

Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España)

Greening-up effects on streamflow and evapotranspiration in Mediterranean catchments.
An example of Taibilla catchment (SE Spain)

**Pedro Pérez Cutillas ^{a,c*}, Maria Francesca Cataldo ^b, Demetrio Antonio Zema ^b,
Joris de Vente ^{c,d}, Carolina Boix-Fayos ^{c,e}**

*Autor de correspondencia: ^a Universidad de Murcia, Departamento de Geografía,
Campus Universitario de Espinardo, Espinardo, Murcia, CP.30100, perezcutillas@cebas.csic.es

^b Università degli Studi Mediterranea de Reggio Calabria, Departamento de Agraria, Italia.

^c Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CEBAS-CSIC),
Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Grupo de Conservación de Suelos y Agua, España.

^d FutureWater, Costerweg 1V, Wageningen, The Netherlands.

^e University of Twente, Faculty of Geo-information Science and Earth Observation (ITC),
Urban and Regional Planning and Geo-Information Management (IPGM), The Netherlands.

SUMMARY

Important land cover changes were documented in several areas of the Mediterranean basin with associated hydrological effects. This paper aims at contributing to the characterization of land use changes and vegetation cover in a basin representative of the Mediterranean mountain range, and quantifying the impact of those changes on lateral and vertical flows (discharge and evapotranspiration, respectively). For this purpose, a series of precipitation data and some components of the hydrological cycle were analyzed: streamflow-runoff in two periods (1933-1948 and 1996-2012). In addition, a spatial analysis of land use changes was carried out; this information was used for the spatial analysis of the curve number and evapotranspiration. Main results indicated that precipitation had not changed significantly between both periods, while streamflow declined by a 43 %, together with the loss of 63 % of agricultural areas that were replaced by shrubland and forest. Evapotranspiration increased in 57 % of the drainage area, with an average increase of 20 mm year⁻¹. In general, the partition of rainfall was readjusted due to the recovery and changes of the natural vegetation cover, facilitating a redistribution of water within the hydrological cycle. As a result, the observed increase of vertical fluxes and the decrease of horizontal ones could potentially affect the hydrological resources of the area.

Key words: Greening-up, land use, streamflow, runoff coefficient, hydrology, horizontal fluxes, vertical fluxes.

RESUMEN

En distintas partes del Mediterráneo se están documentando en las últimas décadas cambios en el patrón de coberturas del suelo, muy frecuentemente hacia un aumento de la cobertura vegetal, con consecuencias hidrológicas asociadas a los mismos. En este trabajo se exploraron los cambios de uso del suelo y precipitación en una cuenca representativa de la media montaña mediterránea, y se examinó el impacto de los mismos en algunos flujos laterales y verticales del ciclo hidrológico (caudal y evapotranspiración, respectivamente). Para ello, se analizaron series de datos de precipitación y varias componentes del balance hidrológico: caudal-escorrentia superficial en dos periodos (1933-1948 y 1996-2012). Además, se analizaron espacialmente los cambios en los usos del suelo entre ambos periodos, información que se utilizó como base para el análisis espacial del número de curva y la evapotranspiración. Los principales resultados mostraron que la precipitación entre ambos periodos no presentaba cambios significativos, mientras que el caudal observado descendió un 43 %. Entre ambos periodos se perdió el 63 % de la superficie agrícola, sustituida por distintas superficies forestales. Todo ello dio lugar a un aumento de la evapotranspiración potencial (57 %) de la cuenca, con un incremento medio de 20 mm año⁻¹. En general, el sistema de partición de la precipitación se ha reajustado debido a la recuperación de la cobertura de vegetación natural de la cuenca, ocasionando una redistribución del agua dentro ciclo hidrológico, aumentando la evapotranspiración y disminuyendo el caudal en superficie, pudiendo llegar a afectar los recursos hídricos de la zona.

Palabras clave: recuperación vegetal, usos del suelo, caudal, evapotranspiración, escorrentia, hidrología, flujos verticales y flujos horizontales.

INTRODUCCIÓN

En el Mediterráneo Norte se ha observado un aumento de la cubierta vegetal en las zonas montañosas durante las últimas décadas debido a la combinación de varios factores (García-Ruiz *et al.* 2011), destacando el éxodo rural y la disminución de las actividades agrícolas que provocaron la revegetación natural de laderas. Además, la aplicación de diversos planes de reforestación y corrección hidrológica desde mediados del s. XX ayudaron a la recuperación de la cubierta forestal. Estas transformaciones en los usos del suelo han sido ampliamente descritas en la Península Ibérica, con incrementos de la cobertura forestal entre el 17 y el 200 % en distintas regiones de España (Nainggolan *et al.* 2012, Gallart y Llorens 2004, Boix-Fayos *et al.* 2007a, Boix-Fayos *et al.* 2008, Morán-Tejeda *et al.* 2010, Arnaez *et al.* 2011, Quiñero-Rubio *et al.* 2016). Esta recuperación de la cubierta vegetal se manifiesta también en muchas cuencas europeas (Beck *et al.* 2009) y a nivel mundial en un “reverdecimiento” de la Tierra en las tres últimas décadas, documentado recientemente a través de imágenes del satélite NOAA-AVHRR (Zeng *et al.* 2016).

La cobertura vegetal del suelo constituye el límite entre atmósfera y litosfera, donde las actividades humanas y los procesos hidrológicos están modulados por los cambios de uso del suelo y la cobertura de vegetación (Ren *et al.* 2014). La respuesta hidrológica que se produce ante el incremento de la misma en cuencas hidrológicas es compleja. Una respuesta generalizada es la disminución de la escorrentía superficial por el aumento de la capacidad de infiltración de los suelos, unido al efecto de partición que produce la vegetación sobre la evaporación, interceptación y redistribución de la precipitación (García-Ruiz *et al.* 2011, Linhoss y Siegert 2016). Estos procesos a menudo provocan en las cuencas hidrológicas una disminución de los caudales (Bosch 1982, Gallart y Llorens 2004, Buendía *et al.* 2016), en el que también juegan un papel muy importante los posibles cambios en el volumen y patrón de la precipitación, el aumento de la temperatura y el retroceso de la cubierta de nieve en zonas de montaña (Morán-Tejeda *et al.* 2010, 2014, García-Ruiz *et al.* 2011).

Además de alteraciones en los caudales, los cambios de cobertura vegetal en las cuencas provocan modificaciones en otras componentes del balance hidrológico como la evapotranspiración (Farley *et al.* 2005, Molina *et al.* 2015), o como algunos autores han descrito, en la transferencia de una componente hidrológica a otra (de agua azul (caudal) a agua verde (evapotranspiración o humedad de suelo)) (Ren *et al.* 2014). Es importante analizar si los cambios de la cobertura vegetal son debidos a reforestaciones de especies diferentes al bosque natural, o forestaciones en zonas anteriormente agrícolas, todo ello puede influir en el aumento de los valores de evapotranspiración a niveles altos causando un notable descenso en la disponibilidad de agua superficial de la cuenca (Farley *et al.* 2005, Noiset *et al.* 2005). También se han descrito diferencias en

los valores de evapotranspiración entre distintas especies arbóreas, aunque más bien están basados en la disponibilidad de agua en el suelo durante el período seco, que por la capacidad potencial de consumo de cada una de ellas (Huber *et al.* 2010).

