, with negative variation rates between 30 and 50% for the most realistic scenarios (RCP45 2050 and RCP45 2100). The effects on the decrease of water resources due to climate change are visible, therefore solutions related to water management and future services will be demanded.

Key words: Drought, RCP, regional climate model

¹ Grupo de Geografía Física del Departamento de Geociencias. Universidad de Friburgo, Unidad de Geografía, Chemin du Musée 4, 1700. Fribourg (Suiza). E-mail: pedro.perezcutillas@unifr.ch

1. INTRODUCCIÓN

Como resultado del aumento generalizado de las temperaturas y el descenso de las precipitaciones, las predicciones basadas en estudios de cambio climático presentan incrementos en la escasez de agua para toda el área del Mediterráneo, así como la aparición de sequías más frecuentes (IPPC, 2014). La tendencia de estas variables inducirá a una reducción en el contenido de agua del suelo, limitando el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, los aportes de biomasa al suelo. Se espera que esta reducción en la materia orgánica empobrecerá aún más la estabilidad de los agregados y la propia permeabilidad del suelo (Boix-Fayos *et al.*, 2017), favoreciendo importantes procesos de desertificación. Además, se estima que la reducción de las precipitaciones esté asociada a una mayor frecuencia de los eventos de lluvia intensa, provocando inundaciones y mayores efectos en la pérdida de suelo (Chiew *et al.*, 2011).

El sureste de la Península Ibérica se enfrenta a los cambios de precipitación más significativos en el conjunto de la España mediterránea (Sumner *et al.*, 2003; López-Bustins *et al.*, 2013), con disminuciones estimadas entorno al 10% anual para 2080 respecto a la precipitación actual, siendo más perceptibles durante los meses de primavera y verano (Moreno *et al.*, 2005; Tejedor *et al.*, 2017). Además, estos resultados indican un alto grado de incertidumbre para la magnitud del cambio en la precipitación anual de la zona, lo que sugiere que la eventualidad de los valores de precipitación sea aún más baja o, al menos, más variable. Respecto a los cambios en las temperaturas, se han estimado incrementos superiores a los promedios globales, con subidas que oscilan entre 4-11^o C en todos los escenarios del IPCC para el año 2100 (IPPC, 2014).

De forma paralela, los aumentos en la demanda de agua están ejerciendo presiones adicionales sobre la sostenibilidad ambiental local (Iglesias *et al.*, 2007). En este sentido, el sector agrícola en esta zona de España es particularmente vulnerable, y sufrirá un aumento de la variabilidad interanual en la precipitación, así como la ocurrencia de eventos extremos (Iglesias *et al.*, 2000, Choi *et al.*, 2015; Merckenschlager *et al.*, 2017). Estas alteraciones climáticas pueden provocar cambios estructurales profundos sobre la población rural como resultado de la despoblación y el abandono de las tierras menos productivas. La escasa fertilidad del suelo y la cada vez menor disponibilidad de agua necesaria para el desarrollo de la agricultura y el mantenimiento de los ecosistemas seminaturales hace inviable su uso a menos que se tomen medidas de adaptación efectivas.

Ante la evidencia del impacto actual producido por la variación del clima y las pésimas expectativas de los escenarios futuros, la confianza de la sociedad ante la capacidad inherente de los ecosistemas para autoadaptarse a las cambiantes condiciones climáticas es una noción ampliamente aceptada en el debate científico. La búsqueda de medidas de mitigación del cambio climático debe continuar imperativamente; sin embargo, la exploración de estrategias de adaptación es una posibilidad factible bajo las acciones de compromiso internacionales actuales (Milly *et al.*, 2008). Hasta hace poco, la idea de una adaptación inducida a través de manejos sostenibles de los usos del suelo, no solo ha sido ignorada por los políticos, y una parte de la comunidad científica centrada en soluciones de mitigación, sino también se ha enmarcado predominantemente dentro de una mentalidad de "fidelidad histórica" (Stein *et al.*, 2013).

Frente a este panorama, la gestión del agua se presenta fundamental en el contexto socioeconómico del sureste peninsular. La cuenca del río Segura, como conjunto hidrológico más importante de la zona, ha sido catalogada como la tercera cuenca con mayor estrés hídrico de Europa (Romero Díaz y Belmonte Serrato, 2002; Alcón *et al.*, 2013), donde la escasez de agua prevalece y los recursos hídricos continúan presentando signos de agotamiento (Zimmer, 2010). El uso del agua está regulado a través de un sistema de permisos, gestionado por la Confederación Hidrológica del Segura (CHS) (Schwilch *et al.*, 2012), en el que las entradas de agua altamente variables e insuficientes obstaculizan la viabilidad de actividades agrícolas, turísticas e industriales.

Con el fin de proporcionar evoluciones futuras, la investigación climática utiliza escenarios de emisiones de CO₂ respecto a variables como la energía y el uso del suelo, el cambio socioeconómico y tecnológico, y las emisiones de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero (van Vuuren *et al.*, 2011). Las denominadas Trayectorias de Concentración

Representativas *Representative Concentration Pathways* (RCP) permiten evaluar los impactos de las políticas climáticas y los costes-beneficios de los objetivos climáticos a largo plazo (van Vuuren *et al.*, 2011). La denominación RCP se refiere al nivel de objetivo de forzamiento radiativo, proyecciones diseñadas bajo un conjunto de cuatro vías, basadas en niveles de fuerza radiativa de 8.5, 6, 4.5 y 2.6 W/m² definidas hasta el año 2100 (IPCC, 2013). Por otra parte, el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP) creó la iniciativa CORDEX para mejorar los modelos climáticos dinámicos globales, suministrando proyecciones regionales de cambio climático para todas las regiones terrestres del mundo dentro del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2014). El programa CORDEX trata de proporcionar un marco de evaluación coordinado de los modelos existentes, un marco de proyección climática, así como estudios de impacto, adaptación y mitigación del cambio climático (Giorgi *et al.*, 2009).

El objetivo principal de este trabajo se basa en la evaluación de las variaciones en la disponibilidad hídrica a partir de los datos modelizados a futuro en distintos escenarios y los cambios en los usos del suelo en cuencas con un déficit hídrico estructural (sureste de la Península Ibérica). Aplicando el modelo hidrológico del programa de análisis de servicios ecosistémicos InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), se evalúan cinco escenarios climáticos, el primero de ellos referido al periodo actual, que sirvió de referencia en la comparación de dos escenarios de Concentración de Gases de Efecto Invernadero (RCP85 y RCP45) en dos periodos futuros (2020-2050 y 2070-2100), obtenidos de 13 modelos climáticos regionales.

