

Recarga de acuíferos mediante silvicultura ecohidrológica: aplicación a la cuenca del río Bernal en Sierra Nevada (España)

Recharging aquifers through ecohydrological forestry: application to the Bernal River basin in Sierra Nevada (Spain)

Irene María Marín Carrillo^{1*}, Jorge Julián Vélez Upegui², Antonio Jaime Molina Herrera³ y Sergio Martos Rosillo¹

¹ IGME-CSIC (Sede Granada). Urban. Alcázar del Genil 4, Bajo y 1ºC, 18006, Granada.

i.marin@igme.es, s.martos@igme.es

² Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Instituto de Estudios Ambientales. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

jjvelezu@unal.edu.co

³ Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Forestal. E.T.S. de Ingeniería Agronómica y de Montes.

o22mohea@uco.es

*Corresponding author

ABSTRACT

The high-mountain basins of the Sierra Nevada are characterized by the presence of a dense, abandoned forest stand, primarily pine, that developed in the middle of the last century. The objective of this study was to analyze the impact of forest density reduction through thinning in the Bernal River watershed, located on the northern slope of the Sierra Nevada in Jérez del Marquesado (Granada). To this end, a distributed rainfall-runoff model was constructed using the TETIS code. This model allowed us to: 1) simulate river flow and determine the surface, hypodermic, and groundwater components; 2) quantify the increase in recharge under different forest thinning intensities; and 3) obtain calibration parameters that can be used to estimate resources in reforested watersheds in the Sierra Nevada. The results, in the analyzed watershed, demonstrated an increase in recharge of nearly 40% for a forest management system with 50% of the current pine stand.

Key-words: modeling, ecohydrology, recharge, forestry, groundwater

RESUMEN

Las cuencas de alta montaña de Sierra Nevada están caracterizadas por la presencia de una densa masa forestal abandonada, fundamentalmente de pinos, que se desarrolló a mediados del siglo pasado. El objetivo de este trabajo ha sido analizar el impacto de la reducción de la densidad forestal, mediante clareos, en la cuenca del río Bernal, situada en la falda norte de Sierra Nevada en Jérez del Marquesado (Granada). Para ello, se ha construido un modelo distribuido de precipitación-aportación mediante el código TETIS que ha permitido: 1) simular el caudal del río y conocer las componentes de agua superficial, hipodérmica y subterránea, 2) cuantificar el incremento de la recarga ante distintas intensidades de clareo del bosque y, 3) conseguir unos parámetros de calibración que puedan utilizarse para estimar los recursos en cuencas reforestadas de Sierra Nevada. Los resultados, en la cuenca analizada, han demostrado para una gestión forestal del 50% de la masa de pinos actual, un incremento de la recarga cercano al 40%.

Palabras clave: modelización, ecohidrología, recarga, silvicultura, agua subterránea

Geogaceta, 78 (2025), 31-34

<https://doi.org/10.55407/geogaceta113539>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 04/02/2025

Fecha de revisión: 24/04/2025

Fecha de aceptación: 30/05/2025

Introducción

La vegetación desempeña un papel fundamental en el balance hídrico de las cuencas en regiones semiáridas (Ruiz Pérez et al., 2016). La escasa disponibilidad de agua hace que los bosques semiáridos sean poco productivos, no estén gestionados y suelen acabar abandonados. Estas circunstancias incrementan el aumento del riesgo de incendios forestales y disminuyen la cantidad total de escorrentía, tanto superficial como subterránea.

La silvicultura ecohidrológica es un tipo de gestión forestal que propone reducir la densidad arbórea para conseguir una masa forestal con árboles más sanos y resistentes a las sequías, buscando la

optimización del recurso hídrico (mejor balance entre el agua consumida o "verde" y el agua que fluye en escorrentías o hacia el acuífero como agua "azul"). Está demostrado que, en los bosques con cubiertas forestales muy densas, la escorrentía, tanto la superficial como la subterránea, es mínima (Shenk et al., 2020). Sin embargo, si la densidad forestal se reduce, la recarga subterránea puede maximizarse (Blanco, 2017), si bien este efecto puede no producirse con precipitaciones medias anuales por debajo de los 345-500 mm/año (González-Sanchís, et al., 2019 y Del Campo, et al., 2022). En este trabajo se presentan los resultados preliminares de la aplicación de un modelo espacial distribuido de precipitación-aportación en la cuenca del río Ber-

nal (Jérez del Marquesado, Granada), con el que se pretende cuantificar el efecto sobre la recarga de agua subterránea tras una intervención de clareo del bosque.

