

Aplicación de modelos semi-distribuidos de precipitación- aportación para evaluar los recursos disponibles en la Recarga Gestionada de Acuíferos. Caso del acuífero interfluvial Duerna- Peces (León)

Application of semi-distributed precipitation-recharge models as a tool for Managed Aquifer Recharge. Case of Duerna-Peces interfluvial aquifer (León)

Nuria Naranjo Fernández^{1*}, Jorge Jódar Bermúdez² y Sergio Martos Rosillo¹

¹ IGME-CSIC (Sede Granada). Urban. Alcázar del Genil 4, Bajo y 1ºC, 18006, Granada. n.naranjo@igme.es, s.martos@igme.es

² IGME-CSIC (Sede Zaragoza). Av. de Montañana, 1005, 50059 Zaragoza. j.jodar@igme.es

*Corresponding author

ABSTRACT

The implementation of hydrological models is essential for hydrological planning, as well as being of great use in the evaluation of available resources for Managed Aquifer Recharge (MAR). In this work we modelled the flow recorded at the Velilla gauging station that monitoring the river Duerna (León). The objective of this model was to evaluate the available resources and their temporal distribution throughout the year for the MAR of the Duerna-Peces interfluvial aquifer. This aquifer has been recharged for hundreds of years by the infiltration of water through the *zayas* with winter irrigation returns. The water stored in this aquifer, which has a low storage capacity, is extracted by means of dug wells at the end of the low water period to finish the irrigation campaign. A model has been obtained that: 1) reproduces the flows measured at the gauging station, 2) quantifies the resources available for the MAR, 3) identifies the most appropriate period of the year for diversion and 4) obtains calibration parameters that can be applied in neighbouring basins where there is no gauging station.

Key-words: water balance, water scarcity, Managed Aquifer Recharge, *zayas*.

RESUMEN

La implementación de modelos hidrológicos es esencial para la planificación hidrológica, además de ser de gran utilidad en la evaluación de los recursos disponibles para la Recarga Gestionada de Acuíferos (RGA). En este trabajo se presentan los resultados de la modelización del caudal registrado en la estación de aforos de Velilla del río Duerna (León). El objetivo de este modelo ha sido el de evaluar los recursos disponibles y su distribución temporal a lo largo del año, para la RGA del acuífero interfluvial Duerna-Peces. Este acuífero ha sido recargado, desde hace cientos de años, mediante la infiltración de agua a través de las *zayas* con retornos de riego invernales. El agua almacenada en este acuífero, de escasa capacidad de almacenamiento, es extraída mediante pozos excavados, al final del periodo de estiaje, para finalizar la campaña de riego. Se ha obtenido un modelo que: 1) reproduce los caudales medidos en la estación de aforo, 2) cuantifica los recursos disponibles para la RGA, 3) identifica el periodo del año más apropiado para su derivación y 4) consigue unos parámetros de calibración que podrán ser aplicados en las cuencas vecinas, en las que no se dispone de estación de aforo.

Palabras clave: balance hídrico, escasez hídrica, Recarga Gestionada de Acuíferos, *zayas*.

Geogaceta, 77 (2025), 59-62

<https://doi.org/10.55407/geogaceta107710>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 11/06/2024

Fecha de revisión: 30/10/2024

Fecha de aceptación: 29/11/2024

Introducción

La Recarga Gestionada de Acuíferos (RGA) consiste en un conjunto de técnicas con las que se introduce agua, de forma directa o inducida, en una formación permeable. Se consigue de este modo incrementar la garantía y la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos, así como actuar sobre su calidad. La Comisión Europea a través de la Directiva Marco del Agua (European Commission, 2023) contempla la RGA como una práctica adecuada para mitigar los efectos de escasez hídrica a la que nos enfrentamos en el actual contexto de cambio global. En España, la

recarga de acuíferos mediante canales de infiltración (i.e., sin recubrimiento) se realiza desde épocas ancestrales. Es el caso de las acequias de careo y riego de Sierra Nevada (Granada), las pesqueras de Aldeanueva de la Vera (Cáceres), o las *zayas* de La Valduerna (León); sistemas que funcionan de forma continuada desde, al menos, la Edad Media.

