

# Evaluación de la recarga de agua subterránea en cuencas de montaña desarrolladas sobre rocas duras: caso de la garganta de San Gregorio, Aldeanueva de la Vera (Cáceres)

*Evaluation of groundwater recharge in mountain basins developed on hard rocks: case of San Gregorio gauge, Aldeanueva de la Vera (Cáceres)*

Nuria Naranjo Fernández<sup>1\*</sup>, Ana Fernández Ayuso<sup>2</sup>, Héctor Aguilera<sup>1</sup>, Carlos Marín Lechado<sup>1</sup>, Antonio González Ramón<sup>1</sup>, Thomas Zakaluk<sup>1</sup> y Sergio Martos Rosillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IGME-CSIC. C/Ríos Rosas, 23. 28002, Madrid.

n.naranjo@igme.es, h.aguilera@igme.es, a.gonzalez@igme.es, c.marin@igme.es, t.zakaluk@igme.es, s.martos@igme.es

<sup>2</sup> Departamento de Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid. Francisco Tomás y Valiente, 7, 28049, Madrid.

ana.fernandez@uam.es

\*Corresponding author

## ABSTRACT

The role of groundwater in the headwaters of rivers in mountainous areas is undervalued, despite its importance in maintaining the base flow of rivers and supporting numerous dependent ecosystems. However, mountain aquifers receive more precipitation and experience less evapotranspiration than the surrounding areas, making them a source of water supply for lower-altitude peripheral zones. The aim of this study was to present an assessment of recharge in a mountainous hydrological basin, developed on hard rocks, where no gauging station exists. The objective of this work has been to present an evaluation of recharge in a mountain hydrological basin, developed on hard rocks, in which there is no continuous gauging station. For this purpose, the basin was monitored by gauging a control section and a rainfall-runoff model was built using HBV-Light, which made it possible: 1) understanding the percentage of water that belongs to the direct runoff, interflow and baseflow; 2) quantifying the recharge in San Gregorio gorge.

**Key-words:** hard-rocks aquifers, water scarcity, hydrological models, recharge.

Geogaceta, 78 (2025), 27-30

<https://doi.org/10.55407/geogaceta113419>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

## RESUMEN

El papel del agua subterránea en la cabecera de los ríos en zonas de montaña está infravalorado, pese a la importancia que tienen en el mantenimiento del caudal de base de los ríos y de numerosos ecosistemas dependientes. Sin embargo, los acuíferos de montaña reciben más precipitación y sufren menos evapotranspiración que las zonas de su entorno, siendo fuente de aprovisionamiento para las zonas periféricas de menor altitud. El objetivo de este trabajo ha sido el de presentar una evaluación de la recarga en una cuenca hidrológica de montaña, desarrollada sobre rocas duras, en la que no existe estación de aforo en continuo. Esta evaluación se ha hecho en la garganta de San Gregorio. Para ello se ha monitorizado la cuenca aforando una sección de control y se ha construido un modelo de precipitación-aportación mediante HBV-Light que ha permitido: 1) conocer el porcentaje de agua que pertenece a las componentes superficial, subálvea y subterránea del sistema y 2) cuantificar la recarga en la Garganta de San Gregorio.

**Palabras clave:** acuíferos en rocas duras, escasez hídrica, modelos hidrológicos, recarga.

## Introducción

Es muy conocido por la comunidad científica que las montañas albergan importantes acuíferos desde los que se aporta agua subterránea a los ríos. Los acuíferos de montaña, al recibir mayor precipitación por efecto orográfico y tener menores pérdidas por evapotranspiración, presentan tasas de recarga superiores a las zonas bajas (Hayashi, 2020; Somers and McKenzie, 2020). En regiones altas con glaciares y permafrost activos, la recarga es limitada, a diferencia de montañas semiáridas y de baja latitud, donde la ausencia de criósfera y la exposición de materiales permeables

favorecen una recarga elevada, incrementando la contribución subterránea a los ríos y modificando su régimen hidrológico. Existe poca literatura científica en la que se caracterice y se evalúe la tasa de recarga en zonas de montaña, cuestión que es de especial interés, dado que, con el incremento global de la temperatura, en breve, muchas regiones montañosas que en la actualidad no tienen escasez de agua, pasarán a tener unas condiciones climáticas de semiaridez o unos períodos secos más largos durante el año hidrológico. Entre la literatura existente destacan los trabajos realizados en Sierra Nevada, concretamente en las cuencas de los ríos Mecina y Bérchules (Jódar et al. 2017; Jódar et al. 2018)

En un contexto de escasez hídrica cada vez mayor, mejorar el conocimiento sobre los acuíferos en rocas duras pueden ser una oportunidad de establecer otras formas de manejo del agua que tengan más en cuenta el papel esencial del agua subterránea en el mantenimiento de los caudales de base durante los períodos secos. Este estudio pretende poner en valor la potencialidad de los acuíferos en rocas duras en zonas de montaña como una fuente de agua subterránea, que puede ser evaluada a través de la cuantificación de los recursos hídricos, entendidos como la cantidad de agua disponible en un determinado lugar y momento, que pueden ser aprovechados.