Este trabajo se desarrolla en una subcuenca de la cuenca alta del río Segura (España), en una región de clima semiárido y escasos recursos hídricos. La subcuenca de estudio en concreto, cuenca del Alto Taibilla, es proveedora de importantes servicios ecosistémicos, abasteciendo de agua potable a una población de cerca de 2,4 millones de personas a través del embalse de Taibilla. Previamente se describieron importantes cambios de uso del suelo en la zona y cambios en la dinámica sedimentaria de los cauces fluviales (Boix-Fayos *et al.* 2007b, 2008); sin embargo, hasta el momento no se han explorado en profundidad las tendencias hidrológicas en las últimas décadas en la cuenca. Partiendo de estos resultados previos que indican un descenso de la dinámica sedimentaria fluvial en la cuenca, la hipótesis de trabajo apunta que los cambios de uso del suelo, acontecidos en el área de drenaje, tienen un impacto importante en la redistribución de los flujos laterales y verticales dentro del ciclo hidrológico de la cuenca. El objetivo del trabajo consiste en explorar los cambios de uso de suelo y los cambios de precipitación durante varias décadas en la cuenca de estudio, y analizar su impacto en dos componentes del ciclo hidrológico pertenecientes a los flujos hídricos laterales (escorrentía superficial) y verticales (evapotranspiración), respectivamente.

MÉTODOS

Área de estudio. El río Taibilla, que discurre por el municipio de Nerpio y entre los límites de Yeste y Letur (Albacete), se encuentra localizado en la cuenca alta del río Segura, al SE de España. El embalse del Taibilla, planificado para el aprovechamiento de las aguas de esta cuenca, dividió el cauce en dos partes. El estudio se ha llevado a cabo en la cuenca del Alto Taibilla (aguas arriba del embalse) (figura 1), compuesta por las subcuencas de Rogativa, Arroyo Blanco, Arroyo Tercero y Alto Taibilla. Se localiza en el límite entre las regiones de Murcia y Albacete (ETRS89 - UTM Huso 30 coordenadas X: 565029 Y: 4226930), perteneciente a la zona Subbética de las Cordilleras Béticas (figura 1).

La cuenca drena las sierras de Huebras, Cabras, Talón, Taibilla, y Moratalla (de oeste a este) localizadas en el área de Revolvedores, nace a 1.440 m s.n.m. y fluye a lo largo de 44,4 km hasta el embalse del Taibilla. Esta cuenca posee un área de drenaje de 320 km² (cuadro 1) con una litología formada principalmente por roca caliza en las elevaciones más altas y margas en los valles, formados por materiales originarios del Cretáceo, Oligoceno y Mioceno. Desde el punto de vista litológico los tipos de suelos predominantes son los Cambisoles Calcáricos y Regosoles Calcáricos. Climáticamente presenta una precipitación media anual de 530 mm, y temperaturas medias de 13 °C,

clasificándose entre los climas subhúmedo y semiárido (Quiñonero-Rubio *et al.* 2016).

Desde mediados del siglo pasado, la población de esta zona experimentó un drástico retroceso, lo que provocó una transformación de la estructura del paisaje debido a los cambios en las actividades económicas y abandono de las labores agrícolas. Los principales cambios de uso del suelo identificados en las subcuencas de la Rogativa, Arroyo Blanco y Arroyo Tercero muestran un abandono progresivo de la agricultura de secano y un aumento de

la cubierta forestal debido a procesos naturales de regeneración vegetal, así como antrópicos por reforestaciones ejecutadas en la década de los 70 (siglo XX). De igual forma, los cambios de usos observados en la parte del Alto Taibilla muestran una tendencia similar, aunque de forma más atenuada que en el resto de subcuencas (Boix-Fayos *et al.* 2008, Quiñonero-Rubio *et al.* 2016).

La cuenca se vio sometida a importantes actuaciones de restauración hidrológico-forestal, con la construcción de 178 diques desde el año 1973 en adelante, la mayoría

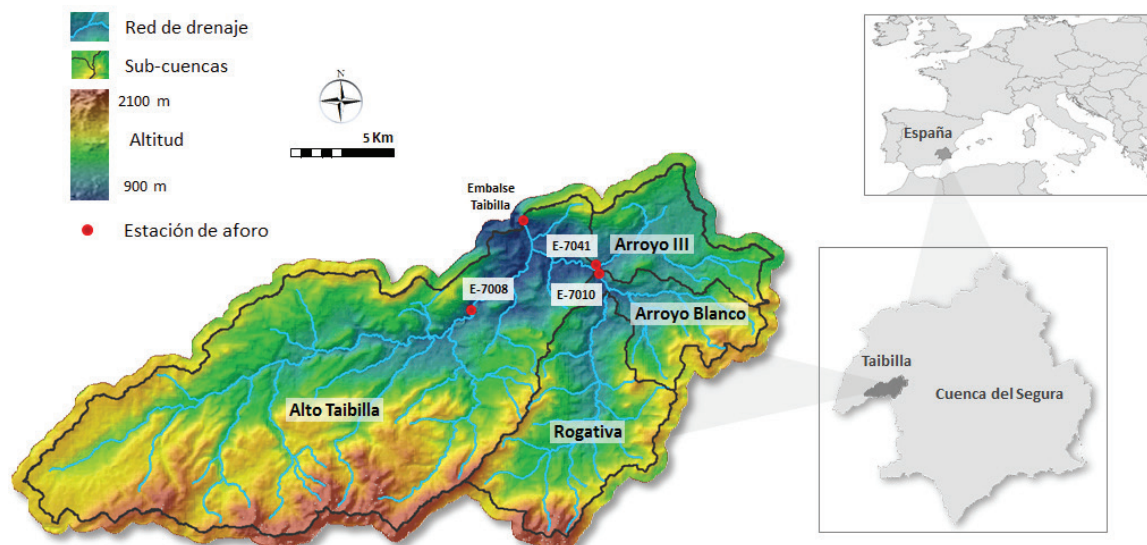


Figura 1. Localización de las subcuencas Alto Taibilla, Rogativa, Arroyo Blanco y Arroyo Tercero. Puntos en rojo, estaciones de aforo.
Location of the Alto Taibilla, Rogativa, Arroyo Blanco and Arroyo Tercero subbasins. Points in red, gauging stations.

Cuadro 1. Principales características de la cuenca hidrográfica del Taibilla.
Characteristics of the Taibilla river basin.

Características	Subcuencas			
	Alto Taibilla	Arroyo Tercero	Arroyo Blanco	Rogativa
Morfometría				
Área (km ²)	320	61,1	76,9	53,5
Altitud máxima (m s.n.m.)	2.080	1.688	1.805	1.837
Altitud media (m s.n.m.)	1.440	1.196	1.438	1.464
Pendiente media (%)	23,6	19,1	24,7	24,4
Longitud cauce principal (km)	44,4	13,54	21,6	15,9
Pendiente media cauce principal (%)	11,6	6,55	3,25	4,67
Longitud red hidrográfica (km)	211	69,88	68,3	49,7
Orden Strahler	V	IV	IV	III
Densidad de drenaje (km ⁻¹)	0,66	1,14	0,89	0,93
Número de diques	120	-	-	58

(87 %) son presas de gavión, junto a otras estructuras cerradas de hormigón. Obras que sirvieron como elementos de corrección de los desequilibrios hidrológicos sufridos en cabecera, con la finalidad de laminar avenidas y realizar una mayor protección del suelo contra la erosión. Para una gestión más eficaz en apoyo a la construcción de las presas, se llevó a cabo de manera simultánea una reforestación en las áreas de drenaje a través de programas coordinados por el Ministerio de Ambiente y las Autoridades de Gestión de Cuenca del río Segura (cuadro 1).

