

Estimación de la recarga y descarga de agua subterránea mediante aforos diferenciales en el tramo final del río Guadalfeo (Granada)

Groundwater recharge-discharge estimation with differential flow gaugings in the final stretch of the Guadalfeo river (Granada)

Ángela M. Blanco-Coronas¹, Manuel López-Chicano¹, Rogelio Acosta-Rodríguez¹ y María Luisa Calvache¹

¹ Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Avenida Fuente Nueva s/n. ablanco@ugr.es, mlopezc@ugr.es, rogeracota@gmail.com, calvache@ugr.es

RESUMEN

Las interacciones entre las aguas subterráneas y las superficiales son muy complejas y dependen de múltiples factores. La dependencia mutua de ambos cuerpos de agua crea la necesidad de tratarlos como un único sistema. El río Guadalfeo constituye la principal recarga del acuífero Motril-Salobreña, y su caudal depende de la actividad antrópica y de un clima variable. Este estudio se centra en un año completo, de noviembre de 2017 a octubre de 2018, y presenta por primera vez el comportamiento del río en detalle. Para ello, se realizó una campaña mensual de aforos diferenciales en 5 puntos del río, y se analizó el carácter influente o efluente del río por tramos. Además, las medidas de nivel freático sirvieron para relacionar las pérdidas o ganancias del río con el comportamiento del acuífero.

Palabras clave: acuífero detrítico, río, intercambio de aguas subterráneas.

ABSTRACT

Groundwater-surface water interactions are very complex and dependent on multiple factors. The mutual dependence of both water bodies create the need for treating them as a unique system. The Guadalfeo river is the main entrance of water to the Motril-Salobreña aquifer, and it relies on the anthropogenic activity and on the variable climate of the area. This study presents the detailed behavior of the river during an entire year, since November 2017 to October 2018. To that end, differential flow gaugings were made at 5 points of the river to finally analyze its effluent-influent behaviour by sections. Furthermore, the groundwater level measurements allowed to relate the gains or losses of the river flow with the aquifer behavior.

Key-words: detrital aquifer, river, interaction, groundwater exchange.

Geogaceta, 69 (2021), 91-94
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 25/06/2020
Fecha de revisión: 23/10/2020
Fecha de aceptación: 27/11/2020

Introducción

En los últimos años, la importancia de considerar las aguas subterráneas y superficiales como un único recurso ha sufrido un evidente incremento (Wood, 2011). La comprensión de la interacción entre aguas subterráneas y los ríos es importante para el cálculo de balances hídricos, para la explotación sostenible de las aguas subterráneas (Tsur y Graham-Tomasi, 1991), así como para el mantenimiento de los caudales ecológicos del río (Boulton, 1993; Krause *et al.*, 2007; Luc, 2004). El grado de intercambio depende de numerosos factores entre los que se incluye la topografía, la geología, las propiedades hidráulicas del subsuelo, las variaciones temporales en la precipitación y patrones de flujos locales de agua subterránea (Cey *et al.*, 1998).

El acuífero Motril-Salobreña es conocido por su buen estado, al contrario de la mayoría de acuíferos costeros de regiones semiáridas (Calvache *et al.* 2016). Se trata de un sistema complejo

que depende de un clima muy variable y de numerosos factores controlados por la actividad antrópica. Por ello, diversos estudios se han centrado en el intento de preservar los recursos en contra de la intrusión marina y/o un descenso pronunciado de los niveles freáticos.

La construcción de la presa de Rules, que gestiona el caudal del río Guadalfeo, produjo una gran preocupación sobre cómo afectaría al acuífero. Calvache *et al.* (2003) realizaron un estudio sobre el estado del acuífero antes de finalizar la construcción de la presa. Duque *et al.* (2011) calcularon los porcentajes de recarga mediante isótopos estables del agua. En Duque *et al.* (2010) se realizó un modelo el transporte de calor para estudiar la relación río-acuífero.