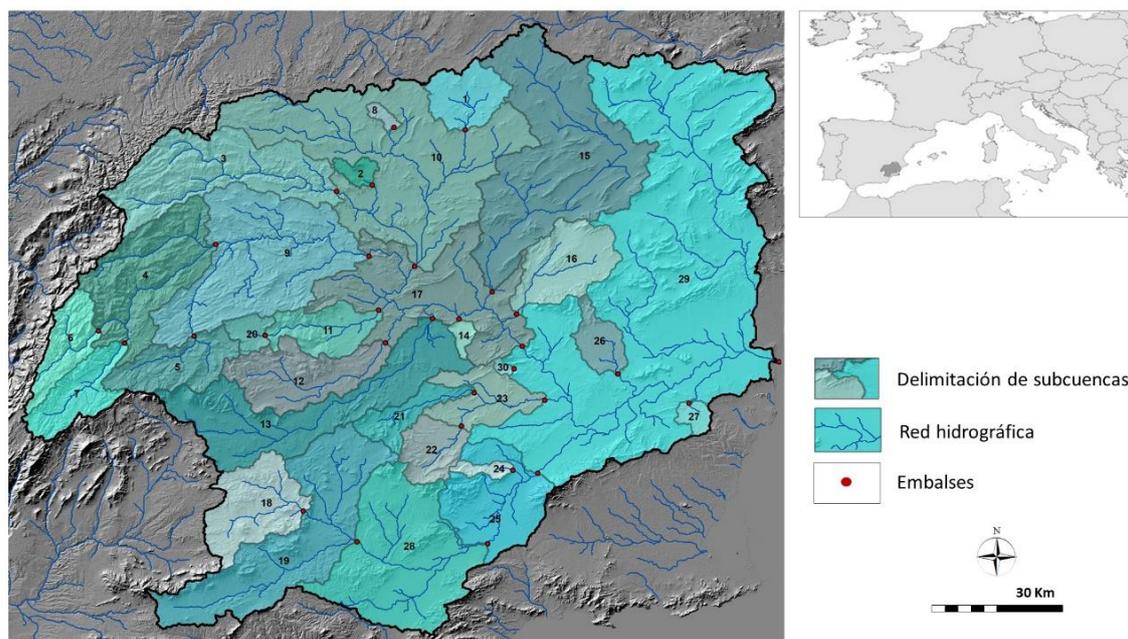
2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio ocupa una superficie total de 1.748.660 ha, localizada en el sureste de la Península Ibérica (Figura 1). Presenta un clima semiárido, caracterizado por una precipitación con registros que van desde los 300 a los 700 mm por año y con una evapotranspiración potencial anual que oscila entre 800 y 1300 mm (Hein, 2007; Llamas, 2007). Los suelos son en su mayoría pobres, poco profundos y con baja fertilidad y escasa materia orgánica, compuestos principalmente por litologías de margas y calizas (Romero Díaz *et al.*, 1992). Sin embargo, las características del clima mediterráneo han fomentado el desarrollo de numerosas actividades agrícolas que abarcan más de 560.000 ha, caracterizadas por un sector heterogéneo compuesto por agricultura de secano, a menudo situada en áreas con pendientes más pronunciadas. En las zonas más llanas, localizadas en los márgenes de los cauces, se desarrolla la agricultura de regadío (con una superficie próxima a las 200.000 ha, principalmente frutal y hortícolas), que demanda importantes volúmenes de agua (Alcón *et al.*, 2013).

Los agroecosistemas más tradicionales, a pesar que están cada vez más amenazados debido a la baja rentabilidad y los cambios socioeconómicos, todavía tienen una importante presencia (Martínez-Fernández *et al.*, 2013). Los cultivos de cereales, especialmente la cebada y el trigo, representan los principales cultivos herbáceos anuales de secano, aunque su producción está actualmente en declive y depende en muchos casos de los subsidios de la UE. Por último, la producción de almendros y olivos, que eran en gran parte el tipo dominante de agricultura en la región, están perdiendo cada vez más producción en favor de las actividades hortícolas de regadío (Hein, 2007).

FIGURA 1

Localización del área de estudio y delimitación de las cuencas hidrológicas analizadas.



Fuente: Elaboración propia

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO 'WATERYIELD'

Los cálculos realizados para la obtención de la disponibilidad de agua generada para las cuencas en estudio, se han llevado a cabo mediante el modelo 'WaterYield' del programa de análisis de servicios ecosistémicos InVEST v.3.3.3 (<https://www.naturalcapitalproject.org/invest/>). El modelo se basa en la estimación de las diferentes aportaciones de agua desde todo el conjunto del territorio, teniendo en cuenta los cambios en los patrones de uso del suelo y su efecto al rendimiento hídrico superficial (Tabla 1).

TABLA 1

Valores de entrada y salida en el modelo 'WaterYield' de InVEST, basado en Sharp *et al.*, (2016). Evapotranspiración de referencia (ET_0); Evapotranspiración real (ET_r); Evapotranspiración potencial (ETP); Precipitación (Pr).

Requerimientos del modelo	Salidas obtenidas
Mapa de usos (categórico)	Estimación de la fracción de ET_r por Pr (pixel)
Delimitación de cuencas	Estimación de la ET_r (mm/pixel)
Profundidad de suelo (mm)	Estimación de la disponibilidad de agua (mm/pixel)
Profundidad máx. de raíces por cobertura (mm)	Pr media por pixel y cuenca (mm)
Pr media anual (mm)	ETP media por pixel y cuenca (mm)
ET_0 media anual (mm)	ET_r media por pixel y cuenca (mm)
Disponibilidad del contenido de agua por planta	Disponibilidad de agua por pixel y cuenca (mm)
Coefficiente de ET_0 por planta	Volumen de agua por cuenca (m ³)
Factor estacional	Volumen de agua en la cuenca por hectáreas (m ³)

Fuente: Elaboración propia

La estimación de la disponibilidad de agua se ha basado esencialmente en la diferencia entre precipitación y las pérdidas totales por evapotranspiración. Los datos están sujetos a un análisis espacial, elaborados sobre álgebra de mapas ráster, basados en la estimación de la cantidad de agua captada por cada subcuenca en el área de trabajo. Con este valor, se ha determinado la cantidad de agua que fluye por cada píxel calculado en función de la precipitación y la evapotranspiración, por lo que toda el agua que no es evaporada se supone que representa el agua disponible. Por lo tanto, el modelo no diferencia entre la superficie, el subsuelo y el flujo de base, pero supone que todo el aporte de agua de un píxel alcanza un punto final de salida de la cuenca a través de una de estas vías. El proceso de cálculo estima el volumen de agua basándose en la curva de Budyko, propuestos por Xu *et al.* (2013), y en la precipitación media anual. El efecto de las coberturas del suelo en el computo posterior se ha basado en las variables descritas en la Tabla 1, que son aplicadas sobre los algoritmos propuestos por Fu (1981) y Zhang *et al.* (2004), formulación disponible en <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/reservoirhydropowerproduction.html#water-yield-model>.

3.2. DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Para la delimitación de las cuencas de drenaje se ha empleado el modelo hidrológico arcHydro Tools de arcGIS, a partir del Modelo Digital del Terreno generado con los datos del vuelo LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con una resolución espacial por píxel de 5m (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDAR>).

La cobertura con la información de los usos del suelo se ha obtenido de la base de datos de la Iniciativa para el Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (<https://www.esa-landcover-cci.org/>), que presenta una cartografía global con 37 clases diferenciadas. Mientras que la información relativa a los datos del suelo, necesaria para determinar el valor de profundidad de raíz de la vegetación, se ha utilizado a partir de la información de la base de datos SoilGrids (<https://soilgrids.org>) del Centro Internacional de Información y Referencia de Suelos (ISRIC), en la que se puede estimar a partir de la capa raster de profundidad absoluta a la base de roca (en mm). De esta base de datos se ha obtenido otro valor necesario para el modelo, que es la fracción de agua disponible para la planta (PAWF). En el catálogo de datos de SoilGrids se presenta un valor del contenido disponible de agua (AWC) a distintas profundidades, que ha servido para estimar la PAWF con la profundidad total del perfil de suelo.

Para el bloque de datos climáticos se han utilizado dos fuentes de información. Los valores históricos utilizados como tiempo de observación, que toman los registros promedio del periodo 1970-2000, proceden de la base de datos global (<http://worldclim.org>) en su segunda versión (Fick y Hijmans, 2017). Y los datos climáticos de los escenarios de cambio climático proceden del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>). En este documento se trabaja sobre escenarios de emisiones que son proyectadas en estimaciones del cambio climático (van Vuuren *et al.*, 2011) mediante un proceso de mejora de la escala ('downscaling' a 1 km de píxel) en una serie de 13 modelos climáticos regionales (<http://www.euro-cordex.net/>). Es evidente que estos cálculos tienen un elevado grado de incertidumbre, en gran medida debido a la dispersión entre las realizaciones de los distintos modelos climáticos, así como a la diversidad climática interna y a las dificultades para transferir los resultados del modelo climático a escalas espacial y temporal distintas. Para reducir esta variabilidad, se ha propuesto elaborar un modelo único que asume los valores promedio del conjunto de modelos utilizados, permitiendo aportar un sesgo reducido en los valores finales.