Análisis de las precipitaciones, componentes del balance hidrológico y análisis de escenarios. El trabajo se ha desarrollado en dos fases, por un lado se han analizado las precipitaciones utilizando una serie histórica hasta la actualidad, y varias componentes del balance hidrológico: caudal-escorrentía superficial. Para la precipitación y el caudal se ha reconstruido a partir de distintas fuentes y datos fragmentados en el tiempo y el espacio una base de datos que pudiera representar una evolución histórica.

En una segunda fase, se realizó un análisis espacial a través de la elaboración de escenarios de uso del suelo pertenecientes a los periodos de 1956 y 2012. Esta información de los usos del suelo se ha utilizado como base para el cálculo del número de curva y la evapotranspiración.

A continuación se detallan estos procedimientos.

Precipitación y escorrentía superficial. Los datos de precipitación diaria utilizados en este estudio han sido proporcionados por la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) combinando la estación de Rogativa (1933-2004) y las estaciones de Caravaca- Barranda, Moratalla-Inazares (2005-2012). Los datos de caudal se encuentran muy fragmentados en algunas series dispersas (MAGRAMA, Anuario de Aforos) por un lado las series históricas, para el periodo 1933-1948, de las antiguas estaciones de aforo de Rogativa (estación código 7010) que suma los caudales de Rogativa y Arroyo Blanco; Arroyo Tercero (estación código 7041); y Nerpio (estación El Tovarico, código 7008) que recoge el caudal del Alto Taibilla (subcuenca), las cuales drenan al Embalse de Taibilla (figura 1). Para estimar el caudal de todo el Alto Taibilla, se agregaron los caudales anuales de las estaciones 7010, 7041 y 7008 para cada año entre 1933-1948. La base de datos histórica se completó con los caudales mensuales de entrada al embalse de los años 1996-2012 en la estación de aforo del Embalse de Taibilla (código 7017) representativa también del caudal del Alto Taibilla en este segundo periodo (base de datos del MAGRAMA, Anuario de Aforos).

Análisis de los datos de la transformación lluvia-escorrentía. Para las dos series utilizadas (actuales e históricas), los datos se han agregado a escala anual, calculándose las tendencias centrales y dispersión para precipitación y caudales. En el análisis hidrológico de la cuenca del Alto Taibilla a escala general, se ha llevado a cabo el cálculo de

los coeficientes de escorrentía estacional y anual; es decir, la relación entre la escorrentía superficial en la salida de la cuenca y la precipitación total en relación con un determinado intervalo de tiempo (Δt).

Análisis de los cambios del uso del suelo. Los cálculos distribuidos que se realizaron en la segunda fase del trabajo fueron elaborados mediante el sistema de información geográfica arcGIS v.10.1, que permitió la integración y cálculo de las bases de datos espaciales seleccionadas. Para la cartografía de los usos del suelo se elaboraron dos coberturas de los mismos periodos en los que están basados los cálculos de precipitación y escorrentía. La información obtenida para los usos del suelo en el primer periodo, se elaboró mediante fotointerpretación de las ortoimágenes del vuelo americano de 1956, apoyada por la digitalización de estudios previos (Quiñonero-Rubio *et al.* 2016). La cobertura del año 2012 se basó en la mejora a escala de detalle, también mediante fotointerpretación, a partir de la información extraída de la base de datos del CORINE Land Cover de la Agencia Europea de Medio Ambiente, y su actualización se confeccionó mediante el uso del vuelo ortofotogramétrico del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea para el año 2012, proporcionadas por los servicios WMS del Instituto Geográfico Nacional. Se establecieron siete clases: agrícola regadío, agrícola secano, bosque abierto, bosque denso, matorral, pasto y lámina de agua (embalse). La clase 'Agricultura secano' hace referencia en mayor medida a los cultivos arbóreos de secano, debido a que es la tipología que más superficie ocupa, y que tienen una mayor representación en el área de estudio. Los criterios para diferenciar entre las coberturas de bosque abierto y denso se determinaron mediante la cuantificación de la densidad de copa forestal, fijándose como bosque denso a las cubiertas vegetales con una ocupación de más del 70 % de la superficie. Respecto a la clase 'pasto', se trata de pastizales xerofíticos mediterráneos, generalmente abiertos, dominados por gramíneas vivaces y anuales con una elevada diversidad de especies, y que tradicionalmente se han utilizado para el pastoreo de rebaños autóctonos.

Cálculo distribuido del Número de Curva (NC). El mapa de la respuesta hidrológica de las subcuencas estudiadas se ha elaborado en base al método empírico para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, desarrollado por el *Soil Conservation Service*. Se representa mediante un número adimensional, en curvas estandarizadas, que varían entre 0 y 100; donde un área con $NC = 0$ no produce escorrentía y otra con $NC = 100$ se interpreta como un suelo impermeable, donde toda la precipitación genera escorrentía. La estimación del NC necesita la caracterización hidrológica del suelo, relacionada con su capacidad de infiltración. Para ello, se ha utilizado un modelo SIG aplicando el método de Frevert *et al.* (1955) con el cálculo del coeficiente de escorrentía que está en función de la textura del suelo, el uso del suelo y las características del

drenaje de la cuenca establecidos por la pendiente. Para la obtención del NC se utilizaron las coberturas de usos para los periodos 1956 y 2012 elaboradas en este trabajo, los datos del modelo digital del terreno (MDT) proporcionado por el satélite ASTER con una resolución espacial de reajustada a 25 m, y por último, se empleó la cobertura de las características texturales del suelo. Ya que solo estaba disponible un mapa de texturas para parte de la cuenca, se estimó las texturas para toda la cuenca a partir de un cruce entre los datos litológicos del Mapa Geológico del Instituto Geológico y Minero de España, y los datos empíricos de textura obtenidos en el Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo (LUCDEME) del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España., que permitió asociar las clases litológicas con las texturales.

Estimación de la evapotranspiración. Para realizar un análisis más completo de los flujos de aguas superficiales, se han estimado los volúmenes de pérdida de agua por evapotranspiración, y su efecto a través de las distintas coberturas por el cambio de usos del suelo en el último siglo. Los datos fueron obtenidos de las series climatológicas del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola *et al.* 2005) a través de capas de información geográfica. El cálculo distribuido espacialmente se realizó mediante la fórmula de evapotranspiración de referencia (ET_0) de Hargreaves [1] (Hargreaves y Samani 1985), utilizando la formulación simplificada:

$$ET_0 = 0,0023 * (T_{med} + 17,78) * R_0 * (T_{max} - T_{min})^{0,5} [1]$$

Donde,

ET_0 = evapotranspiración de referencia diaria, mm día⁻¹

T_{med} = temperatura media diaria, °C

R_0 = Radiación solar extraterrestre, mm día⁻¹

T_{max} = temperatura diaria máxima, °C

T_{min} = temperatura diaria mínima, °C

En el cálculo de la R_0 se ha utilizado la cobertura de radiación solar incidente (R_a) (Ninyerola *et al.* 2005) con los valores presentados en MJulios m⁻² día⁻¹, transformados a valores de agua evaporada (mm día⁻¹), mediante la siguiente fórmula: $R_a * 238,85 / (597,3 - 0,57 T)$, donde T es la temperatura media del período elegido. Como paso final, se han obtenido los valores de la evapotranspiración potencial ajustando los cálculos de la ET_0 con los coeficientes que tiene en cuenta distintos tipos de vegetación (K_c), elaborados a partir de una amplia base de datos de campo a nivel global incluyendo especies no agrícolas (Liu *et al.* 2017). Para la aplicación de estos coeficientes se han utilizado las cartografías de los usos del suelo para el año 1956, y para el año 2012, generándose así respectivamente dos mapas de evapotranspiración potencial. Es importante apuntar que la evapotranspiración actual dependerá de características físicas y la humedad del suelo, y solo se

podrá estimar aplicando un modelo hidrológico dinámico. Para los objetivos de este estudio no se consideró necesario centrarse en la evaluación de impactos relativos de los cambios de cubierta de vegetación.