El objetivo de este estudio es mejorar el entendimiento de los procesos de intercambio entre el río Guadalfeo y el acuífero Motril-Salobreña mediante medidas directas de caudal y de nivel freático realizadas una vez al mes durante un año hidrológico.

Área de estudio

La cuenca del río Guadalfeo, situada en la vertiente meridional del macizo de Sierra Nevada, tiene una extensión total de 1290 km². El río Guadalfeo (Fig. 1) con una longitud de 71 km, nace a más de 3400 m de altitud y drena las aguas hacia el sur, para desembocar en el Mar Mediterráneo. El acusado gradiente topográfico y el contraste climático entre las épocas de verano e invierno, hace que el río tenga un régimen mixto pluvionival con un caudal anual muy variable. El río está regulado por la Presa de Rules, construida para el abastecimiento de los núcleos urbanos costeros y para el regadío de la vega de Motril-Salobreña, donde se practica una intensa actividad agrícola de cultivos subtropicales y hortícolas.

Las pérdidas en el lecho del río Guadalfeo suponen una de las principales entradas de agua al acuífero existente aguas abajo de la presa de Rules (Calvache *et al.*, 2009; Duque *et al.*, 2010). El acuífero de Motril-Salobreña tiene una

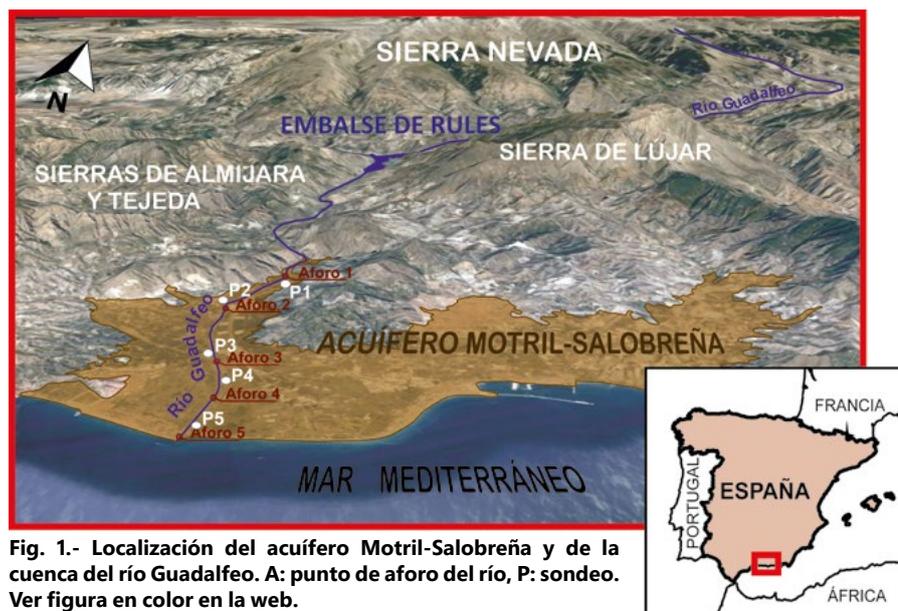


Fig. 1.- Localización del acuífero Motril-Salobreña y de la cuenca del río Guadalfeo. A: punto de aforo del río, P: sondeo. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Location of the Motril-Salobreña aquifer and the Guadalfeo river basin. A (Aforo): measurement point of the river flow, P: well. See color figure in the web.

superficie aproximada de 42 km² limitada por la Sierra de Almirajara y Tejada, la Sierra de Lújar y el mar Mediterráneo (Fig. 1). Se compone de sedimentos aluviales aportados por el río Guadalfeo y otros cauces menores, que yacen sobre los esquistos y filitas de las Zonas Internas de la Cordillera Bética, considerados impermeables. Los materiales que componen el acuífero son una alternancia de arcillas, limos, arenas y gravas. La conductividad hidráulica del acuífero decrece de norte a sur y de este a oeste (Duque *et al.*, 2005). El flujo subterráneo tiene una dirección de norte a sur con un gradiente hidráulico calculado entre $1,6 \times 10^{-3}$ y 5×10^{-3} (Duque *et al.*, 2010).