Área de estudio

La cuenca del río Bernal se encuentra en el Parque Nacional de Sierra Nevada, en la provincia de Granada, en el sur de España, en una región climática semiárida. El punto central de la misma se localiza en torno a las coordenadas UTM ETRS89/30N X=483.815 Y= 4.115.988. La cuenca tiene una superficie de 25,8 km², con 14 km de longitud y una anchura media de unos 2 km. Su altitud media es de 1.703 m s.n.m., con un máximo de 2.394 m s.n.m. y un mínimo de 1.011 m s.n.m.

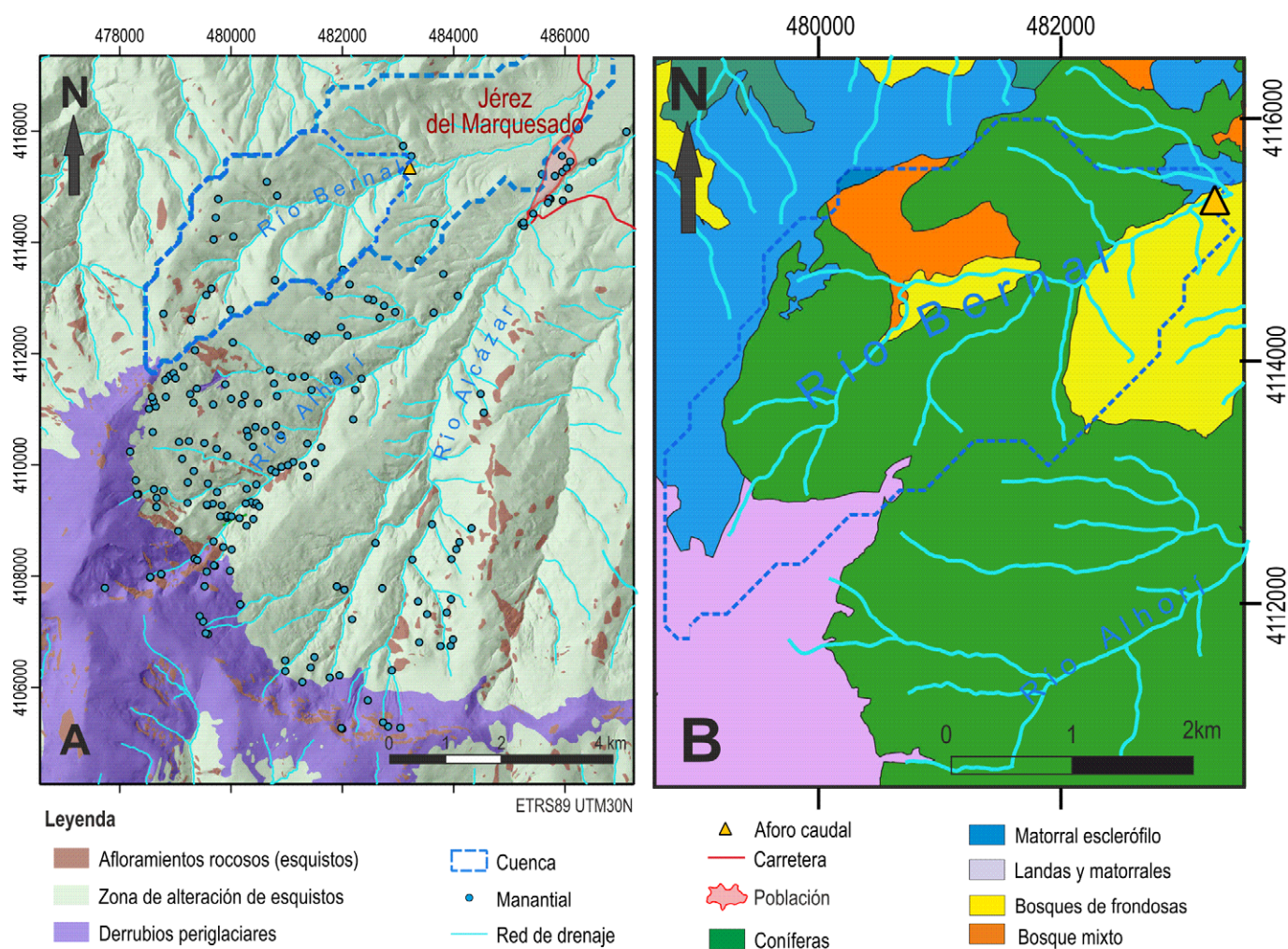


Fig.1.- Localización espacial del área de estudio. Mapa hidrogeológico de la cuenca del Bernal y cobertura forestal. Ver figura en color en la web.
Fig.1.- Spatial location of the study area. Hydrogeological map of the Bernal basin and forest cover. See color figure in the web.

Está constituida por materiales metamórficos alterados que conforman acuíferos superficiales en pendiente, de poco espesor y permeabilidad de alta a moderada. El 63% de la cuenca corresponde a afloramientos de micaesquistos grafitosos y cuarcitas (16,3 km²) que se encuentran alterados dando lugar a sedimentos permeables. El área restante (9,4 km²) engloba afloramientos de relleno de cuenca, glaciares y aluviales. No obstante, el estudio sobre la influencia de la silvicultura ecohidrológica en la cuenca, se va a centrar en la zona más elevada de la misma (9,9 km²), aguas arriba del punto de control de aforo (figura 1A) donde la litología aflorante corresponde únicamente a materiales metamórficos alterados.

La zona de estudio presenta una precipitación media de unos 700 mm/año, 7,5 °C de temperatura media y 845 mm/año de evapotranspiración potencial (1.951-2.022).

Muestra una importante masa forestal de pino de repoblación (figura 1B) que fue desarrollada a mediados del siglo XX y que

actualmente se encuentra con una gran densidad de ejemplares y abandonada.