## Área de estudio

La garganta de San Gregorio se encuentra en el término municipal de Aldeanueva de La Vera (Cáceres). Al suroeste de la garganta se encuentra el núcleo de población cuyo relieve montañoso dificulta una construcción fácil, y eso limita el acceso a la actividad agraria. El núcleo urbano se encuentra en torno a unos 640 m.s.n.m. y tiene censados 1997 habitantes (censo de 2024). La cuenca de recepción tiene una extensión de 12,7 km<sup>2</sup>, con altitudes comprendidas entre los 590 y 1812 m.s.n.m. El cauce principal tiene una longitud de 4,8 km y la cuenca completa una longitud de 6,6 km con un ancho máximo de 3,8 km. Pertenece al dominio del río Tiétar, que a su vez se encuentra englobado en la Demarcación Hidrográfica del río Tajo.

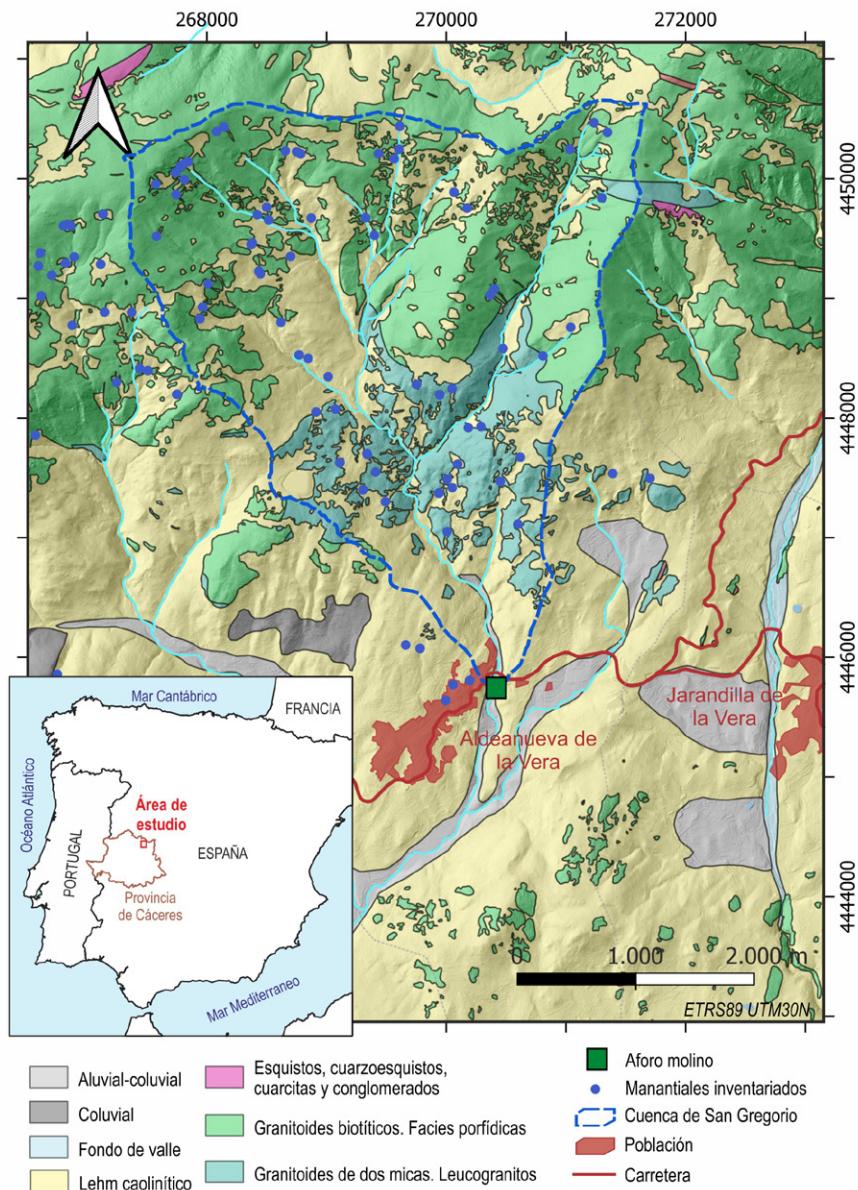
El agua de la garganta, además de uso de riego y recreativo (baño), se usa para abastecimiento de la población.