Metodología

Aforos en el río Guadalfeo

Agua abajo de la presa de Rules, se realizaron aforos directos mensuales con aforador durante un año completo (noviembre 2017-octubre 2018) en distintos puntos a lo largo del cauce natural del río Guadalfeo. Se escogieron 5 localizaciones (de norte a sur: A1, A2, A3, A4 y A5) manteniendo una distancia de 1,5-2 km y haciéndolos coincidir en cierta medida con piezómetros cercanos al cauce (P1, P2, P3, P4 y P5) (Fig.1). Para los aforos directos se utilizó un aforador MF Pro de OTT, que contiene un sensor que crea un campo magnético en el que el flujo de electrones que acompaña el flujo de agua induce una corriente eléctrica cuyo voltaje es proporcional a la velocidad del agua en la sección aforada.

Se calcularon las diferencias de caudales entre los puntos de aforo extremos de cada tramo. Estos valores aportan información sobre los tramos donde el río tenga un carácter efluente o influente, para analizar las posibles pérdidas o ganancias de caudal (Bonacci, 1987; Cey *et al.*, 1998; Harte y Kiah, 2009; McCallum *et al.* 2013).

Medidas de nivel freático

Se realizaron observaciones de nivel freático en 5 sondeos cercanos al río con una sonda de hidronivel HydroMet KL010 de OTT. Estos datos, junto con los aforos, permiten relacionar las diferencias de caudal con los ascensos y descensos de nivel.

Tanto los puntos de aforo como los sondeos fueron nivelados mediante un GPS diferencial Leica 1200+.

Datos hidrometeorológicos

Los datos hidrometeorológicos fueron registrados por la estación meteorológica de Motril de la red de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía. Se obtuvieron datos horarios de precipitación, presión atmosférica, temperatura, radiación solar, y velocidad y dirección del viento.

Cálculo de la infiltración

A los datos de aforos diferenciales, considerados como medios mensuales, se les descontó la evaporación mensual y se les sumó la precipitación directa mensual para el cálculo de la infiltración por tramos.

Para el cálculo de evaporación directa del río se aplicó la ecuación de Penman (Penman, 1956), que estima la evaporación de la superficie libre de agua:

$$E_p = \Delta / (\Delta + \gamma) \cdot R_{nw} / \lambda + E_a \cdot \gamma / (\Delta + \gamma)$$

Donde E_p es la evaporación, Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor, γ es la constante psicrométrica, R_{nw} es la radiación neta en la superficie, λ es el calor latente de vaporización, E_a es el factor de corrección de la acción del viento. Los parámetros fueron calculados usando las variables climáticas recogidas en la estación meteorológica de Motril de la Junta de Andalucía.

Resultados

Datos de precipitaciones, caudales y niveles freáticos

La figura 2 muestra los caudales medidos en los distintos puntos de aforo y los vertidos por la presa de Rules, las precipitaciones, y los niveles freáticos. desde noviembre 2017 a octubre 2018. El año hidrológico 2017-2018 podría considerarse un año moderadamente seco con unas precipitaciones totales de 304 mm. La lluvia ha estado ausente en los meses de verano y las precipitaciones más abundantes se registraron en marzo (229,7 mm). Los caudales evolucionan en el tiempo de manera similar a las lluvias, aunque con un desfase de hasta dos meses. El pico de caudal no se produjo hasta mayo, momento en el que superó los 7m³/s. Esto es fruto del retardo producido por el deshielo y de la retención de agua en la presa de Rules. La trayectoria de los caudales es la misma para todos los puntos de aforo y tienen una tendencia muy similar a la curva de caudales aportados por la presa de Rules. Los niveles freáticos del acuífero oscilan en función del caudal que discurre por el río. La respuesta del acuífero con respecto al caudal del río es más rápida en el punto P1: el nivel alcanza su máximo en mayo junto al caudal y en junio descienden de manera simultánea. En los puntos P2, P3, P4 y P5, los niveles aumentan en mayo, en cambio no es hasta junio cuando alcanzan el máximo. En la figura 3 se representa la altura de la base del canal del río medido con GPS en los diferentes puntos de aforo y la superficie freática en época de niveles bajos (febrero) y niveles altos (mayo). Se observa como A4-A5 es el único tramo en el que el