Este estudio se centra en la cuenca hidrológica del río Duerna (León, España), aguas arriba del acuífero interfluvial Duerna-Peces. Este acuífero se localiza en la comarca de La Valduerna, siendo las poblaciones más destacadas que se ubican sobre el mismo las de Destriana

y Robledo de La Valduerna. Lo forman 44 km² de afloramientos detríticos permeables (gravas, arenas y limos) con un espesor menor de 10 m, en los que se han estimado unas reservas comprendidas entre 9 y 15 hm³/año si se considera que el coeficiente de almacenamiento varía entre 0.03 y 0.05, respectivamente. Su superficie es relativamente plana y está delimitado al norte por el río Peces y al sur y al este por el río Duerna. El agua subterránea, de excelente calidad, se utiliza para abastecimiento y para regadío, especialmente al final del estiaje, cuando el río Duerna queda prácticamente seco, a la altura de la población de Velilla. Por

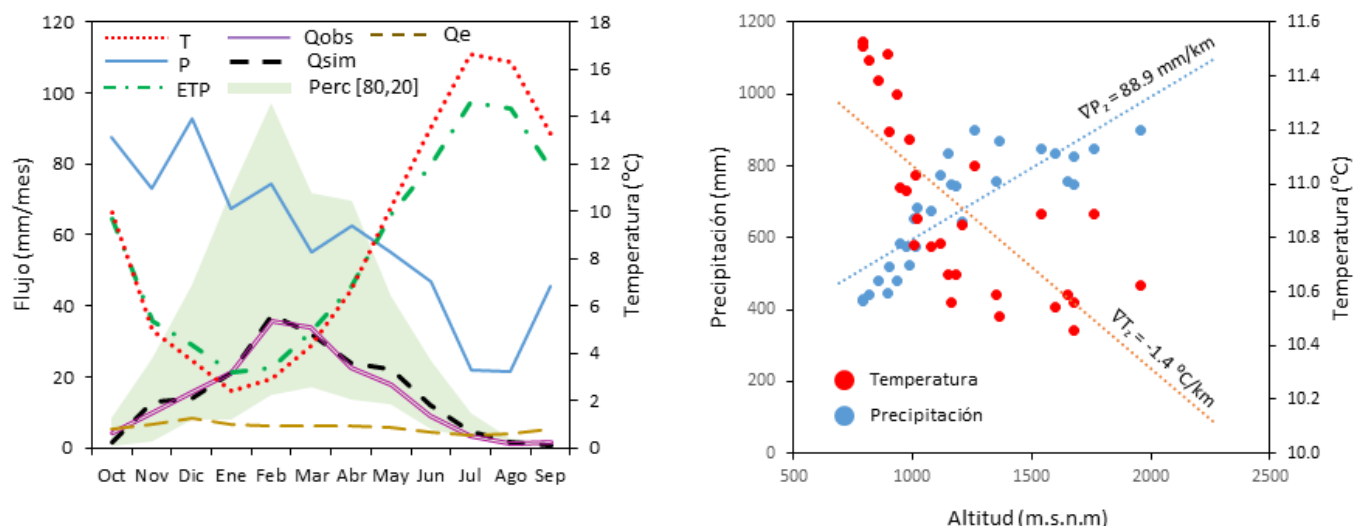


Fig.1- Izquierda. Hidrograma anual medio del río Duerna medido en la estación de aforos de Velilla (Qobs), calculado por HBV (Qsim), y caudal ecológico (Qe) propuesto por la CHD. El área sombreada (Perc[80-20]) indica el intervalo de variación de Qobs con respecto a los percentiles 20% y 80% de su distribución. **Derecha.** Variación de la precipitación y la temperatura con la altitud. Ver figura en color en la versión web.

Fig. 1- Left. Average annual hydrograph of the Duerna River measured at the Velilla gauging station (Qobs), calculated by HBV (Qsim), and the ecological flow (Qe) proposed by the CHD. The shaded area (Perc[80-20]) indicates the variation range of Qobs relative to the 20% and 80% percentiles of its distribution. ****Right.**** Variation of precipitation and temperature with altitude. See color figure in the online version.

este motivo, la población local desarrolló un sistema de recarga del acuífero, en el que agua se infiltra en el subsuelo mediante unas acequias sin revestir, conocidas localmente como zayas, y con el aprovechamiento del retorno de los riegos invernales de pastos y cereal. El agua recargada antes de la campaña de riego era posteriormente extraída al final de estiaje, con un elevado número de pozos excavados a mano, que antes funcionaban con norias de sangre y que ahora lo hacen con potentes equipos de bombeo.