La recarga de los materiales permeables se produce por infiltración del agua de precipitación. El agua que se infiltra recarga al acuífero superficial de poco espesor y en pendiente y descarga a través de los cauces superficiales de primer orden y por manantiales existentes a media ladera.

Metodología

La modelización hidrológica de la cuenca del río Bernal, se realiza a partir del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v9.0, desarrollado por la Universitat Politècnica de València (UPV, 2021).

El modelo trata de simular la respuesta hidrológica de la cuenca ocasionada por la entrada de lluvia y/o nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados y empleando la modelización distribuida de tipo conceptual.

La producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico por celdas, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí.

La información previa que requiere la modelización hidrológica es:

-*Datos meteorológicos.* El análisis de las series climáticas parte de la malla de nodos climáticos ROCIO desarrollada por AEMET (Peral et al., 2017) que permite la obtención de datos diarios de precipitación, temperaturas máximas, mínimas y evapotranspiración, desde el 1951 hasta el 2022, cada 5 km (<https://sarai-data.igme.es>).

-*Descriptores del terreno.* Corresponden a datos relativos a la geomorfología provenientes del modelo digital de elevaciones, como son: celdas acumuladas, dirección de flujo, pendientes, velocidad de flujo en la ladera y mapas relacionados con parámetros hidrológicos necesarios para el modelo, como son los mapas de almacenamiento estático del suelo

FC1	Almacenamiento estático
FC2	Evapotranspiración potencial
FC3	Infiltración
FC4	Velocidad de flujo en la ladera (Escurrentia)
FC5	Percolación
FC6	Velocidad de interflujo (Flujo hipodérmico)
FC7	Percolación profunda
FC8	Velocidad de flujo subterráneo conectado
FC9	Velocidad de flujo

Tabla 1.- Descripción de los factores correctores.
Tabla 1.- Description of corrective factors.