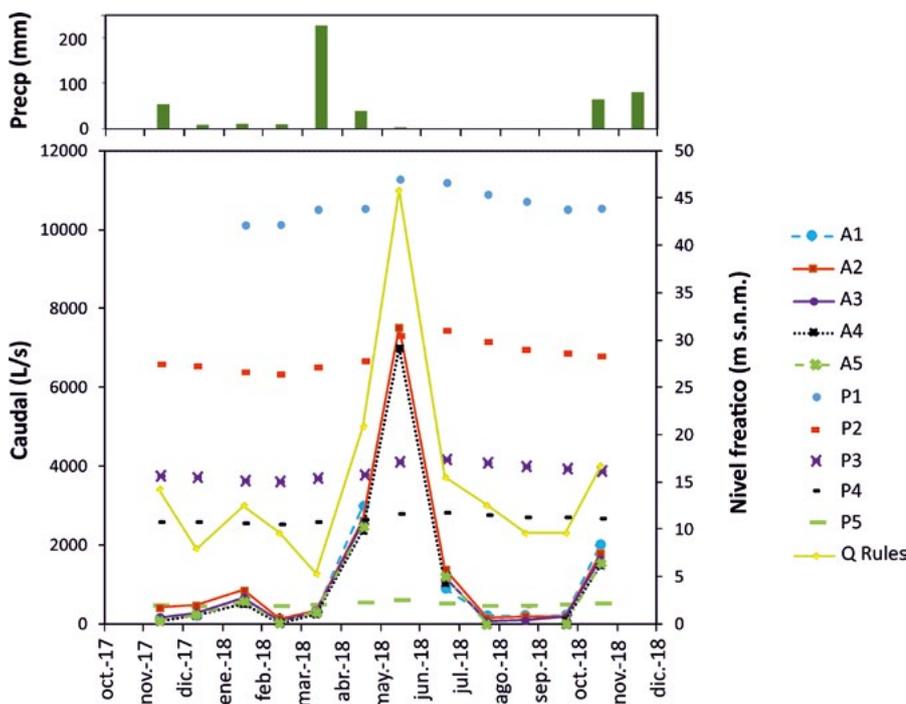


Fig. 2.- Registros mensuales de precipitaciones (barras, Precp), caudal en cada punto de aforo (líneas continuas, A), niveles freáticos (líneas de puntos, P) y caudal vertido por la presa de Rules (línea amarilla, Q Rules). Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Monthly records of precipitation (Precp), river flow at each measure point (A), groundwater level (P), water flow liberated by Rules dam (Q Rules). See color figure in the web.

nivel freático se encuentra por encima de la base del canal del río y donde las variaciones de nivel son menores y que aumentan hacia el norte del acuífero.

Aforos diferenciales

La relación entre las diferencias de caudal obtenidos en los diferentes tramos y el caudal del punto localizado aguas arriba de cada tramo (Fig. 4) siguiendo el método de Bonacci (1987) muestra diferentes comportamientos a lo largo del recorrido del río. En el tramo A1-A2 (Fig. 4A) los puntos se encuentran dispersos, apareciendo valores positivos y negativos. Su comportamiento no corresponde con ninguno de los estandarizados en Bonacci (1987). Por el contrario, en los tramos A2-A3 y A3-A4 (Figs. 4B y 4C) los valores son siempre negativos. El tramo A2-A4 abarca la mayor parte del río Guadalfeo a su paso por la vega de Motril-Salobreña. Su tendencia (Fig. 4E) concuerda con la de las figuras 4B y 4C. Los tres tramos se caracterizan por la existencia de una pérdida constante de agua del río, tanto para caudales bajos como para caudales altos. En el tramo limitado por los aforos 2 y 4 (Fig. 4E) se observa que cuando se registran caudales muy altos, la infiltración del río al acuífero tiende a disminuir. Para caudales