Área de estudio

El río Duerna tiene una longitud de 59,9 kilómetros, nace en los Montes de León (Sierra del Teleno) y desemboca en río Tuerto a la altura de la población de La Bañeza (León). La cuenca de recepción tiene un área de 298 km², con altitudes comprendidas entre 770 y 2.150 m s.n.m. La Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) ha evaluado la aportación media del río Duerna en 94,9 hm³/año. Las precipitaciones medias anuales tienen una

elevada variabilidad altitudinal y están comprendidas entre los 900 mm en las cotas cercanas a los 2.000 m s.n.m. y los 460 mm a 900 m s.n.m. Estas precipitaciones se distribuyen mayoritariamente entre los meses de diciembre a mayo (Fig. 1). La temperatura media anual no presenta tanta variabilidad con la altitud y es de 10,2 °C, con un intervalo de oscilación térmica diaria amplio, comprendido entre -11 y 40 °C.

La geología de la cuenca de recepción está conformada por los siguientes

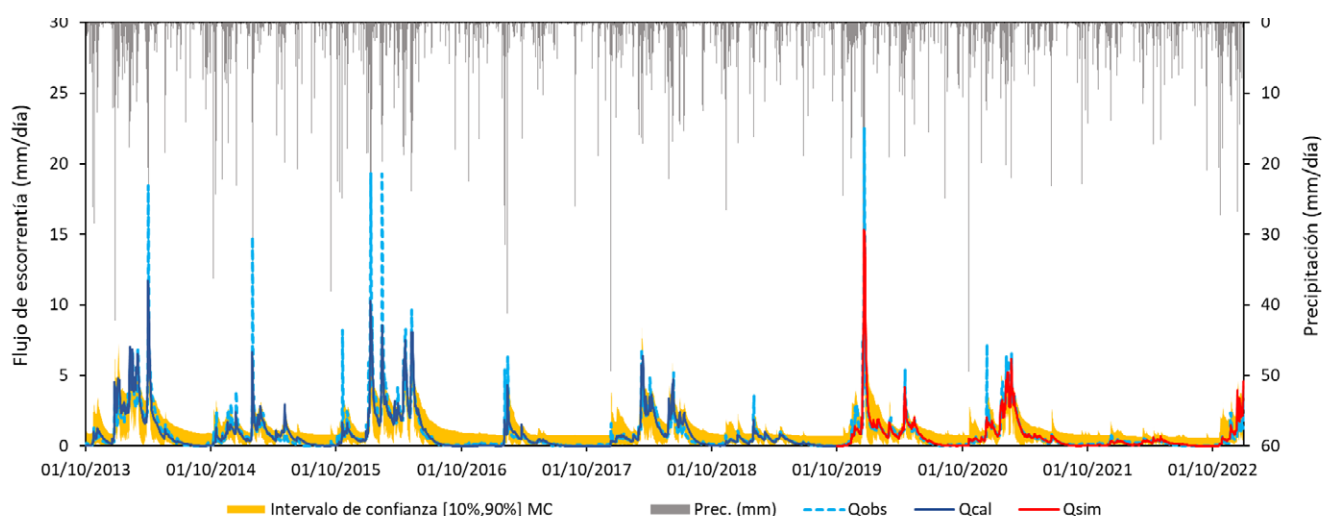


Fig. 2- Precipitación diaria (columnas grises) e hidrograma del río Duerna en la estación de aforos “La Velilla” en Velilla de La Valduerna (línea discontinua azul), en mm/día, representación de los caudales calibrados obtenidos con el modelo HBV (línea azul oscura) y caudales simulados (línea roja). En una banda amarilla se ha representado el intervalo de confianza de los caudales calibrados mediante el método de Monte Carlo para una confianza del 10 al 90%. Ver figura en color en la versión web.

Fig. 2- Daily precipitation (gray columns) and hydrograph of the Duerna River at the “La Velilla” gauging station in Velilla de La Valduerna (blue dashed line), in mm/day. The calibrated flows obtained with the HBV model (dark blue line) and simulated flows (red line) are represented. A yellow band shows the confidence interval of the calibrated flows using the Monte Carlo method for a confidence level of 10% to 90%. See color figure in the online version.

materiales, por orden de antigüedad: pizarras, areniscas y cuarcitas con intercalaciones de calizas y dolomías del Cámbrico inferior; cuarcitas, pizarras y areniscas del Ordovícico inferior; pizarras del Ordovícico medio-superior; calizas y pizarras del Silúrico; arcillas, limos, cantos y conglomerados del Terciario, y por último, terrazas, derrubios de ladera, aluvial, arenas y cantos rodados, del Cuaternario. El curso del río sigue aproximadamente la dirección NO-SE, que coincide con la del cabalgamiento de las cuarcitas-pizarras del Ordovícico sobre las del Cámbrico, dejando el Ordovícico en la margen izquierda y el Cámbrico en la margen derecha (Mata-González et al., 1981).