RESULTADOS

Análisis de los resultados de la precipitación y escorrentía. El análisis de los datos de precipitación llevados a cabo para el periodo de 1933 a 1948 mostró valores medios anuales de 578 ± 283 mm frente a 497 ± 107 mm correspondientes al periodo 1996-2012, expresando un ligero descenso entre periodos, aunque la diferencia entre ambos no fue estadísticamente significativa según Mann-Whitney ($P < 0,05$) (figura 2).

Respecto a la respuesta de la escorrentía en la cuenca del Alto Taibilla en los dos periodos se observó una reducción significativa en los valores obtenidos (figura 2), sin constancia de un aumento de las extracciones de agua superficial en el segundo periodo de estudio. La mayor amplitud de los datos en la serie 1933-1948, mostró alta dispersión interanual de la escorrentía, con un valor medio de $69,16 \pm 32,06$ mm, que se diferenció significativamente de los $36,56 \pm 10,62$ mm de media del periodo posterior 1996-2012.

Se relacionó la entrada de lluvia con la capacidad de los suelos de producir escorrentía en los periodos estudiados utilizando como indicador el coeficiente de escorrentía, encontrando de nuevo una diferencia significativa en el mismo. En los dos periodos de observación de las series anuales se apreció un descenso significativo del coeficiente de escorrentía del periodo 1996-2012 ($0,08 \pm 0,02$) con respecto al periodo 1933-1948 ($0,14 \pm 0,08$).

Distribución espacial de la respuesta hidrológica en la cuenca. Los análisis espaciales se realizaron a través de los siguientes pasos:

- Evolución de los usos del suelo. La dinámica de cambio en los usos del suelo durante las últimas décadas, debido principalmente al abandono de tierras y a las intervenciones estatales de reforestación y corrección hidrológica, produjeron una modificación sustancial de las coberturas del suelo en gran parte de la cuenca (cuadro 2). De modo general, en el último medio siglo se observó una pérdida de superficie agrícola en torno al 63 %, que pasó de ocupar un tercio de la superficie total en el año 1956 a solo un 11,68 % en la actualidad. En general, este uso fue ocupado por distintas coberturas forestales, que aumentaron de manera considerable, con un incremento durante el periodo de estudio de más del 12 % en el caso del bosque abierto; y de un 265 % en el bosque denso, lo que las situó como las coberturas del suelo mayoritarias en el 2012 con un 29,3 y 38,7 %, respectivamente, del total de la superficie de estudio.

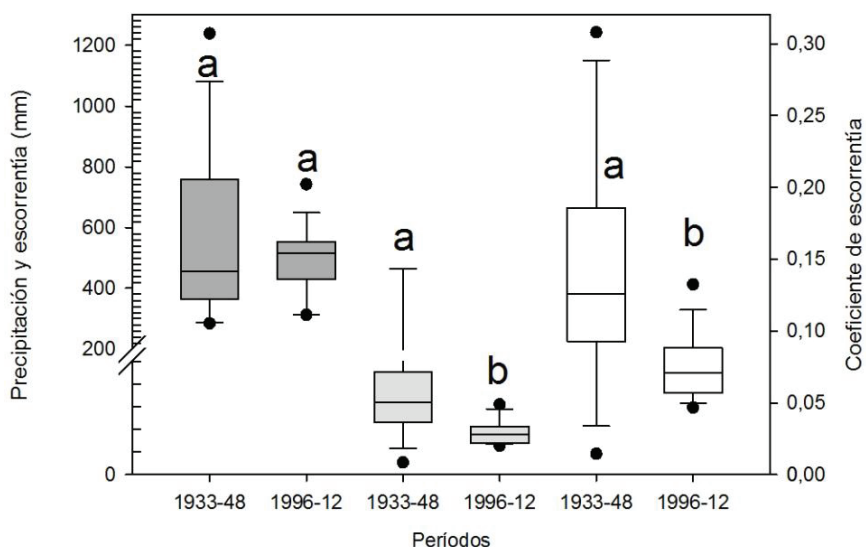


Figura 2. Datos intermedios en valores de la mediana. Medianas, percentiles (10, 25, 75 y 90) y error de: precipitación (cajas gris oscuro), escurrentía (cajas gris claro) y coeficiente de escurrentía anual (cajas blancas) entre los dos períodos de observación 1932-1948 y 1996-2012 en la cuenca del Alto Taibilla. Letras iguales expresan diferencias no estadísticamente significativas, letras diferentes muestran diferencias estadísticamente significativas según Mann-Whitney ($P < 0,05$).

Median, percentiles (10, 25, 75 and 90) and error of precipitation (dark gray boxes), runoff (light gray boxes) and annual runoff coefficient (white boxes) between the two observation periods 1932-1948 and 1996-2012 in the Taibilla basin. The same letters indicate no statistically significant differences, different letters indicate statistically significant differences according to Mann-Whitney ($P < 0.05$), showing the intermediate data in median values.

Cuadro 2. Superficie de ocupación de los usos del suelo en la cuenca del Taibilla para los años 1956 y 2012.

Land uses area on the Taibilla basin in 1956 and 2012.

Usos del suelo	Superficie 1956 (ha)	Superficie 1956 (%)	Superficie 2012 (ha)	Superficie 2012 (%)	Superficie de cambio (%)
Agrícola regadío	0	0	84	0,3	-
Agrícola seco	10.024	31,6	3.691	11,7	-63,2
Bosque abierto	8.235	26,0	9.263	29,3	12,5
Bosque denso	3.352	10,6	12.234	38,7	264,9
Matorral	9.032	28,5	5.412	17,1	-40,1
Pasto	971	3,1	869	2,8	-10,5
Embalse	0	0	60	0,2	-
Total	31.614	100	31.614	100	