(Hu), de capacidad de infiltración (Ks), de percolación (Kp) o de conductividad hidráulica, además de los mapas de usos del suelo. Esta información se ha tratado con una resolución de 50x50m a partir de datos de la Red de Información Ambiental (REDIAM) de la Junta de Andalucía.

Por otro lado, a cada uno de los usos de suelo presentes en la cuenca se les asigna un coeficiente de cultivo (Kc) que varía mensualmente (12 valores) a lo largo del año, y una interceptación de la lluvia por parte de la cobertura vegetal. Las simulaciones del efecto del clareo en el bosque se han realizado aplicando un porcentaje de reducción, entre el 10% y el 100%, en dichos parámetros (Kc e interceptación).

-Hidrogramas. Datos provenientes de aforos directos realizados durante campañas de campo ejecutadas en los años 1.971-1.979, recogidos en el marco del estudio "Modelo matemático de la Depresión de Guadix (IGME, 1980)

Caso de estudio: cuenca del río Bernal

El modelo hidrológico distribuido se ha realizado a escala temporal diaria, y espacial de 50x50m. En primer lugar, se ha llevado a cabo su calibración a través del ajuste de nueve factores correctores (FC) relacionados con el proceso de formación y distribución de la escurrentia (Tabla 1), previo análisis de sensibilidad de parámetros.

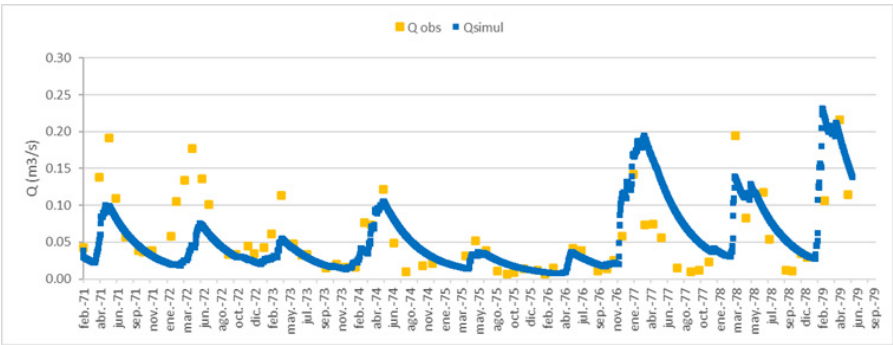


Fig. 2.- Análisis comparativo del caudal observado y simulado en el río Bernal. Ver figura en color en la web.
Fig. 2.-Comparative analysis of the observed and simulated flow in the Bernal River. See color figure in the web.

El proceso de calibración pretende conseguir minimizar la diferencia entre el caudal observado del río Bernal y el calculado por el modelo. Como índices de bondad del modelo se han tomado de referencia: el índice de Nash-Sutcliffe y el error en volumen (Wouter et al, 2019).

La calibración del modelo hidrológico se realiza para una serie temporal de 1.971-1.979, en la que se alcanza un índice de Nash-Sutcliffe de 0,3 y un error en volumen de 2,3%, por lo que se considera una calibración aceptable (Figura 2).

Una vez calibrado se ha simulado el efecto que suponen distintos escenarios de gestión forestal (Tabla 2).

Resultados y discusión

La precipitación media de la serie analizada es de 746 mm/año, de los cuales 519 mm/año (69%) corresponden a lluvia y 228 mm/año (31%), a nieve. La temperatura media es de 7°C y la ETP (calculada con la expresión de Hargreaves) corresponde a 819 mm/año.

La cubierta forestal de pino mediterráneo ocupa un 57% de la superficie de la cuenca modelizada.

La disminución de la superficie ocupada por la cubierta vegetal favorece la disminución de la evapotranspiración e interceptación y consecuentemente pro-

duce un incremento de la infiltración de agua en el suelo (flujo hipodérmico) y de la recarga del acuífero (flujo subterráneo) así como del caudal del río aguas abajo (figura 3).