Los escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (RCP) se utilizan para producir un nuevo conjunto de simulaciones de modelos climáticos (Moss *et al.*, 2010). Los análisis elaborados en este estudio se basan en los RCP4.5 y RCP8.5 (que representan unos escenarios intermedio y extremo, respectivamente en el nivel de fuerza de radiación) proyectados para dos periodos, uno a corto plazo (valores promedio 2020-2050) y otro a medio plazo (valores promedio 2070-2100). Para ambas bases de datos, histórico y escenarios futuros, se han obtenido valores promedio anuales de precipitación, temperatura media, máxima y mínima y radiación. Estos valores últimos han servido para estimar los valores de

evapotranspiración de referencia (ET_0) (Hargreaves y Samani, 1985) espacialmente distribuidos, necesarios para el modelo 'WaterYield'.

3.3. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO

La delimitación del área de estudio se ha basado principalmente en los límites de la cuenca del Segura, situada en el sureste de la Península Ibérica (Figura 1). Para la gestión de los datos en el modelo 'WaterYield' de InVEST, se ha determinado la sustracción de las subcuencas litorales, así como otras subcuencas endorreicas en la zona norte. Por otra parte, y debido a un objetivo puramente analítico, se ha decidido añadir la cuenca del Vinalopó, lo cual ha ayudado a una mejor caracterización climática del entorno.

El área de drenaje se ha establecido mediante el modelo hidrológico arcHydro Tools de arcGIS, a partir del Modelo Digital del Terreno generado con los datos del vuelo LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con una resolución espacial por pixel de 5m (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDAR>). Los 29 embalses y presas existentes en la zona de estudio han servido para establecer las superficies de cuencas independientes en una capa vectorial que contiene 29 unidades de drenaje. Además, se ha añadido el último punto de cierre ubicado en la desembocadura del río Segura (Guardamar), área a la que se ha unido la superficie del Vinalopó. Estas 30 'subcuencas' han permitido delimitar distintas áreas de drenaje con entidad propia, que han sido evaluadas a partir del modelo hidrológico 'WaterYield' de InVEST (Tabla 2).

TABLA 2
Superficie de las cuencas de drenaje evaluadas (en hectareas). Identificador (ID) para su localización en la FIGURA 1.

ID	Embalse	Superficie (ha)	ID	Embalse	Superficie (ha)	ID	Embalse	Superficie (ha)
1	Bayco	24248	11	Moratalla	25030	21	DeLaCierva	17380
2	Boqueron	5171	12	Argos	45232	22	Pliego	20306
3	Talave	76356	13	AlfonsoXIII	88766	23	Rodeos	27159
4	Fuensanta	69496	14	Carcavo	3617	24	Algeciras	4426
5	Taibilla	31658	15	Judio	140962	25	Romeral	49677
6	Anchuricas	23638	16	Moro	37757	26	Santomera	14842
7	Vieja	27551	17	Ojos	89516	27	Pedreira	5370
8	Charcos	2781	18	Valdeinfierno	42589	28	Pareton	101150
9	Cenajo	109433	19	Puentes	99521	29	Guardamar	392845
10	Camarillas	162938	20	Risca	7951	30	Mayes	1294

Fuente: Elaboración propia

4. RESULTADOS

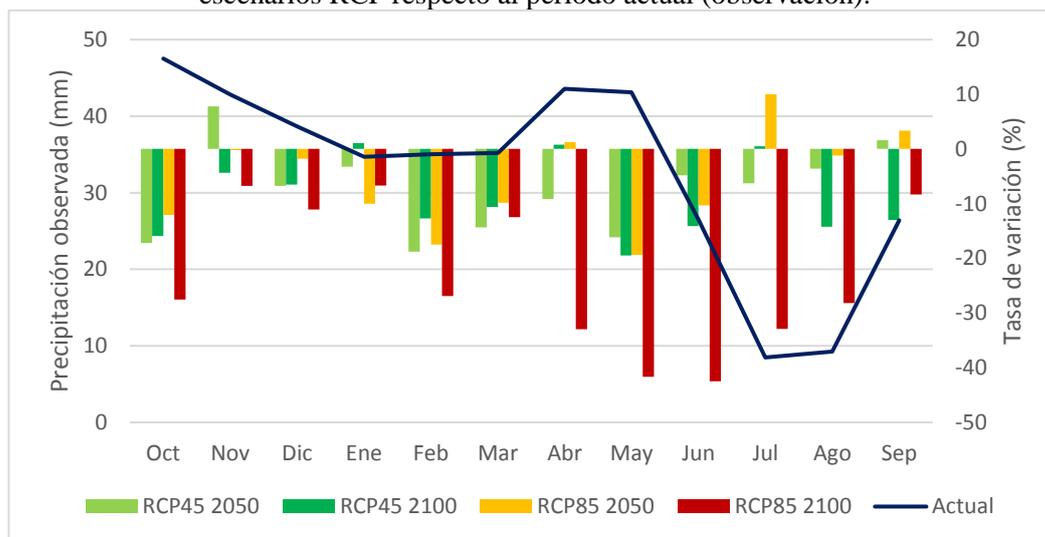
4.1. ANÁLISIS DEL AÑO HIDROLÓGICO Y TENDENCIAS FUTURAS EN PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

Los valores de precipitación registrados en el área de estudio, correspondientes al escenario actual, mostraron dos picos de máximo aporte hídrico situados en los periodos de otoño y primavera (octubre y abril, respectivamente), con valores mensuales superiores a los 40 mm. El caso opuesto se observó en el periodo estival, concretamente en los meses de julio y agosto, con valores mensuales promedios inferiores a los 10 mm de precipitación (Figura 2). Las tendencias aportadas por los valores de los escenarios de cambio climático revelaron un descenso generalizado de las precipitaciones a lo largo del año hidrológico, con tasas promedio de cambio del -7% para el escenario más realista (RCP45 2050), o del -23% para el más extremo (RCP85 2100).

Si se observa de manera más detallada, los valores mensuales ofrecieron una alta variabilidad en los distintos escenarios futuros. Las tasas de cambio más importantes se mostraron en los periodos de invierno y primavera, así como en el mes de octubre. Los datos del RCP85 100 revelaron esta tendencia de manera más acusada, con una notable disminución a lo largo del año, pero con valores de cambio que podrían superar el 40% de pérdida de lluvias en los meses de mayo y junio (Figura 2).

FIGURA 2

Eje izquierdo (línea): valores mensuales de precipitación (mm) para el periodo de observación (1970-2000), referidos al área de estudio. Eje derecho (barras): tasa de variación (%) de los escenarios RCP respecto al periodo actual (observación).



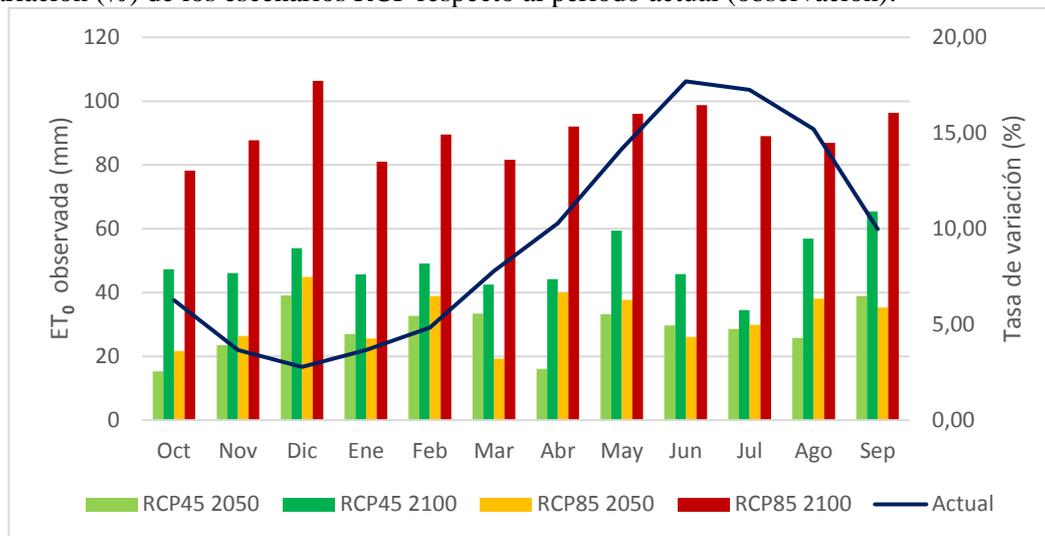
Fuente: Elaboración propia

Para analizar de forma más exhaustiva la evolución de los valores del año hidrológico, es interesante completar esta información con los datos de ETo obtenidas para este trabajo. La línea que muestra la distribución de la ETo en el periodo actual, determinó una pérdida de más 100 mm de flujos hídricos en los meses de verano. Mientras que en el periodo invernal (diciembre) descendió a los 20 mm (Figura 3).