En la zona de cabecera, presenta un valle en "V" con un lecho en roca sobre afloramientos de aluviones (cantos y bloques gruesos). Aguas abajo de Molinaferrera, el valle se abre, al discurrir sobre aluviales, terrazas y llanuras de inundación. Son de destacar los abundantes restos de materiales producto de la explotación romana del oro, metal que le da nombre a este río (CHD, 2015).

Actualmente, los principales cultivos de la comarca son cereal, maíz y patata, con una superficie de regadío de unas 2.000 ha.

La vegetación dominante en las riberas son álamos, robles, fresnos, alisos y saucedas mixtas. Abundan especies de microinvertebrados, con valores entre 200 y 250 IBMWP, y se trata de uno de los ríos de la demarcación con mayor abundancia de truchas. Además, también alberga especies de especial interés, como la nutria, el martín pescador y el mirlo acuático, entre otras (CHD, 2015).

El tramo alto de la cuenca hidrográfica, hasta Priaranza de la Valduerna (950 m s.n.m.; masa de agua DU-146), está protegido como Reserva Natural Fluvial, ya que de este tramo se detraen aguas para abastecimiento humano (CHD 2015).

Objetivos

El conocimiento de la variación temporal del caudal del río Duerna, de su balance hídrico y el de los parámetros que rigen su régimen de funcionamiento es esencial para conocer el volumen de agua disponible para la RGA en la cabecera del acuífero interfluvial Duerna-Peces, donde, precisamente, se encuentra la estación de aforos La Velilla (gestionada por la CHD).

Este acuífero posee un sistema de canales excavados o zayas, operativos desde época medieval, que se utilizan para el riego de los cultivos ubicados sobre el acuífero libre y para su recarga. La infiltración del agua a través de las zayas que discurren entre el Duerna y el Peces, especialmente durante el periodo de deshielo, antes del periodo de riego (abril-septiembre), contribuye de forma decisiva al aumento de la recarga del acuífero libre, siendo este sistema un ejemplo vivo de Solución Basada en la Naturaleza (SbN) y de uso conjunto aguas superficiales-aguas subterráneas.

Los objetivos principales del presente trabajo son (1) obtener un modelo de precipitación-aportación calibrado del río Duerna, aguas arriba de la estación de Velilla, (2) utilizar los resultados obtenidos para determinar, con mejor exactitud, cuál sería la mejor época para comenzar las labores de derivación del agua para la RGA del acuífero interfluvial Duerna-Peces y; (3) obtener parámetros de calibración que puedan ser usados para modelizar la cuenca del río Peces, en la que no se dispone de estación de aforo. Actualmente, la CHD solo permite la derivación de agua entre el 1 de abril y la fecha en la que el caudal del río Duerna alcanza su caudal ecológico.

Datos de entrada

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, de precipitación y temperatura, que han permitido el cálculo de la evapotranspiración potencial con el método de Thornthwaite (1948). Su descarga se ha realizado con una aplicación desarrollada por el proyecto Sarai (<https://sairai-data.igme.es>).

La serie temporal de caudal diario medido en la estación de La Velilla, del periodo 2013-2023 (Fig 1), ha sido facilitada por la CHD.

Metodología

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 Institu-

to Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI, siglas en inglés).

Aguas arriba de la estación de aforo de Velilla, la cuenca del río Duerna cuenta con una superficie de 245 km². Esta ha sido subdividida en ocho zonas altitudinales a intervalos de 200 metros de altitud. La discretización temporal del modelo es diaria. El periodo total de simulación incluye un intervalo inicial de calentamiento de ocho años hidrológicos (de Octubre de 2005 a Septiembre de 2013), un periodo de calibración de seis años (de Octubre de 2013 a Septiembre de 2019), y finalmente, un periodo de simulación de tres años y tres meses (de Octubre de 2019 a Diciembre de 2022) que se utiliza para validar el modelo.

El modelo HBV elegido es el de la configuración estándar, que considera tres depósitos de almacenamiento del agua subterránea, con almacenamiento en la zona saturada ubicada en el depósito superior (i.e., "Three GW boxes, STZ distributed"; Seibert, 2005).

Resultados y discusión

Se ha calibrado el modelo minimizando el error entre los datos de caudal del hidrograma medido y calculado, y utilizando la eficiencia del modelo (Reff; Seibert, 1997) como función objetivo, obteniendo para esta un valor de 81,9%. En la Figura 2 se representan los caudales observados, los caudales obtenidos en el periodo de calibración y los caudales simulados para el periodo de validación, además del intervalo de confianza que resulta del análisis de Monte Carlo [10%,90%].