Por otro lado, la escurrentia superficial hace alusión al agua que circula por la ladera tras un evento de lluvias intensas, en nuestro caso dadas las características del terreno, la escala diaria del modelo aplicado, las intensidades pluviales registradas y las dimensiones de la cuenca, el resultado es que la escurrentia superficial es nula, aunque en ocasiones se haya detectado escurrentia durante unas horas.

Según el modelo aplicado, una intervención de clareo del bosque en un 50%, provocaría una disminución en la interceptación de un 30% (30 mm/año) aproximadamente, y una disminución en la evapotranspiración en torno al 20% (78 mm/año), lo cual favorecería el incremento de la recarga del acuífero en un 37% (53 mm/año), que supondría una tasa de recarga del 26% respecto a la precipitación media de la cuenca, siendo la tasa de recarga sin gestión forestal del 19%. El caudal del río Alhorí, también mostraría un incremento del 37% (47 mm/año) respecto al caudal existente sin labores de clareo.

No obstante, otros trabajos han demostrado que la efectividad de la aplica-

Componentes	Clareo										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Precipitación	746.6	746.6	746.6	746.6	746.6	746.6	746.6	746.6	746.6	746.6	746.6
Interceptación	102.7	97.4	91.4	85.2	78.8	72.6	67.0	62.3	58.6	56.2	55.2
Evapotranspiración	403.1	389.2	374.7	359.4	343.0	325.4	306.5	286.3	265.1	243.1	220.7
Escurrentia superficial	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Infiltración (flujo hipodérmico)	269.8	287.4	306.2	326.0	347.0	369.1	392.4	416.4	440.3	463.8	486.5
Percolación (flujo subterráneo)	142.6	152.2	162.2	172.4	183.6	195.6	208.0	221.1	235.7	250.7	269.3
Caudal de salida (*)	126.4	134.4	143.2	152.9	159.7	173.0	180.9	194.7	204.1	212.8	217.3

Tabla 2.- Balance hídrico de la cuenca del río Bernal con distintos escenarios de gestión forestal (mm/año).
Tabla 2.- Water balance of the Bernal River basin with different forest management scenarios (mm/y).

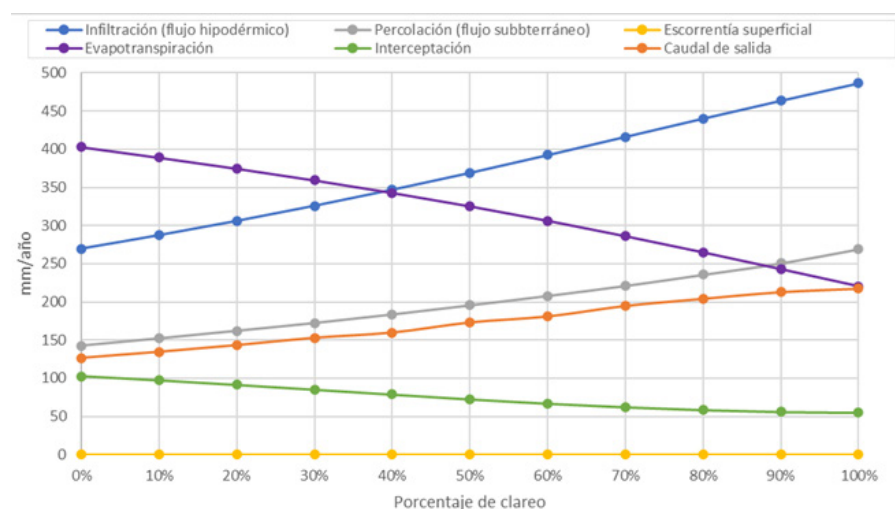


Fig. 3.- Evolución del balance hídrico resultante de la gestión forestal en la cuenca del río Bernal. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Evolution of the water balance resulting from forest management in the Bernal River basin. See color figure in the web.

ción de las técnicas de silvicultura enfocadas a la ecohidrología depende, en gran medida, de la precipitación y la masa forestal existente en la cuenca. Esta conclusión ya se recogía en otros estudios, donde los resultados mostraron un umbral de precipitación anual de 345-500 mm, por debajo del cual la gestión forestal no es efectiva en términos de aportes de agua en escorrentía y en recarga, ya que no se produce un aumento significativo de la percolación. La relación aporte de agua/consumo tras la gestión forestal confirmó la baja eficiencia de esta estrategia en ambientes semiáridos (González Sanchís et al., 2019, y Del Campo, et al., 2022).