La variación de la ETo en los distintos escenarios futuros mostró una tendencia más homogénea que la precipitación, con un aumento similar a lo largo de todos los meses. Para los escenarios RCP45 2050, RCP45 2100 y RCP85 2050 se obtuvieron tasas promedio de variación anual de un 5, 8 y 5%, respectivamente. Siendo el escenario más extremo (RCP85 2100) el que mayor tasa de cambio aportó, con un aumento promedio de la ETo del 15% (Figura 3).

FIGURA 3

Eje izquierdo (línea): valores mensuales de evapotranspiración de referencia (mm) para el periodo de observación (1970-2000), referidos al área de estudio. Eje derecho (barras): tasa de variación (%) de los escenarios RCP respecto al periodo actual (observación).



Fuente: Elaboración propia

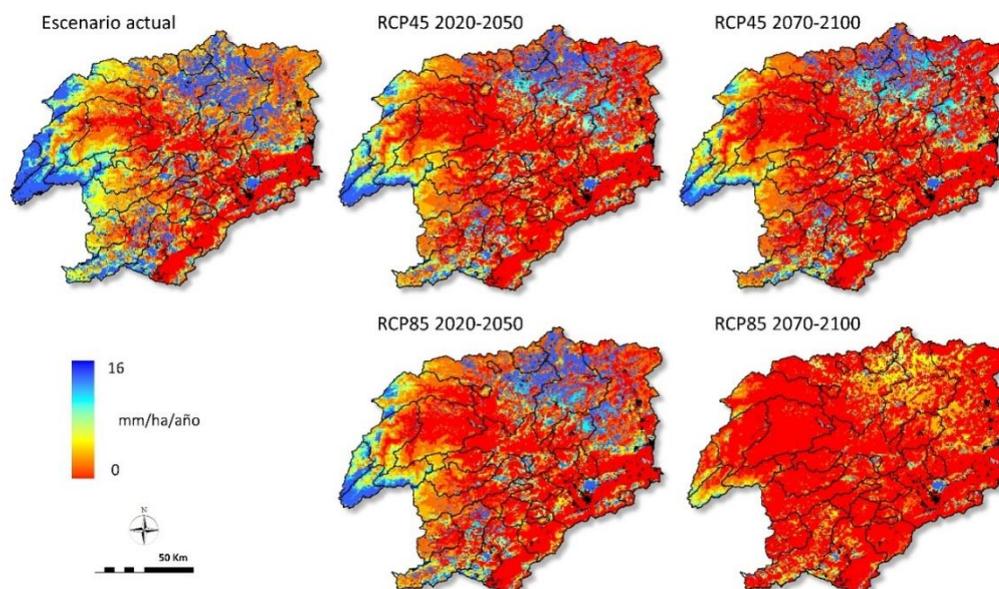
4.2. EFECTOS DELAS VARIACIONES EN LA PRECIPITACIÓN Y LA ETP EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los resultados de disponibilidad hídrica extraídos del modelo 'WaterYield' para el área de estudio están caracterizados de forma espacial en valores continuos. Se puede observar como en el escenario actual, las cuencas situadas en la zona noroccidental son las que mayor volumen hídrico presentaron, con valores superiores a los 14 mm/ha/año. Una segunda zona con elevada disponibilidad hídrica se localiza al norte de la cuenca, con valores cercanos a los 10 mm/ha/año. Por último, se puede delimitar en la parte suroccidental del área analizada una tercera zona de menor extensión con valores similares al anterior, completando así, las áreas de mayor capacidad de aporte hídrico (Figura 4).

La estimación de los resultados expresados por los escenarios de cambio climático ha mostrado un claro efecto de pérdida de la capacidad hídrica de la cuenca. Los escenarios temporalmente más próximos (RCP45 2050 y RCP85 2050) mostraron un descenso paulatino en todas las cuencas respecto al escenario actual de observación, siendo la zona occidental la más acusada (Figura 4). El efecto fue mucho más evidente en los escenarios evaluados para el periodo 2070-2100, donde el descenso de la disponibilidad hídrica estimada para final de siglo aportó en las zonas más favorables valores de 5 mm/ha/año. Se observamos estos resultados en valores promedio, en el peor de los escenarios posibles (RCP85 2100), se pueden llegar a producir pérdidas del 75% del volumen de agua producido por la cuenca.

FIGURA 4

Representación de la disponibilidad hídrica en la zona de estudio. Las unidades para el escenario actual vienen expresadas en mm/ha/año.



Fuente: Elaboración propia

4.3. EVALUACIÓN POR CUENCAS DE LAS VARIABLES DE SALIDA DEL MODELO 'WATERYIELD'

Como se ha observado en el apartado anterior, la gran heterogeneidad en los valores obtenidos en el interior de cada cuenca hace complicado la evaluación de estas en valoraciones de conjunto. Por ello, esta parte de los resultados se centra en el análisis del promedio de los datos por cuenca de drenaje. Con el objetivo de sintetizar estos resultados y mostrar su variabilidad espacial, en la Figura 5 se describen los valores de salida del modelo de precipitación, ETr y disponibilidad hídrica. Como datos de referencia, se presentan los valores actuales expresados en mm por hectárea, que sirven para comparar las tasas porcentuales de variación en los distintos escenarios futuros analizados.

Los datos de precipitación en el escenario actual generados por el modelo han mostrado un rango de valores anuales entre los 47 y 25 mm/ha/año. Los mayores volúmenes se dieron a la parte occidental de la cuenca, asociado a las áreas de mayor altitud. La variación que se produce en el análisis de los escenarios futuros proporcionaron valores de descenso de la precipitación que van desde el 12% (RCP45 2050) al 28% (RCP85 2100). Las mayores tasas de cambio se dieron en las cuencas occidentales, siendo notables en el escenario más extremo.

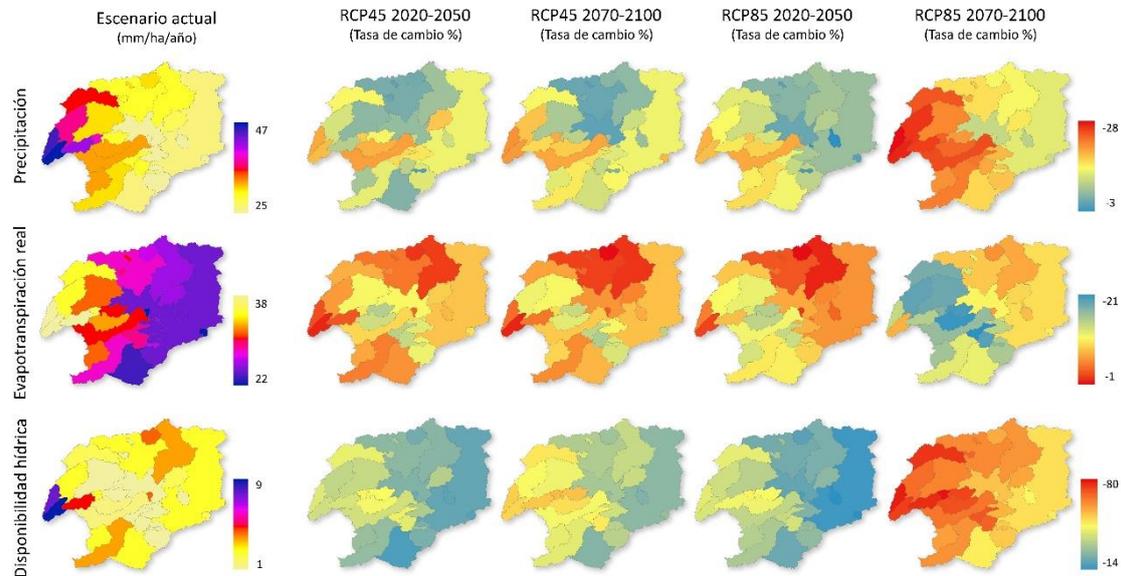
El rango de valores proporcionado para la ETr en el periodo actual se situó entre los 38 y 22 mm/ha/año, siendo las cuencas occidentales las que mayor descenso presentan por evapotranspiración. Las menores tasas de cambio se dieron en las cuencas situadas al norte, que en algún caso se mantienen respecto al escenario de observación. Es en la parte centro-oeste, donde se ha producido disminuciones más importantes de la ETr, con valores que van desde un 9% (RCP45 2050) a un 21% (RCP85 2100).