Más interesante resulta conocer cómo se distribuyeron estos cambios de forma espacial. Este enfoque más detallado presenta los porcentajes de cambio de cada uno de los usos del suelo del año 1956 a las diversas categorías en las que se han transformado en el 2012 (figura 3). De manera pormenorizada se observó que las superficies agrícolas tradicionales se transformaron de manera muy heterogénea. Más del 60 % de esta superficie sufrió cambios importantes, mostrando dos tendencias claras: una recuperación natural de estas tierras de cultivo abandonadas, transformadas en pasto y sobretodo en áreas de matorral, mien-

tras que los procesos de restauración forestal, supusieron un aumento de la cobertura de bosque que se incrementó más de un 46 % a costa de este uso agrícola. El abandono de las tierras de cultivo favoreció la aparición de pastos, con un incremento de más de un 7 %. Algo similar sucede con las coberturas de matorral y pasto, que también experimentaron un importante cambio. La pérdida de matorral se dio principalmente a favor de las coberturas forestales que en total suman más del 60 % de superficie transformada. Por su parte, el pasto fue reemplazado de manera importante por el matorral (41 %), seguido por las cubier-

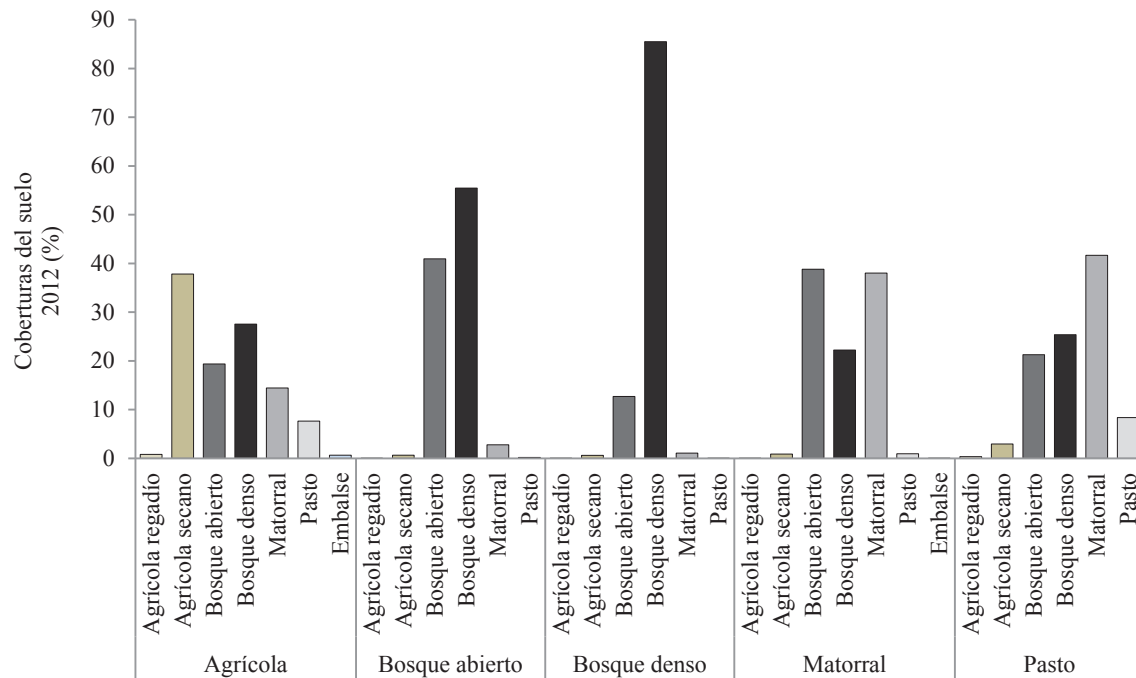


Figura 3. Cambio intra-clase de los usos del suelo del año 1956 en 2012.

Intra-class change in land use for 1956 in 2012.

tas forestales con un 21 % y 25 % para las categorías de bosque abierto y denso, respectivamente. También se observó otra modificación asociada a una leve recuperación de pequeñas superficies agrícolas en detrimento de esta cobertura de pastos. En cambio, las coberturas boscosas son las que más se mantuvieron a lo largo del período de estudio, presentándose como las superficies más estables. En el caso del bosque denso, solo se modificó en un 15 %, evolucionando a una cobertura de bosque menos cerrada. Por su parte, el bosque abierto se transformó en más de un 55 % de su superficie a bosque denso.

Análisis de los resultados del cálculo del número de curva. El cálculo del NC basado en los mapas de uso de suelo para 1956 y 2012, sintetizan la respuesta hidrológica de la cuenca en dos momentos cercanos y representativos de los períodos de los que se disponen de datos hidrológicos (1932-1949 y 1996-2012). Se observó un cambio en la evolución histórica del CN en el área de estudio, con una disminución general de los valores más elevados de CN (figura 4). En general, la superficie de la cuenca se vio modificada por la aparición de una cubierta vegetal natural con la recuperación de áreas forestales durante los años 1956 y 2012 (cuadro 2), con lo cual se observó una tendencia generalizada, y especialmente en las cabeceras de las cuencas, a la disminución del número de curva. Solo en la parte baja de la cuenca se mantuvieron, e incluso incrementaron los valores de escorrentía por la prevalencia de zonas agrícolas en suelos arcillosos, mostrando valores

de NC superiores a 90. En general, un 46 % de la cuenca experimentó una disminución del NC; mientras que en un 38 % no se produjeron cambios a lo largo de todo el período de estudio; siendo solo el 16 % de la superficie la que mostró un incremento en los valores del NC, o lo que es lo mismo, un aumento de la producción de escorrentía.

Análisis de los resultados del cálculo de la evapotranspiración. Los análisis realizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia mostraron unos valores similares en los dos períodos estudiados. Las diferencias se hicieron visibles con la aplicación del coeficiente de cultivo (K_c) que corrige los valores de evaporación de las cubiertas vegetales que proporcionan las capas de los usos del suelo en las fechas examinadas. Los mayores cambios se originaron por la importante reducción del uso agrícola, que fue en gran parte reemplazado por coberturas forestales (figura 3), que presentan un mayor coeficiente de la evapotranspiración (K_c). Los datos obtenidos mostraron un aumento generalizado de la evapotranspiración en el período de 2012 respecto al de 1956, con valores medios para toda la cuenca de 360 y 340 mm, respectivamente. Estos datos equivalen a un aumento de la evapotranspiración potencial de media de 20 mm año⁻¹, correspondientes casi exclusivamente a los procesos de transpiración vegetal. Como muestra la figura 5, los cambios en la evapotranspiración no se produjeron de manera homogénea a lo largo de toda la cuenca. Esto se debió principalmente a dos factores, en primer lugar, a la transformación de coberturas