La precipitación media anual en el periodo estudiado (2006-2024) es de 1639 mm. Esta precipitación se distribuye mayoritariamente entre los meses de octubre a enero. La temperatura media anual es de 14 °C, con un intervalo de oscilación térmica diaria amplio, comprendido entre -6 y 41°C.

La geología de la cuenca de recepción (Fig.1) se caracteriza principalmente por la presencia de materiales paleozóicos del Macizo Ibérico. Los afloramientos de granitoídes carboníferos conforman la mayoría del área de estudio. Se trata de granitos micáceos, cuya alteración superficial permite la formación de un regolito, del que se desconoce su espesor, que permite la circulación del agua subterránea, conformando un acuífero superficial de carácter libre. Del Pérmico-Triásico afloran algunos esquistos y cuarzoesquistos del Cámbrico inferior. Del Holoceno existen depósitos de arenas, gravas y cantos redondeados de origen aluvial y coluvial que se sitúan sobre granitos o en los bordes de la cuenca, formando pendientes con forma irregular.

## Objetivo

Los objetivos principales de este trabajo son, a través de la construcción de un modelo de precipitación-aportación: 1) conocer el porcentaje de agua de precipitación que pertenece a las componentes superficial, subávlea y subte-



**Fig. 1. Mapa geológico simplificado de la zona de estudio y delimitación de la garganta de San Gregorio. Ver figura en color en la web.**

*Fig. 1.- Simplified geological map of study area and San Gregorio gorge. See color figure in the web.*

rránea que circula por la garganta y, 2) calcular la recarga del acuífero de montaña en rocas duras asociada a la zona de alteración de los granitos.

## Datos

Los datos meteorológicos (temperatura y precipitación) se han obtenido de la rejilla ROCIO (resolución de 5 km) desarrollada por AEMET (Nota Técnica 24 de AEMET, Peral et al., 2017). Se trata de datos diarios, del periodo 1951-2022. Su descarga se ha realizado con una aplicación desarrollada por el proyecto Sarai (<https://sarai-data.igme.es>). Además, para los años 2023 y 2024, no disponibles aún en la rejilla ROCIO se han descargado

los datos de la plataforma MeteoGredos (<http://www.meteogredos.com/>) cuya estación meteorológica se encuentra en Aldeanueva de la Vera.

La serie temporal de caudal diario medido se ha obtenido por medio de la instalación de un sensor de medición continua de presión y temperatura, tipo CTD Diver, en el periodo nov 2023- oct 2024. Para la realización de la curva de gasto se han hecho aforos mensuales por el método salino con el equipo EASYFLOW.

## Metodología

Se ha realizado un pretratamiento de los datos para su corrección con los datos barométricos, esencial en este caso al uti-

lizar sensores tipo CTD Diver. Se ha construido la curva de gasto y se ha calculado la evapotranspiración potencial (ETP) para el periodo oct-2006 a sep-2024 (Fig. 2a) mediante Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) en el software Trasero (Padilla y Delgado, 2012).

Para realizar el modelo de precipitación-aportación se ha escogido el código HBV Light, (Seibert 2005), cuya versión original HBV (Bergström 1976; Bergström 1995) fue creada por Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI, siglas en inglés).

Aguas arriba del punto de salida modelizado, la cuenca del arroyo San Gregorio cuenta con una superficie de 12,7 km<sup>2</sup> (Fig.1), que ha sido subdividida en seis zonas altitudinales a intervalos de 150 m de altitud. La discretización temporal del modelo es diaria.

El periodo total de simulación incluye un intervalo inicial de calentamiento de cuatro años hidrológicos (de oct de 2002 a sep de 2006), un periodo de calibración de un año (de oct de 2023 a sep de 2024) y finalmente, obtenidos los parámetros de calibración se ha simulado el periodo oct 2006 a sep 2024. Para asegurar la bondad del modelo, se ha realizado un proceso de Monte Carlo, se han filtrado los resultados con una función objetivo (Reff) mayor al obtenido para el modelo y se ha realizado un procesamiento por lotes para evaluar la incertidumbre de los parámetros.

El modelo HBV elegido es el de la configuración estándar, que considera un único depósito de almacenamiento (i.e., "Standard Version"; Seibert, 2005).