Por último, se pudo observar que los mayores valores de disponibilidad hídrica de la cuenca se situaron en la parte occidental, con volúmenes cercanos a los 9 mm/ha/año. Respecto a las tasas de cambio estimadas en los escenarios futuros, se observaron notables descensos incluso en los escenarios más favorables (RCP45 2050), con variaciones negativas del 50% en algunas cuencas de la zona occidental de la cuenca. Mientras que para escenario como el RCP85 2100,

los descensos pueden llegar a ser superiores al 80%, localizados mayoritariamente en la mitad occidental de la zona de estudio.

FIGURA 5

Representación de los valores promedio de precipitación, ET_0 y disponibilidad hídrica en las cuencas analizadas. Las unidades para el escenario actual vienen expresadas en mm/ha/año. Las unidades para los escenarios futuros vienen expresadas por valores porcentuales, descritos por la tasa de cambio respecto al escenario actual.



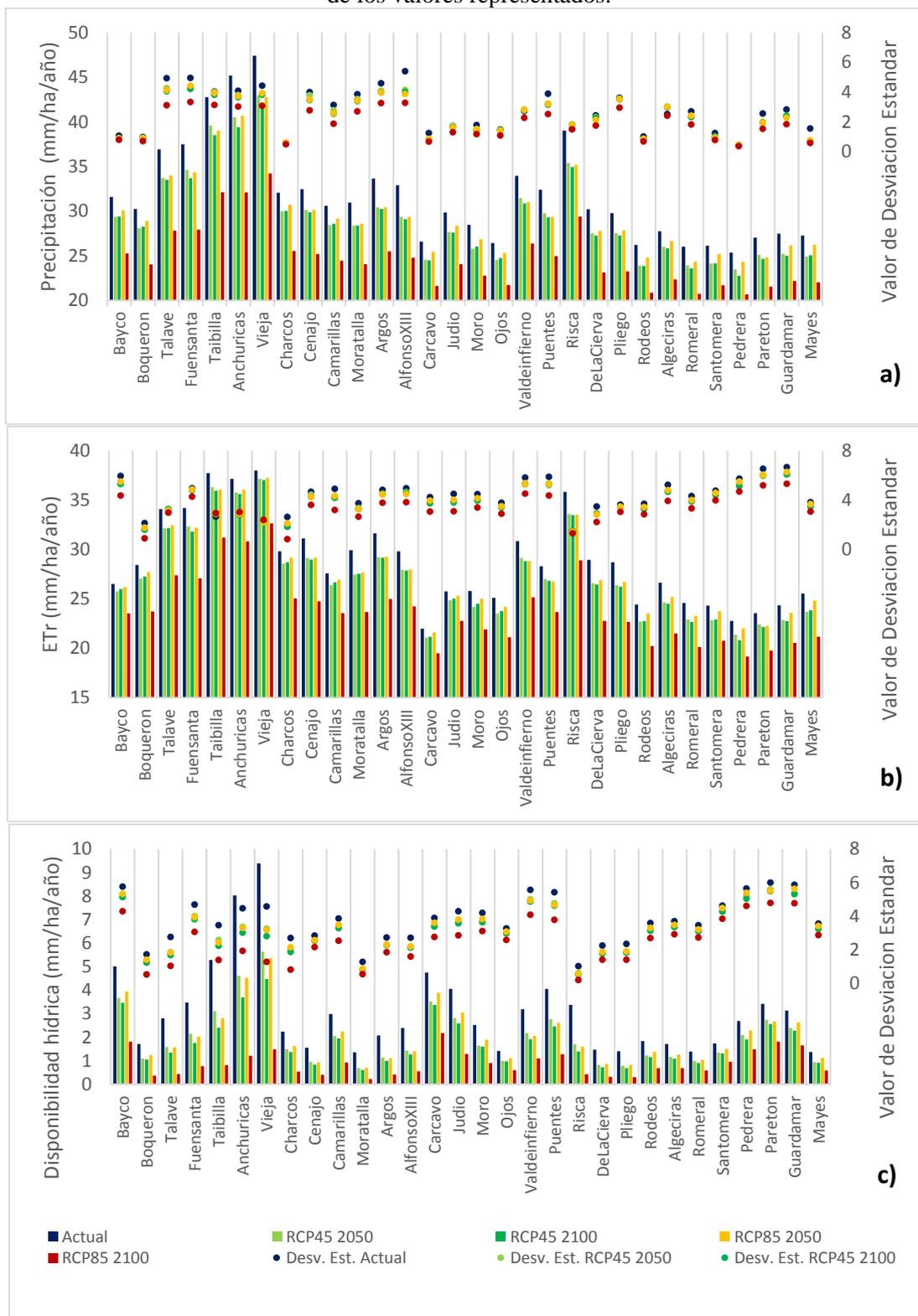
Fuente: Elaboración propia

A continuación, en un análisis más detallado, se ha determinado la evolución de estas variables (Pr, ETr y disponibilidad hídrica) por subcuenca en los distintos escenarios de emisión en intervalos temporales. Como se ha comentado anteriormente, los valores utilizados en el análisis por cuenca se han obtenido a través del valor promedio de todos los datos, por lo que resulta interesante mostrar los valores de desviación estándar, que ayudan a proporcionar una imagen de la homogeneidad de los valores originales.

Las cuencas que mayores volúmenes de precipitación recogen en el escenario actual son Talave, Fuensanta, Taibilla, Anchuricas, Vieja y Risca (36,9; 37,5; 42,8; 45,2; 47,4 y 39,2 mm/ha/año, respectivamente). Observando la evolución en los escenarios futuros, se pudo determinar que también son las que peores perspectivas presentan con descensos importantes en todas ellas, sobre todo en los escenarios más realistas (RCP45 2050 y RCP45 2100) (Figura 6a). La elevada dispersión de los valores de desviación estándar entre escenarios, con la excepción de la cuenca de Risca, han mostrado una alta variabilidad de sus resultados frente a la mayor parte del resto de cuencas analizadas. En el lado opuesto, se presentaron los escasos valores de precipitación recogidos por las cuencas de Carcavo, Ojos, Rodeos, Romeral, Santomera y Pedrera (26,3; 26,5; 26,2; 26; 26,1 y 25,4 mm/ha/año), mostrando una menor amplitud de los valores de desviación estándar espacialmente en la superficie total de cada cuenca (menores a ± 2 mm/ha), y entre escenarios (menores a ± 1 mm/ha) (Figura 6a). Las tendencias en los escenarios futuros también presentaron notables pérdidas de precipitación, siendo significativas en el escenario RCP85 2100.