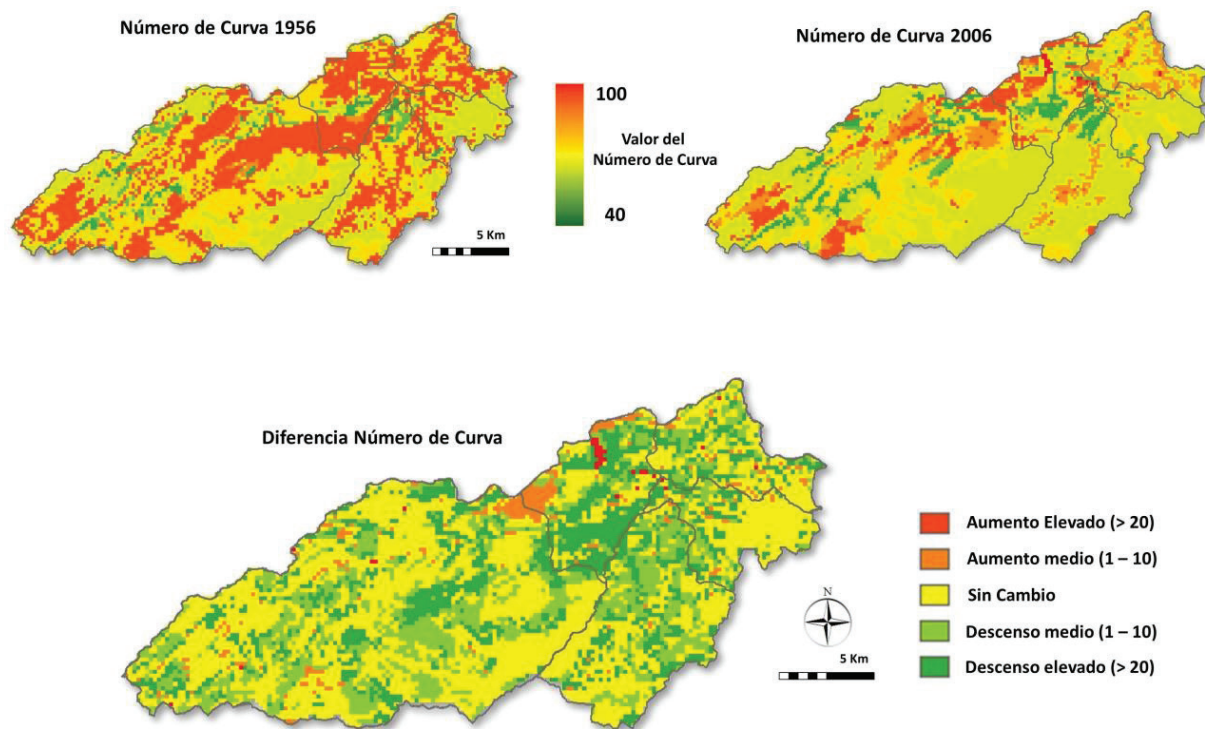


Figura 4. Cálculos del número de curva para los años 1956 y 2006. Y su comparación en las sub-cuencas del río Taibilla.
Estimates of curve number in 1956 and 2006 and comparison of the sub-basins of the Taibilla River.

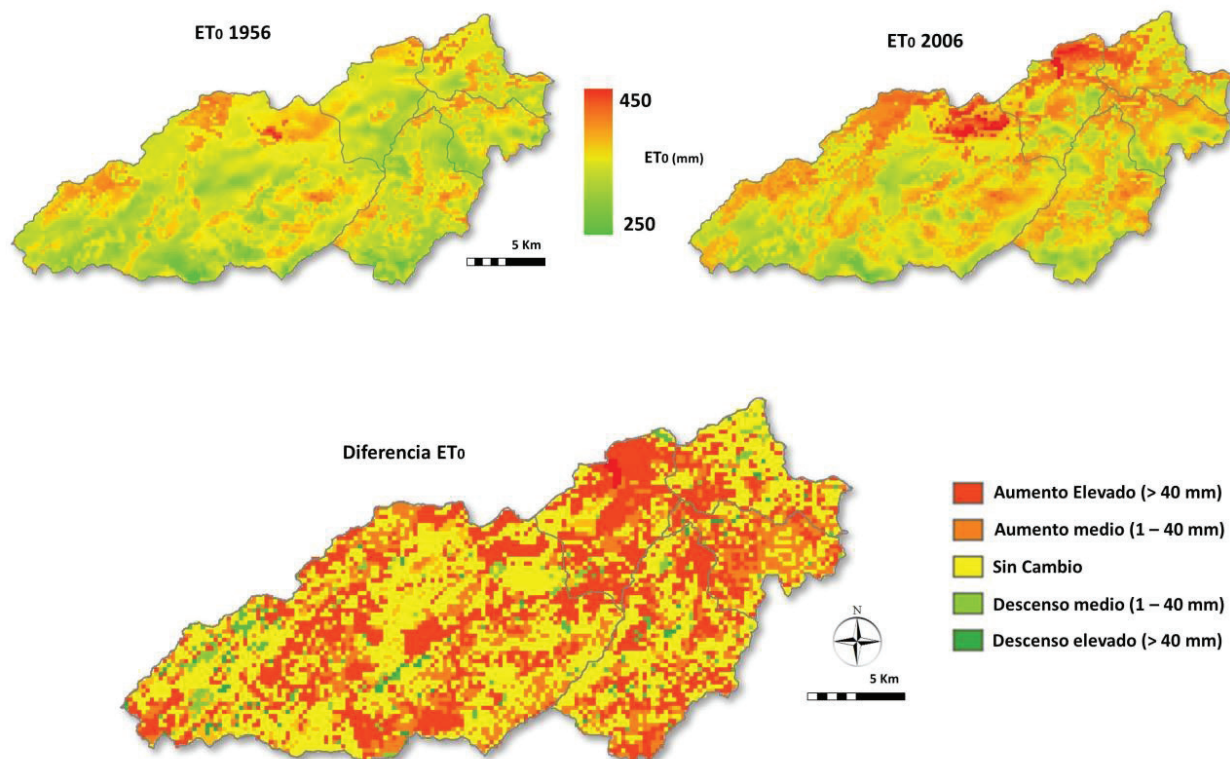


Figura 5. Cálculos de la evapotranspiración de referencia para los años 1956 y 2006. Y su comparación en las sub-cuencas del río Taibilla.
Estimates of reference evapotranspiration in 1956 and 2006 and comparison of the sub-basins of the Taibilla River.

forestales, en las que aumentaron de manera considerable los valores de transpiración de estas superficies, pudiendo superar en algunas situaciones los 80 mm año⁻¹. En segundo lugar, por el cambio de 2/3 partes de la superficie de pastos a matorral, incrementado de igual modo los procesos de transpiración vegetal. En el caso opuesto, aunque con una menor intensidad, se observaron otras áreas que experimentaron una pérdida de la superficie boscosa hacia otras con menor densidad vegetal, y con ello disminuyeron sus valores de evapotranspiración potencial. En conjunto se observó un aumento de los valores de evapotranspiración potencial en el 57 % de la superficie total de la cuenca respecto al periodo anterior. En el lado opuesto, se muestra tan solo un 4 % de la superficie en la que disminuyó la evapotranspiración potencial, mientras que el 39 % no experimentó cambios sustanciales.

DISCUSIÓN

Durante las últimas décadas se ha observado una tendencia general al aumento de la cubierta vegetal en las montañas de la cuenca norte mediterránea, provocando alteraciones en el ciclo del agua (Farley *et al.* 2005, Molina *et al.* 2015). Los cambios de uso del suelo acontecidos en la cuenca del Alto Taibilla muestran la misma tendencia de recuperación de la cubierta vegetal. El abandono de tierras de cultivo y la aplicación de programas públicos para la reducción de los procesos de erosión, mediante la reforestación de amplias superficies de montaña ocasionaron un aumento de la cobertura forestal, donde más de un 60 % de antiguas tierras agrícolas se transformaron en coberturas forestales de distinto tipo y densidad. Este proceso de recuperación de la vegetación, al disminuir las actividades agrícolas en zonas de cabecera de las cuencas de drenaje, fue generalizado en muchos países de la cuenca norte mediterránea. Ocurrió primero en Francia e Italia y más tarde en España, Portugal y Grecia, como resultado del masivo abandono de tierras de cultivo (Lasanta-Martínez *et al.* 2005, Beguería *et al.* 2006, García Ruiz *et al.* 2011). La tendencia contraria aparece en las economías menos avanzadas del sur de la cuenca mediterránea (García Ruiz *et al.* 2011), donde el proceso de migración a zonas urbanas se inició más tarde y mantuvo una mayor presión antrópica en las áreas rurales, debido al uso habitual de los recursos naturales para pastos y el uso de las zonas forestales como fuentes de energía en las funciones domésticas, provocando graves procesos de deforestación (Shalaby y Tateishi 2007).