## Resultados y discusión

Se ha calibrado el modelo minimizando el error entre los datos de caudal del medido y calculado, y utilizando la eficiencia del modelo (Reff; Seibert, 1997) como función objetivo(Fig. 2b).

Posteriormente, se han escogido aquellos resultados con una función objetivo (Reff) mayor del 77%, obteniéndose un valor final de 79,1%. Para las soluciones obtenidas en el procesamiento por lotes (BatchRun) se ha obtenido una incertidumbre de las componentes del hidrograma de entre 15-22% para la componente subterránea y de entre el 51 y el 78% para la componente de la escorrentía superficial.

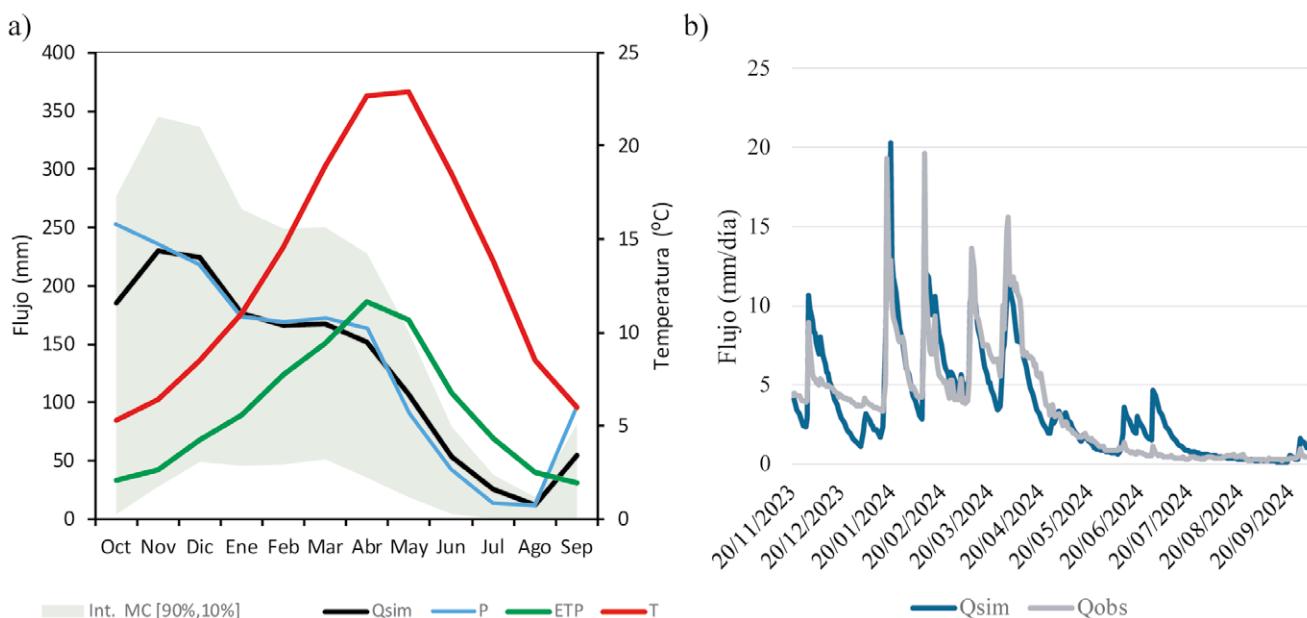
En el modelo realizado y calibrado, las contribuciones de la descarga total de la cuenca, por parte de la escorrentía superficial, la sub-superficial y la subterránea son, del 73,13%, 9,73% y 17,14%, respectivamente.

Los resultados obtenidos para el caudal simulado revelan que las aportaciones medias de la cuenca en el periodo de estudio (2006-2024) son de 19,7 hm<sup>3</sup>/año y que varían en un rango

de 10.2 hm<sup>3</sup>/año en el año hidrológico (2008-09) y 26,0 hm<sup>3</sup>/año en el año hidrológico (2015-16). La componente subterránea media anual es de 3,37 hm<sup>3</sup>/año siendo el máximo de 3,8 y el mínimo de 2,5 hm<sup>3</sup> anuales. El valor de la recarga media anual es de 265,7 mm. En la figura 2b se ha representado el caudal simulado y el caudal observado para el periodo temporal con datos observados, mostrando gráficamente la bondad del ajuste.

La garganta de San Gregorio no había sido inventariada ni monitoreada anteriormente y no cuenta con estación de aforos en continuo. Mediante el modelo de precipitación-aportación se ha podido realizar una primera evaluación de los recursos hídricos de la cuenca.