FIGURA 6

Valores de precipitación, evapotranspiración real y la disponibilidad hídrica de la cuenca, aportados por el modelo 'Water Yield' (InVEST). Las barras muestran el aporte de los flujos en los distintos escenarios analizados. Los puntos muestran los datos de desviación estándar de los valores representados.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la ETr determinan los valores más elevados en las cuencas del Talave, Fuensanta, Taibilla, Anchuricas, Vieja y Risca (34,1; 34,2; 37,8; 37,2; 38 y 35,8 mm/ha/año), coincidiendo con los que mayor volumen de precipitación presentan. En este caso, los valores de desviación estándar para la mayoría de las cuencas son mayores que los registrados en la precipitación, con variaciones superiores a ± 4 mm/ha (Figura 6b). La evolución en la estimación de los escenarios futuros es más moderada respecto a las lluvias, con un descenso de la ETr en todas las cuencas. En el escenario RCP85 2050, se observó la menor de las variaciones, con valores parecidos a los del escenario de observación. La desviación estándar de los datos entre escenarios aportó variaciones muy pequeñas, con diferencias inferiores a ± 1 mm/ha, en la mayoría de los casos (Figura 6b).

Finalmente, los datos de disponibilidad hídrica obtenidos por el modelo han determinado valores escasos en el aporte de agua general de la cuenca en estudio. Solo cuatro cuencas de drenaje (Bayco, Taibilla, Anchuricas y Vieja) superan los 5 mm/ha/año (Figura 6c). Respecto al análisis de los escenarios futuros, se observó una tendencia generalizada de pérdida de la disponibilidad de agua en todas las cuencas, siendo estas cuencas mencionadas las que mayor aporte tienen en la actualidad, y las que peores pronósticos predictivos proporcionan. Interesantes son los resultados mostrados por los datos de desviación estándar, donde los valores que representan la variabilidad interna por cuenca, han determinado en la mayoría de los casos variaciones superiores a los ± 4 mm/ha. También han sido elevadas las diferencias entre escenarios, donde algunas cuencas presentaron variaciones de ± 2 mm/ha (Figura 6c).

5. DISCUSIÓN

La determinación de los datos mensuales de precipitación y ET_0 (Figuras 2 y 3), que sirven de información de entrada al modelo, muestran tendencias de disminución de los aportes hídricos con descensos pronunciados en los periodos de mayor precipitación actual. En estos meses (octubre, febrero, marzo, mayo), los escenarios a corto plazo (RCP45 2050 y RCP85 2050) proporcionan reducciones promedio superiores al 15%, asociadas al incremento de la evapotranspiración, que se relaciona directamente con el aumento de las temperaturas medias. Este factor puede provocar una mayor homogeneidad en la precipitación mensual, con la pérdida de los aportes de lluvia en los periodos de otoño y primavera, que habitualmente presentan los mayores registros.

Las implicaciones ecológicas del descenso de las precipitaciones son evidentes, pero desde un punto de vista de la productividad agrícola, este factor incide negativamente en los cultivos tradicionales de secano. Un cambio en las condiciones climáticas debido al calentamiento global, tiene un impacto directo en el ciclo de crecimiento de estos cultivos, y por lo tanto, en sus rendimientos (Cai *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2016). Por ello, es imprescindible activar mecanismos que permitan mitigar estos efectos con el empleo de sistemas de adaptación relacionados con un manejo sostenible de las actividades agroforestales. Estudios recientes en ambientes climáticos forzados han aportado buenos resultados en la mejora de la productividad de cultivos, mediante asumibles cambios en la gestión y el manejo agrícola sostenible (Laux *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2016).

La adaptación en el contexto del cambio climático fue definida por Smith y Pilifosova (2001) como el ajuste de "*sistemas ecológicos, sociales o económicos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados y sus efectos o impactos*". Se refiere a los cambios en los procesos, las prácticas y la estructura de los sistemas implicados, para moderar los posibles daños o beneficiarse de las oportunidades asociadas con el cambio climático. Los esfuerzos actuales para mejorar las capacidades de adaptación son insuficientes y, en algunos casos, mal planificados. Como resultado de la influencia de las realidades socioeconómicas y ambientales sobre la efectividad de las estrategias de adaptación, las acciones implementadas, a pesar de enfrentarse a desafíos globales y a diferencia de la mayoría de las soluciones de mitigación, son a menudo locales y autónomas (Smith y Pilifosova, 2001; Pijnappels y Dietl, 2013). Desafortunadamente, a lo largo de la década pasada estas acciones, reflejadas en los documentos de directrices de adaptación al cambio climático de organizaciones internacionales, han cambiado cada vez más el enfoque de soluciones de vulnerabilidad, impacto y adaptación a

enfoques sectoriales o regionales, que no son asumibles por estos actores locales (Hinkel *et al.*, 2013). Por lo que, para una mayor efectividad, sería interesante definir actuaciones concretas de adaptación, asociadas a políticas complementarias de mitigación global.

Continuando con un análisis más pormenorizado de los resultados por cuencas, para los escenarios futuros se observa un descenso en la estimación de la precipitación en la parte occidental de la cuenca, zona que a su vez muestra un notable descenso en los valores proporcionados para la ETr (Figura 5). Esta aparente contradicción se explica por la disponibilidad hídrica resultante en el balance de agua, debido a los escasos volúmenes que el suelo puede almacenar, por lo que los procesos de evapotranspiración no disponen de flujos suficientes, a pesar de un aumento de las temperaturas. El caso opuesto sucede en las cuencas situadas en la zona norte, que presentan un descenso más limitado de las precipitaciones y valores similares de ETr respecto al escenario de observación. En esta situación, la existencia de agua subsuperficial en el suelo permite movilizar estos flujos verticales, manteniendo valores parecidos a la actualidad.

Los efectos del cambio en la ETr también pueden estar condicionadas a la existencia de importantes espacios de vegetación natural; relacionado con una tendencia general detectada durante las últimas décadas, con el aumento de la cubierta vegetal (*greening up*) en las áreas de montaña de la cuenca norte mediterránea, que está provocando alteraciones en el ciclo del agua (Farley *et al.*, 2005; Molina *et al.*, 2015). La existencia de estas masas forestales puede generar una reducción sustancial de la escorrentía (Morán-Tejada *et al.*, 2010; López-Moreno *et al.*, 2008; Pérez-Cutillas *et al.*, 2018) vinculada a la mejora de la estructura de los suelos y aumento de su capacidad de infiltración. Con ello se podría explicar la pérdida de parte de los flujos de agua, ya que esta superficie boscosa lleva asociado un efecto de partición hídrica que introduce la vegetación a través de procesos como la evaporación, transpiración e interceptación (Belmonte Serrato y Romero Díaz, 2013), con una nueva redistribución de la precipitación (García-Ruiz *et al.*, 2011; Linhoss y Siegert 2016).

Respecto a la evolución de la disponibilidad de agua en las cuencas analizadas, las tasas de cambio estimadas han mostrado importantes descensos en todos los escenarios futuros (Figura 5). Las áreas con las tendencias más negativas se localizan en la zona occidental de la zona de estudio, cuencas que en la actualidad son las que proporcionan mayores servicios hídricos. Estos territorios, con los aportes extras del trasvase Tajo-Segura, abastecen de agua potable a una población superior a dos millones de personas a través de su regulación en embalses como el de Fuensanta, Taibilla y Camarillas, o los de Anchuricas y la Vieja situados en el Parque Natural Sierras de Cazorla, Segura y las Villas.

A nivel global, estas regiones montañosas han sido denominadas "torres de agua" naturales, debido a la importante provisión de recursos hídricos que generan (Vivrioli y Weingartner, 2008). Se convierten por lo tanto en entornos necesarios para asegurar un abastecimiento mínimo que permita el desarrollo de las actividades agrícolas, industriales y urbanas de sus vegas aguas abajo. Sin embargo, estas regiones de cabecera, como atestiguan numerosos trabajos (Morán-Tejada *et al.*, 2010; Versini *et al.*, 2016; Garcia *et al.*, 2017), presentan una mayor vulnerabilidad que los ámbitos más bajos a los efectos del cambio climático, por lo que se deberían presentar como áreas prioritarias en las planificaciones actuales y futuras.