Por otro lado, otros estudios hidrológicos previos predijeron que se requería una reducción del 40 al 60 % en el área basal forestal para que se detectaran aumentos significativos en el rendimiento de las aguas superficiales (Del Campo et al., 2022).

Conclusiones

El impacto en la recarga de agua subterránea, a través del empleo de prácticas de silvicultura, podría ser notable en la cuenca del río Bernal ubicada en la ladera norte de Sierra Nevada.

En definitiva, los tratamientos forestales pueden mejorar el funcionamiento de las cuencas hidrográficas al reducir las tasas de evapotranspiración y de intercepción de la precipitación por parte del dosel forestal, teniendo en cuenta que su efectividad dependerá de la precipitación y de la extensión de la masa forestal existente.

En el caso de estudio ambas características han permitido obtener unos resultados que demuestran la confiabilidad de la silvicultura ecohidrológica y animan a seguir estudiando el efecto del manejo forestal en las cuencas de Sierra Nevada, no sólo para mejorar la componente de flujo subterráneo, sino de los flujos superficiales e hipodérmicos, lo cual se traduce en un aumento significativo del caudal medio y el caudal base de los ríos.

Contribución de los autores

Marín-Carrillo: Estructura del trabajo, redacción, figuras, edición del manuscrito, investigación/análisis. **Vélez-Upegui:** Apoyo en los trabajos de simulación (Tetis). **Molina-Herrera:** Estructura del trabajo, revisión del manuscrito, investigación/análisis, supervisión. **Martos-Rosillo:** Estructura del trabajo, revisión del manuscrito, investigación/análisis, supervisión y financiación.

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto REVIERTE que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – Next-GenerationEU, con el apoyo del proyecto PID2022-140092OB-I00, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusi-

va responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.

Agradecemos a los coordinadores del proyecto Sarai (IGME-CSIC), mediante el cual se ha facilitado la tarea de obtención de los datos climáticos de la Serie Rocío de AEMET. Así como a Francisco Moral Martos y otros revisores que de manera desinteresada han aportado sugerencias que han permitido mejorar el entendimiento del presente artículo.

Referencias

- Blanco, J.A. (2017). *Ecosistemas* 26(2): 1-9. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01.
- Del Campo, A., Otsuki, K., Serengil, Y., Blanco, J.A., Yousefpour, R. and Wei, X. (2022). *Forest Ecology and Management* 519, 120324.
- González-Sanchís, M., Ruiz-Pérez, G., Del Campo, A., García-Prats, A., Francés, F. and Llu, C. (2019). *Journal of Environment Management* 231, 653-665.
- IGME, 1980. *Modelo matemático de la Depresión de Guadix* (1980).p 350.
- Martos, S., Martín, J.M., Ramos, B., Abellán, J., González, A., Jódar, J., Peinado, T., Cifuentes, V., García, F.J. y Durán, J.J. (2020). *XI Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*.
- Padilla, A., y Delgado, J. (2012). *Programa Trasero - Tratamiento y gestión de series de datos temporales*. Diputación Provincial de Málaga: Trasero 2.0.p 49
- Peral, C., Navascués, B. y Ramos, P. (2017) *AEMET Nota Técnica n° 24*. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf
- Ruiz-Pérez, G., González-Sanchis, M., Del Campo A.D. and Francés, F. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecolmod-el.2016.01.002>
- Schenk, E.R., O'Donnell, F., Springer, A.E. and Stevens, L.E. (2020). *Ecological Engineering*, volume 145. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105701>
- UPV (2021). *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9*. Universidad Politécnica de Valencia. Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. 97 p. <http://lluvia.dihma.upv.es/>