Tomando como referencia los resultados obtenidos de este trabajo y con la continuación del seguimiento de la zona, podría mejorarse el conocimiento de este tipo de acuíferos en zonas de montaña. Este tipo de acuíferos, desarrollados en rocas duras, habitualmente no se tienen en cuenta en los planes de gestión de aguas subterráneas, todo y que aportan unos recursos hídricos nada despreciables, sobre todo en zonas semiáridas y en épocas de sequía. Por otro lado, la correcta cuantificación del agua disponible es esencial para analizar la garantía al abastecimiento de Aldenueva de la Vera.



**Fig. 2. a)** Valores medios mensuales de temperatura (línea roja), precipitación (línea azul), evapotranspiración (línea verde), caudal simulado (línea negra) e intervalo de confianza de Monte Carlo [90%,10%] (banda verde). **b)** Flujo diario simulado (línea azul oscura) y flujo diario medido (línea azul clara) en mm/día en la Garganta de San Gregorio. Ver figura en color en la web.

*Fig. 2.- a) Monthly mean values of temperature (red line), precipitation (blue line), evapotranspiration (green line), simulated flow (black line) and Monte Carlo confidence interval [90%,10%] (green band). b) Simulated (dark blue line) and observed (blue line) daily flow (mm/day) in the San Gregorio Gorge. See color figure in the web.*

## Conclusiones

El modelo HBV Light construido para la garganta de San Gregorio representa con un ajuste del 79,1% el caudal de la cuenca de recepción del arroyo San Gregorio. Se considera que la aplicación de este tipo de modelos semidistribuidos constituye una herramienta válida para la gestión de los recursos hídricos en una cuenca sin monitoreo previo.

Los resultados obtenidos cuantifican tanto los recursos hídricos totales como la componente subterránea del sistema, lo que podría ayudar a poner en valor la capacidad de recarga de la zona alterada en rocas duras, que habitualmente no se tiene en cuenta en los planes de gestión de aguas subterráneas, pero que pueden conformar un aporte de recurso hídrico clave en épocas de sequía.

Se propone, continuar con el estudio y monitoreo en esta y otras zonas similares para obtener una mayor claridad sobre el funcionamiento de los procesos de recarga en acuíferos de montaña.

## Contribución de los autores

**Naranjo-Fernández:** Estructura del trabajo, modelización, edición, figuras, edición del manuscrito, investigación/ análisis, coordinación.

**Fernandez Ayuso; Zakaluk; Aguilera; y González Ramón:** adquisición de datos y colocación de sensores en cam-

po, corrección y análisis de datos de campo, revisión del manuscrito.

**Marín-Lechado:** realización de la cartografía geológica de la zona, edición figuras, revisión del manuscrito.

**Martos-Rosillo:** Estructura del trabajo, revisión del manuscrito, investigación/análisis, adquisición de datos, supervisión y financiación.

## Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto WaSHa, que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, a través de la Convocatoria de subvenciones para la realización de proyectos que contribuyan a implementar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2021-2030) y por el proyecto PID2022-140092OB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/5011000110033/FEDER, UE.

Las opiniones y documentación apor- tadas en esta publicación son de exclusiva 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.

## Referencias

- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI RHO 7, Norrköping, Sweden.134 pp.
- Bergström, S., 1995. The HBV model, computer models of watershed hydrology (editor: V.P.singh). Water Resources Publications.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hayashi, M. (2020) Groundwater, 58(4), 498-510.
- Jódar, J., Cabrera, J. A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., Gonzalez-Ramón, A., Lambán, L. J. et al. (2017). *Science of the Total Environment*, 593-594: 760-772.
- Jódar, J., Carpintero, E., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Cabrera-Arrabal, J. A. et al. (2018). *Science of the Total Environment*, 625: 285-300.
- Padilla, A., & Delgado, J. (2012). *Diputación Provincial de Málaga: Trasero 2.0*.
- Peral, C., Navascués, B. and Ramos, P. (2017) *AEMET Nota Técnica n° 24*. Available at: [http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos\\_en\\_linea/publicaciones\\_y\\_estudios/publicaciones/NT\\_24\\_AEMET/NT\\_24\\_AEMET.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf)
- Seibert, J. (1997). *Nordic Hydrology*, 28(4), 247-262.
- Seibert, J., 2005, *HBV light version 2, User's Manual*. Uppsala University, Institute of Earth Sciences, Department of Hydrology, Uppsala, Sweden.