Los cambios en la cobertura vegetal tienen un gran impacto sobre el ciclo hidrológico a escala de cuenca de drenaje (García-Ruiz *et al.* 2011). El aumento de la masa forestal puede generar una importante reducción de la escorrentía (López-Moreno *et al.* 2008, Morán-Tejeda *et al.* 2010), vinculada a la mejora de la estructura de los suelos y aumento de su capacidad de infiltración y retención de agua, junto al efecto de partición que introduce la vegetación a través de procesos como la evaporación, transpi-

ración, interceptación y precipitación (García-Ruiz *et al.* 2011, Linhoss y Siegert 2016).

En la cuenca de estudio no hubo cambios significativos en la precipitación entre los periodos estudiados (1933-48 y 1996-2012), pero sí en el uso de suelo y en el caudal observado (descenso de un 43 % de caudal entre ambos periodos). Aunque observamos un pequeño descenso en la precipitación anual, esta ligera tendencia al descenso en la precipitación no fue significativo y coincide con la tendencia general en España, dentro de la enorme variabilidad apuntada por Vicente-Serrano *et al.* (2017). Asimismo, se estimaron disminuciones considerables en la capacidad general de la cuenca para producir escorrentía (disminución de los coeficientes de escorrentía y del número de curva entre 1956 y 2012 en un 45 % de la cuenca) acompañados por un aumento de la evapotranspiración (en el 57 % de la cuenca aumentó la evapotranspiración entre 1956 y 2012). El descenso medio del caudal anual entre los dos periodos es equiparable al descrito para el Ebro por Gallart y Llorens (2004) en 50 años, atribuido a una combinación del incremento de las extracciones para riego, cambios en el clima y expansión de la cobertura forestal; y ligeramente superior al descrito para otras subcuencas del Prepirineo (Beguería *et al.* 2006, Buendía *et al.* 2015).

Frecuentemente un cambio detectado en el flujo horizontal (descenso del caudal) lleva un cambio asociado en el flujo vertical, en el que además la interceptación juega un papel importante, dependiendo de la cobertura vegetal puede llegar a retener hasta el 40 % del volumen precipitado (Belmonte Serrato *et al.* 2013, Linhoss y Siegert 2016). El proceso de “reverdecimiento” generalizado de la superficie terrestre está provocando un cambio en la dinámica del balance hídrico, no solo en los flujos horizontales sino también en la evapotranspiración, como flujo vertical analizado. Sería muy relevante además de disponer de información de los cambios experimentados en los acuíferos de la zona, que requerirían por su complejidad un estudio aparte.

Valores descritos en estudios con transformaciones de áreas de pradera, pastizal o cultivos a bosque (Nosetto *et al.* 2005, Echeverría *et al.* 2007) proporcionaron incrementos de la evapotranspiración de más de 100 mm por año, que en algunos casos significaban el 3,5 % de la precipitación. Los datos obtenidos en el presente análisis mostraron un aumento de la evapotranspiración potencial equivalente al 4 % de la precipitación media anual, en el mismo rango que los estudios anteriores, determinando un incremento de la evapotranspiración potencial media en 20 mm anuales. En otros estudios, y a una escala más amplia, el aumento medio estimado de la evapotranspiración es más bajo, 11,4 mm año⁻¹ teniendo en cuenta los cambios de usos del suelo en las tres últimas décadas (Zeng *et al.* 2016). Vicente-Serrano *et al.* (2017) apuntan en su revisión a nivel nacional español, aumentos de la evapotranspiración en 24 mm década⁻¹ en el último medio siglo; teniendo en cuenta descensos en la humedad relativa y aumentos de la temperatura.

Algunos autores indican que la transferencia del “agua azul” (agua en lagos, ríos y acuíferos) hacia “agua verde” (agua almacenada en suelos y/o vegetación) originada por los cambios de cobertura y uso del suelo, causaron un incremento de la evapotranspiración de hasta el 1 % en zonas semiáridas del Norte de China (Ren *et al.* 2014). Además se apunta que la tendencia global de incremento de la evapotranspiración es debida a la mayor transpiración de la vegetación y la evaporación de la precipitación interceptada por la vegetación, siendo ligeramente mayor en Europa que en el resto de continentes (Zhang *et al.* 2016). Las variaciones en esta componente del balance de agua se deben a cambios no solamente climáticos, sino también en las coberturas vegetales, sin embargo, las estimaciones son muy variables dependiendo de la metodología utilizada (Vicente-Serrano *et al.* 2017), factores locales y la escala de observación.

La cuenca en estudio encaja en el patrón de cambio de usos del suelo y vegetación observado para el Mediterráneo Norte (García-Ruiz *et al.* 2011), con cambios acontecidos en el caudal y en la evapotranspiración en proporciones bastante altas, similares a las estimaciones registradas en otras zonas. La importancia de la reducción de caudales en este tipo de ambientes semiáridos y subhúmedos, con grandes necesidades de agua para abastecimiento doméstico y agricultura, obliga a replantearse algunas cuestiones relacionadas con la gestión de los mismos. Por ejemplo, políticas de desbroces, enfoques locales sobre reforestaciones y manejo de la vegetación en general, para poder optimizar los cambios en la disponibilidad del agua, como resultado de la convergencia de cambios climáticos y en el paisaje de las últimas décadas.

CONCLUSIONES

En la cuenca hidrológica examinada se observa una reducción significativa del caudal, así como un descenso en la aptitud de la cuenca para producir escorrentía superficial. Este hecho se refleja espacialmente en la disminución general del número de curva y el descenso generalizado de los coeficientes de escorrentía, junto a un aumento de la evapotranspiración potencial a lo largo del período analizado. El mantenimiento del total anual de precipitación y el incremento de la evapotranspiración apuntan a una nueva partición de las entradas de precipitación causada por los cambios importantes de cobertura vegetal y uso del suelo, confirmando la hipótesis de partida. Los resultados obtenidos revelan cambios hacia una mayor cobertura vegetal en áreas de drenaje, como consecuencia de programas de reforestación y cambios en las coyunturas socioeconómicas, que pueden afectar en el plazo de varias décadas a la redistribución de agua dentro del ciclo hidrológico, induciendo un nuevo equilibrio en los recursos hídricos de la zona. Cabría ampliar el análisis a la evapotranspiración real estacional y a los recursos subterráneos para determinar si estos también se han visto alterados por los cambios en la cobertura vegetal. Este resultado es especialmente rele-

vante en cuencas hidrológicas clave para el abastecimiento de agua en regiones subhúmedas y semiáridas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) la provisión de datos de precipitación, y a la Mancomunidad de Canales del Taibilla (MCT) y a la Confederación Hidrográfica del Segura su interés en la investigación y el apoyo para continuar con la mejora de la serie histórica de datos de caudal. Agradecemos el apoyo económico del proyecto DISECO (CGL2014-55-405-R), SOGLO (BELSPO, Bélgica) y ADAPT (CGL2013-42009-R) del Plan Nacional de Ciencia y al proyecto CAMBIO (18933/JLI/13) de la Fundación Séneca de la Región de Murcia. Demetrio Zema realizó una estancia en el CEBAS con el apoyo también de la Fundación Séneca con el programa “Jiménez de la Espada”. El programa Erasmus sufragó parte de las estancias de Francesca Cataldo en España y Pedro Pérez Cutillas en Italia. Carolina Boix-Fayos tuvo apoyo económico de una beca de estancia en el extranjero Salvador de Madariaga del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno español.