Otro valor a tener en cuenta de los resultados mostrados por los datos de desviación estándar en la disponibilidad de agua (Figura 6c) es la alta variabilidad por escenarios que muestran las cuencas de la zona occidental. Las variaciones, que en algunos casos superan los ± 2 mm/ha (Taibilla, Anchuricas y Vieja), muestran una gran incertidumbre en los resultados obtenidos, y su comparación entre escenarios. Estos valores también nos muestran una elevada heterogeneidad espacial, que determina importantes diferencias dentro de las cuencas (Figura 4). En general, el grado de incertidumbre mostrado por numerosos modelos climáticos obliga a considerar estas variaciones en las predicciones de la precipitación (Huang *et al.*, 2018). Su variabilidad natural, a menudo puede enmascarar las tendencias existentes, de tal manera que los resultados pueden ofrecer valores estadísticamente bajos. La información sobre las limitaciones en la detección de tendencias es importante para la evaluación de riesgos bajo estas incertidumbres (Morin, 2011). En las regiones áridas y semiáridas, que presentan una alta variabilidad interanual de la precipitación, la probabilidad de identificar tendencias

estadísticamente significativas en períodos cortos es baja. Por lo que pueden aparecer problemas inherentes con la aparición de altas tendencias absolutas potencialmente indetectables que deben considerarse al analizar series de datos de precipitación y determinar los riesgos en las estrategias de adaptación al cambio climático (Morin, 2011).

En definitiva, la escasez estructural de agua es una realidad en el sureste de España, en el que hay que añadir el aumento importante en la demanda de agua en las últimas décadas para usos estratégicos como la agricultura y el turismo. Las predicciones obtenidas en los escenarios de cambio climático proporcionan una reducción progresiva de los recursos hídricos, que demandará necesariamente la adopción generalizada de medidas de adaptación ya mencionadas; asociadas a otras de mitigación como el aumento del suministro de agua (desalinización y reutilización), mejoras en la eficiencia del uso del agua (modernización de distritos de riego) y una mayor eficiencia en la gestión de la demanda (Martínez-Álvarez *et al.*, 2016).

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo han mostrado unas claras tendencias de alteración en los valores de precipitación y de la evapotranspiración de referencia para escenarios de cambio climático. Se prevé que la precipitación experimente descensos del 15% en los escenarios menos negativos, y que la ET_0 muestre un ascenso generalizado superior al 5% respecto a los registros actuales.

La reducción en la disponibilidad hídrica de las cuencas analizadas a través del modelo hidrológico, han proporcionado valores significativos, con tasas de variación negativas entre el 30 y 50% para los escenarios más realistas (RCP45 2050 y RCP45 2100). Este descenso no se explica exclusivamente con el aumento de la ET_0 y la disminución de la precipitación, que fueron porcentualmente menores. En consecuencia, para futuros trabajos sería interesante analizar el efecto de los usos, así como las propiedades edafológicas de los suelos, debido a que son parámetros de entrada al modelo con implicaciones en los procesos de escorrentía.

Son evidentes las pérdidas producidas en los recursos hídricos debidos al cambio climático, con un gran impacto en la región mediterránea que presenta una mayor vulnerabilidad por su actual escasez de agua. De modo que, el desarrollo de herramientas que permitan conocer los cambios de los elementos que componen el ciclo hidrológico podrán servir de base para las soluciones relacionadas con la gestión del agua y sus demandas futuras, así como en la elaboración de políticas más efectivas en la administración de estos recursos.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto de investigación “ Identification of realistic scenarios of climate change and Sustainable Land Management (SLM) for 2010-2100 period, in the catchment area of the Mediterranean Sea” financiado por la Universidad de Friburgo (Suiza) en el programa de becas de internacionalización del period 2016-2017. Mencionar de manera especial a los investigadores Joris de Vente y Carolina Boix-Fayos del Grupo de Erosión de Suelos del Centro de Edafología y Biología Aplicada al Segura (CEBAS-CSIC), y al professor Reynald Delaloye del grupo de Geografía Física del Departamento de Geociencias (Universidad de Friburgo) por su ayuda y apoyo en el desarrollo del proyecto.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ALCÓN, F., MARTÍN-ORTEGA, J., PEDRERO, F., ALARCÓN, J. J., y DE MIGUEL, M. D. (2013): “Incorporating Non-market Benefits of Reclaimed Water into Cost-Benefit Analysis: A Case Study of Irrigated Mandarin Crops in southern Spain”. *Water Resources Management*, vol. 27, p. 1809–1820.
- BELMONTE SERRATO, F. y ROMERO DÍAZ, M.A. (2013): *Interceptación de la lluvia por la vegetación en España*. Ed. Instituto Euromediterráneo del Agua. Murcia. Pp. 382.

- BOIX-FAYOS, C., MARTÍNEZ-MENA, M., PÉREZ-CUTILLAS, P., DE VENTE, J., BARBERÁ, G.G., MOSCH, W., NAVARRO CANO, J.A., GASPAS, L. y NAVAS, A. (2017): "Carbon redistribution by erosion processes in an intensively disturbed catchment". *Catena*, vol. 149, p. 799-809.
- CAI, X., WANG, D. y LAURENT, R. (2009): "Impact of climate change on crop yield: A case study of rainfed corn in central Illinois". *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, p. 1868-1881.
- CHIEW, F.H.S., PROSSER, I.P., POST, D.A. (2011): "On climate variability and climate change and impact on water resources". *MODSIM 2011- 19th International Congress on Modelling and Simulation - Sustaining Our Future: Understanding and Living with Uncertainty*, p. 3553-3559.
- CHOI, H.S., SCHNEIDER, U.A., RASCHE, L., CUI, J., SCHMID, E., HELD, H. (2015): Potential effects of perfect seasonal climate forecasting on agricultural markets, welfare and land use: A case study of Spain. *Agricultural Systems*, vol. 133, p. 177-189.
- FARLEY, K.A., JOBBÁGY, E.G. y JACKSON, R.B. (2005): "Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy". *Global Change Biology*, vol. 11, p. 1565-1576.
- FICK, S.E. y HIJMANS, R.J. (2017): "Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas". *International Journal of Climatology*, vol. 37(12), p. 4302-4315.
- FU, B.P. (1981): "On the calculation of the evaporation from land surface", *Sci. Atmos. Sin.*, VOL. 5, P. 23-31.
- GARCÍA-RUIZ, J.M., LÓPEZ-MORENO, J.I., VICENTE-SERRANO, S.M., LASANTA-MARTÍNEZ, T. y BEGUERÍA, S. (2011): "Mediterranean water resources in a global change scenario". *Earth-Science Reviews*, vol. 105, p. 121-139.
- GARCIA, C., AMENGUAL, A., HOMAR, V., ZAMORA, A. (2017): "Losing water in temporary streams on a Mediterranean island: Effects of climate and land-cover changes". *Global and Planetary Change*, vol. 148, p. 139-152.
- GIORGI, F., JONES, C. y ASRAR, G.R. (2009): "Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework". *Bulletin of the World Meteorological Organization*, vol. 58, p. 175-183.
- HARGREAVES, G.H. y SAMANI, Z.A. (1985): "Reference crop evapotranspiration from temperature". *Applied Eng. in Agric.*, vol. 1 (2), p. 96-99.
- HEIN, L. (2007): "Assessing the costs of land degradation: A case study for the Puentes catchment, southeast Spain". *Land Degradation and Development*, vol. 18, p. 631-642.
- HINKEL, J., VAN VUUREN, D. P., NICHOLLS, R. J., y KLEIN, R. J. T. (2013): "The effects of adaptation and mitigation on coastal flood impacts during the 21st century. An application of the DIVA and IMAGE models". *Climatic Change*, vol. 117, p. 783-794.
- HUANG, D., YAN, P., ZHU, J., ZHANG, Y., KUANG, X., CHENG, J. (2018): Uncertainty of global summer precipitation in the CMIP5 models: a comparison between high-resolution and low-resolution models. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 132 (1-2), p. 55-69.
- IGLESIAS, A., ROSENZWEIG, C., y PEREIRA, D. (2000): "Agricultural impacts of climate change in Spain: Developing tools for a spatial analysis". *Global Environmental Change*, vol. 10, p. 69-80.
- IGLESIAS, A., GARROTE, L., FLORES, F., y MONEO, M. (2007): "Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean". *Water Resources Management*, vol. 21, p. 775-788.
- IPCC AR5 WG1 (2013): *Climate Change*. Stocker, T.F. et al., eds. The Physical Science Basis. Working Group 1 (WG1) Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 5th Assessment Report (AR5), Cambridge University Press.
- IPCC (2014): *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.