Las observaciones indican que las aportaciones medias de la cuenca, correspondientes al periodo 2013-2022, son de 76,38 hm³/año. Para el mismo periodo las aportaciones medias calculadas por el modelo son exactamente las mismas, 76,38 hm³/año. Sin embargo, los aportes obtenidos con el modelo realizado son inferiores a los estimados por el CEDEX (código 2520) para la CHD, (84,8 hm³/año, con datos de 20 últimos años). Por lo que, los resultados conseguidos en este trabajo indican que, actualmente, la CHD puede estar sobrestimando las aportaciones del río Duerna.

En el modelo realizado las contribuciones de la descarga total de la cuenca, por parte de la escorrentía superficial, la sub-superficial y la subterránea son del

12,5%, 11,7% y 75,7%, respectivamente.

La gestión actual del recurso hídrico en la cuenca es competencia de la CHD, la cual autoriza el uso del agua del río y su derivación hacia las zayas de recarga, a partir del 1 de abril de cada año. En la figura 1 se muestra el hidrograma anual medio, acumulando los datos diarios de forma mensual y la variación anual del caudal ecológico que la CHD establece. Como se puede observar, durante los años secos, representados por el percentil 20 del caudal, el periodo más adecuado para derivar el caudal del río para la RGA del acuífero, es el comprendido entre los meses de enero y junio. Esto indica que la época de recarga del acuífero interfluvial Duerna-Peces, debería adelantarse al mes de enero/febrero, sin que ese adelanto cause descensos de caudal en el río que pongan en peligro los caudales ecológicos establecidos por la CHD.

Mediante los resultados del modelo realizado se constata que el adelanto de la época de recarga del acuífero, mediante el uso de zayas, a los meses de invierno, generaría un menor impacto en el caudal ecológico del río. Además, la derivación de las aguas superficiales del río Duerna a través de las zayas, convierte al acuífero interfluvial en un depósito natural que permite una distribución óptima del agua entre todos los usuarios del acuífero.

Conclusiones

El modelo HBV Light construido para la cuenca del río Duerna hasta la estación de aforos, representa con un ajuste del 81,9% al sistema, siendo éste tipo de modelos semidistribuidos una buena herramienta para la estimación de los recursos hídricos generados en la cuenca tributaria de la estación de aforos, punto desde el cual se comienza a gestionar el recurso hídrico generado.

Gracias a los resultados obtenidos del modelo se propone modificar la estrategia de gestión de la relación del río Duerna con el sistema de zayas del acuífero

interfluvial Duerna-Peces, pudiéndose adelantar la derivación de sus recursos hídricos al invierno, obteniéndose así grandes beneficios en las estrategias de RGA, y todo ello sin poner en peligro el cumplimiento de la normativa en cuanto a caudales ecológicos establecida por la CHD.

Se puede concluir afirmando que, la ancestral forma de manejar el agua de esta cuenca hidrológica constituye un ejemplo de uso adecuado de la infraestructura verde, de Solución Basada en la Naturaleza, y de sistema de uso conjunto de agua superficial y subterránea. Por este motivo, este puede ser un ejemplo para implementar este tipo de estrategias en otras cuencas similares características, con objeto de poder implementar soluciones de RGA eficientes y resilientes, y que tienen un impacto reducido sobre los ecosistemas adyacentes.

Contribución de los autores

Naranjo-Fernández: Estructura del trabajo, adquisición de datos, edición, figuras, edición del manuscrito, investigación/análisis, coordinación. **Jódar-Bermúdez:** metodología, revisión del manuscrito, investigación/análisis, supervisión. **Martos-Rosillo:** Estructura del trabajo, revisión del manuscrito, investigación/análisis, supervisión.

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).

Las opiniones y documentación aportadas 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 la Confederación Hidrográfica del Duero por la aportación de los datos de caudales. También 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 Rocio 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.
- CHD. (2015). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación Hidrográfica del Duero*. Plan 2016-2021. Anejo 3: Zonas Protegidas.
- European Commission (2023). *EU Water Framework Directive-Integrated River Basin Management for Europe*. Available online: http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html
- Mata-González, J., Orviz-Castro, F., Velando-Múnoz, F., Perez-Estaun, A. (1981) *Serie MAGNA 1:50:000 editada por el IGME. Hoja 192 "Lucillo". Segunda serie, primera Edición*.
- Peral, C., Navascués, B. and Ramos, P. (2017) *Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos*. AEMET Nota Técnica nº 24. Available at: https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/NT_24_AEMET
- 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.
- Thornthwaite, C. W. (1948). *Geogr. Rev.* 38:55-94.