REFERENCIAS

- Arnáez J, T Lasanta, MP Errea, L Ortigosa. 2011. Land abandonment, landscape evolution, and soil erosion in a Spanish Mediterranean mountain region: The case of Camero Viejo. *Land Degradation & Development* 22: 537-550. DOI: 10.1002/ldr.1032
- Beck H, G Salvini, J Schellekens, S. Bruijnzeel, R Jeu. 2009. Hydrological impacts of land cover change in the Dragonja catchment (Slovenia). In Neale CMU, A Maltese eds. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI. Proceeding of SPIE 7472. 7 p. DOI: 10.1117/12.830533
- Beguiría S, JI López-Moreno, A Gómez-Villar, V Rubio, N Lana-Renault, JM García-Ruiz. 2006. Fluvial adjustments to soil erosion and plant cover changes in the Central Spanish Pyrenees. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography* 88(3): 177-186. <http://www.jstor.org/stable/3878364>
- Belmonte Serrato F, A Romero Díaz, E Andrade Limas. 2013. Experiencias de interceptación de la lluvia por la vegetación en la Región de Murcia. In Instituto Euromediterráneo del Agua ed. Interceptación de la lluvia por la vegetación en España. p. 121-146.
- Boix-Fayos C, GG Barbera, F Lopez-Bermudez, VM Castillo. 2007a. Effects of check dams, reforestation and land use changes on river channel morphology: Case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology* 91: 103-123. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.02.003
- Boix-Fayos C, M Martínez-Mena, A Calvo-Cases, E Arnau-Rosalén, J Albaladejo, V Castillo. 2007b. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 85-101. DOI: 10.1002/esp.1382
- Boix-Fayos C, J de Vente, M Martínez-Mena, GG Barberá, V Castillo. 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrological Processes*

- 22(25): 4922-4935. DOI: 10.1002/hyp.7115
- Bosch JM, JD Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 1-23. DOI: 10.1016/0022-1694(82)90117-2
- Buendia C, G Bussi, J Tuset, D Vericat, S Sabater, A Palau, RJ Batalla. 2016. Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment* 540: 144-157. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.005
- Echeverría C, A Huber, F Taberlet. 2007. Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. *Bosque* 28(3): 271-280. DOI: 10.4067/S0717-92002007000300013
- Farley KA, EG Jobbágy, RB Jackson. 2005. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11: 1565-1576. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01011.x
- Frevert RK, GO Schwab, TW Edminster, KK Barnes. 1955. Soil and Water Conservation Engineering. New York, USA. Wiley. 479 p.
- Gallart F, P Llorens. 2004. Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth* 29: 769-773. DOI: 10.1016/j.pce.2004.05.004
- García-Ruiz JM, JI López-Moreno, SM Vicente-Serrano, T Lasanta-Martínez, S Beguería. 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews* 105: 121-139. DOI: 10.1016/j.earscirev.2011.01.006
- Hargreaves GH, ZA Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2): 96-99.
- Huber A, A Iroumé, C Mohr, C Frêne. 2010. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque* 31(3): 219-230. DOI: 10.4067/S0717-92002010000300006
- Lasanta-Martínez T, S Vicente-Serrano, JM Cuadrat-Prats. 2005. Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: A study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography* 25: 47-65. DOI: 10.1016/j.apgeog.2004.11.001
- López-Moreno JI, M Beniston, JM García-Ruiz. 2008. Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change* 61(3-4): 300-312. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.10.004
- Linhoss AC, CM Siegert. 2016. A comparison of five forest interception models using global sensitivity and uncertainty analysis. *Journal of Hydrology* 538: 109-116. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.04.011
- Liu C, G Sun, SG McNulty, A Noormets, Y Fang. 2017. Environmental controls on seasonal ecosystem evapotranspiration/potential evapotranspiration ratio as determined by the global eddy flux measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 311-322. DOI: 10.5194/hess-21-311-2017
- Molina A, V Vanacker, E Brisson, D Mora, V Balthazar. 2015. Multidecadal change in streamflow associated with anthropogenic disturbances in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 4201-4213. DOI: 10.5194/hess-19-4201-2015
- Morán-Tejeda E, A Ceballos-Barbancho, JM Llorente-Pinto. 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* 72: 39-49. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2010.03.003
- Morán-Tejeda E, J Lorenzo-Lacruz, JI López-Moreno, K Rahman, M Beniston. 2014. Streamflow timing of mountain rivers in Spain: Recent changes and future projections. *Journal of Hydrology* 517: 1114-1127.
- Nainggolan D, J de Vente, C Boix-Fayos, M Termansen, K Hubacek, MS Reed. 2012. Afforestation, agricultural abandonment and intensification: Competing trajectories in semi-arid Mediterranean agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 159(0): 90-104.
- Ninyerola M, JM Roure, X Pons. 2005. Atlas climático digital de la Península Ibérica: metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. Barcelona, España. Universitat Autònoma de Barcelona. 44 p. ISBN:932860-8-7
- Nosetto MD, EG Jobbágy, JM Paruelo. 2005. Land-use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11: 1101-1117. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00975.x
- Quiñonero-Rubio JM, E Nadeu, C Boix-Fayos, J de Vente. 2016. Evaluation of the Effectiveness of Forest Restoration and Check-Dams to Reduce Catchment Sediment Yield. *Land Degradation and Development* 27: 1018-1031. DOI: 10.1002/ldr.2331
- Ren L, F Yuan, B Yong, S Jiang, X Yang, L Gong, M Ma, Y Liu, H Shen. 2014. Where does blue water go in the semi-arid area of northern China under changing environments?, *IAHS-AISH Proceedings and Reports* 364: 88-93. DOI: 10.5194/piahs-364-88-2014
- Shalaby A, R Tateishi. 2007. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geogaphy* 27: 28-41. DOI: 10.1016/j.apgeog.2006.09.004
- Vicente-Serrano SM, E Rodríguez-Camino, F Domínguez-Castro, A El Kenawy, C Azorín-Molina. 2017. An updated review on recent trends in observational surface atmospheric variables and their extremes over Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 43 (1): 209-232. <http://doi.org/10.18172/cig.3134>
- Zeng Z, Z Zhu, X Lian, LZ Li, A Chen, X He, S Piao. 2016. Responses of land evapotranspiration to Earth's greening in CMIP5 Earth System Models. *Environmental Research Letters* 11: 1-10. DOI: 10.1088/1748-9326/11/10/104006
- Zhang Y, JL Peña-Arancibia, TR McVicar, FHS Chiew, J Vaze, C Liu, X Lu, H Zheng, Y Wang, YY Liu, DG Miralles, M Pan. 2016. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific Reports* 6: 19124. DOI: 10.1038/srep19124

Recibido: 05.05.17

Aceptado: 16.01.18