- LAUX, P., JÄCKEL, G., TINGEM, R.M. y KUNSTMANN, H. (2010): “Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon-A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations”. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol 150, p. 1258-1271.
- LINHOSS, A.C. y SIEGERT, C.M.(2016):“A comparison of five forest interception models using global sensitivity and uncertainty analysis”. *Journal of Hydrology*,vol. 538, p. 109-116.
- LOPEZ-BUSTINS, J.A., PASCUAL, D., PLA, E., RETANA, J. (2013):“Future variability of droughts in three Mediterranean catchments”. *Natural Hazards*, vol. 69 (3), p. 1405-1421
- LÓPEZ-MORENO, J.I., BENISTON, M. y GARCÍA-RUIZ, J.M. (2008):“Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains”. *Global and Planetary Change*,vol. 61(3-4), p. 300-312.
- LLAMAS, M.R. (2007). *Lessons from Intensive Groundwater User in Spain: Economic and Social Benefits and Conflicts*. En: “The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development”, Giordano and Villholth (pp. 266–295).
- MARTÍNEZ-ALVAREZ, V., CALATRAVA, J., MARTINEZ-GRANADOS, D. y MARTINGORRIZ, B. (2016): “Analysis of water markets as an adaptive tool to water scarcity in SE Spain's agricultura”. 2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2016
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., ESTEVE-SELMA, M.A., BAÑOS-GONZÁLEZ, I., CARREÑO, F., MORENO, A. (2013):“Sustainability of Mediterranean irrigated agro-landscapes”. *Ecological Modelling*, vol. 248, p. 11-19.
- MERKENSCHLAGER, C., HERTIG, E., JACOBET, J. (2017): Non-stationarities in the relationships of heavy precipitation events in the Mediterranean area and the large-scale circulation in the second half of the 20th century. *Global and Planetary Change*, vol. 151, p. 108-121.
- MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R. M., KUNDZEWICZ, Z. W., LETTENMAIER, D. P., y STOUFFER, R. J. (2008): “Climate change. Stationarity is dead: whither water management?” *Science*, vol. 319, p. 573–574.
- MOLINA, A., VANACKER, V., BRISSON, E., MORA, D. y BALTHAZAR, V. (2015): “Multidecadal change in streamflow associated with anthropogenic disturbances in the tropical Andes”. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, p. 4201-4213.
- MORÁN-TEJEDA, E., CEBALLOS-BARBANCHO, A. y LLORENTE-PINTO, J.M. (2010): “Hydrological response of Mediterranean headwaters to climate oscillations and land-cover changes: The mountains of Duero River basin (Central Spain)”. *Global and Planetary Change*, vol. 72(1-2), p. 39-49.
- MORENO, J., AGUILO, E., ALONSO, S., ALVAREZ COBELAS, M., ANADON, R., y BALLESTER, F. (2005): *A Preliminary General Assessment of the Impacts in Spain Due to the Effects of Climate Change*. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/Full_report_tcm7-199440.pdf
- MORIN, E. (2011): To know what we cannot know: Global mapping of minimal detectable absolute trends in annual precipitation. *Water Resources Research*, vol. 47 (7), Article n. W07505.
- MOSS, R.H., EDMONDS, J.A., HIBBARD, K.A., MANNING, M.R., ROSE, S.K., VAN VUUREN, D.P., CARTER, T.R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G.A., MITCHELL, J.F.B., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S.J., STOUFFER, R.J., THOMSON, A.M., WEYANT, J.P. y WILBANKS, T.J., (2010):“The next generation of scenarios for climate change research and assessment”. *Nature*, vol. 463(7282),p. 747-756.
- PÉREZ-CUTILLAS, P., ZEMA, D.A., CATALDO, M.F., DE VENTE, J. y BOIX-FAYOS, C. (2017): “Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España)”. *Bosque*, vol. 39(1), (en prensa).
- PIJNAPPELS, M., y DIETL, P. (2013): *Adaptation Inspiration Book: 22 Implemented Cases of Local Climate Change Adaptation to Inspire European Citizens*. CIRCLE-2.

- ROMERO DIAZ, M.A., LÓPEZ BERMÚDEZ, F. y CABEZAS, F. (1992): "Erosion and fluvial sedimentation in the River Segura basin (Spain)". *Catena*, vol. 19(3-4), p. 379-392.
- ROMERO DIAZ, A., y BELMONTE SERRATO, F. (2002): *Erosion del suelo en ambiente semiárido extremo a diferentes tipos de litologías y suelos*. En: "Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del tercer milenio". Eds. A. Perez Gonzalez, J. Vagas, & M. J. Machado (pp. 315-322). Madrid.
- SCHWILCH, G., HESSEL, R., y VERZANDVOORT, S. (2012): *Desire for Greener Land: Options for Sustainable Land Management in Drylands*. (G. Schwilch, R. Hessel, & S. Verzandvoort, Eds.). Bern and Wageningen.
- SMITH B., y PILIFOSOVA, O. (2001): *Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity*. En: "Climate Change". Impacts, Adaptations and Vulnerability. (pp. 879-906).
- STEIN, B. A., STAUDT, A., CROSS, M. S., DUBOIS, N. S., ENQUIST, C., GRIFFIS, R., HANSEN, L.J., HELLMANN, J.J., LAWLER, J.J., NELSON, E.J. y PAIRIS, A. (2013): "Preparing for and managing change: Climate adaptation for biodiversity and ecosystems". *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 11, p. 502-510.
- SUMNER, G. G., ROMERO, R., HOMAR, V., RAMIS, C., ALONSO, S., y ZORITA, E. (2003): "An estimate of the effects of climate change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late twenty first century". *Climate Dynamics*, vol. 20, p. 789-805.
- TEJEDOR, E., SAZ, M.A., ESPER, J., CUADRAT, J.M., DE LUIS, M. (2017): Summer drought reconstruction in northeastern Spain inferred from a tree ring latewood network since 1734. *Geophysical Research Letters*, vol. 44 (16), p. 8492-8500
- VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., ... ROSE, S. K. (2011): "The representative concentration pathways: An overview". *Climatic Change*, vol. 109, p. 5-31.
- VERSINI, P.A., POUGET, L., MCENNIS, S., CUSTODIO, E. y ESCALER, I. (2016): "Climate change impact on water resources availability: case study of the Llobregat River basin (Spain)". *Hydrological Sciences Journal*, vol. 61(14), p. 2496-2508.
- VIVRIOLI, D. y WEINGARTNER, R. (2008): *Water towers a global view on the hydrological importance of mountains*. En: Wiegandt E, editor. "Mountains: sources of water, sources of knowledge". Adv Global Change Res Dordrecht: Springer-Verlag. p. 15-20.
- XU, X., LIU, W., SCANLON, B. R., ZHANG, L. y PAN, M. (2013): "Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework". *Geophysical Research Letters*, vol. 40 (23), p. 6123-6129.
- YANG, Y., LIU, D.L., ANWAR, M.R., O'LEARY, G., MACADAM, I. y YANG, Y. (2016): "Water use efficiency and crop water balance of rainfed wheat in a semi-arid environment: sensitivity of future changes to projected climate changes and soil type". *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 123, p. 565-579.
- ZHANG, L., HICKEL, K., DAWES, W.R., CHIEW, F.H.S., WESTERN, A.W. y BRIGGS, P.R. (2004): "A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration". *Water Resources Research*, 40 (2).
- ZIMMER, A. (2010): "New water uses in the Segura basin: Conflicts around gated communities in Murcia". *Water International*, vol. 35, p. 34-48.