superiores a 3.3 m³/s aproximadamente, parece existir un límite de descarga en el que el río pasaría de ser influente a ser efluente o ganador.

En el último tramo, el A4-A5, todos los puntos aparecen en la parte positiva del gráfico. El río se comportaría como sistemáticamente ganador en este intervalo del río.

Infiltración

Las pérdidas de caudal y la infiltración por tramos (Tabla I) muestra que el río Guadalfeo se comporta como un río in-

fluente en la mayor parte de su curso con tasas de infiltración positivas. En cambio, en la zona más próxima a la desembocadura (A4-A5) el río se comporta como efluente y tiene una ganancia anual de 1.6 hm³ procedentes del acuífero.

El tramo donde se produce una mayor pérdida corresponde al A3-A4, con una infiltración anual al río de 4.2 hm³ y de 0.09 L/s por metro lineal. Dichas pérdidas llegan a ser totales en varios meses del periodo de estudio llegando a secarse el río en A4.

Discusión

Los caudales medidos en los diferentes aforos son directamente proporcionales a los caudales que aporta la presa de Rules, situada 10 km aguas arriba.

La posición del nivel freático tiene una fuerte dependencia de la recarga producida por el río Guadalfeo. Las variaciones de nivel no se producen de forma automática con las lluvias, sino que lo hacen con un cierto desfase respecto a las mismas, fruto de la regulación que impone la presa.

El único tramo en el que el acuífero alimenta al río es el tramo final (A4-A5), mientras que el resto del curso actúa como influente. En el tramo A2-A4 las pérdidas de caudal tienden a disminuir para caudales muy altos debido a la progresiva disminución de la zona no saturada por el ascenso del nivel freático, de acuerdo con Duque (2009). Al comportamiento del tramo A1-A2 no se le ha dado una interpretación y será objeto de estudio en futuros trabajos. Por último, el tramo con mayor tasa de infiltración no corresponde al tramo superior, sino con uno de los tramos más bajos del río (A3-A4).

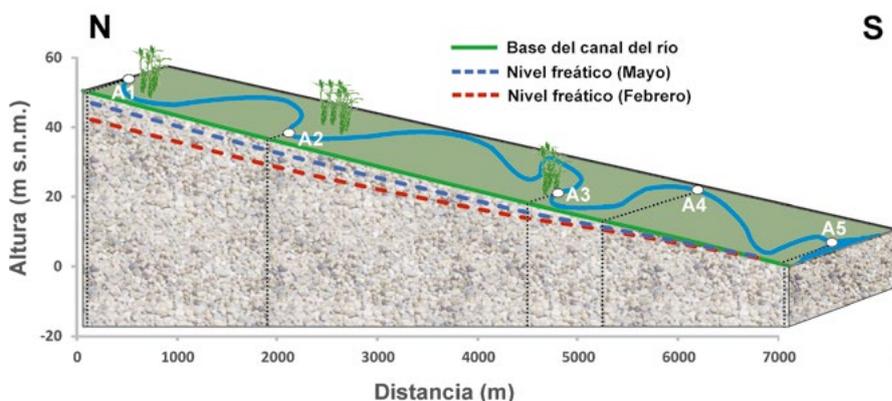


Fig. 3.- Posición del nivel freático en febrero (niveles más bajos) y mayo (niveles más altos) y cota de base del canal del río en los diferentes puntos de aforo. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- Groundwater level position in February and May and riverbed height at the different river flow measurement points. See color figure in the web.

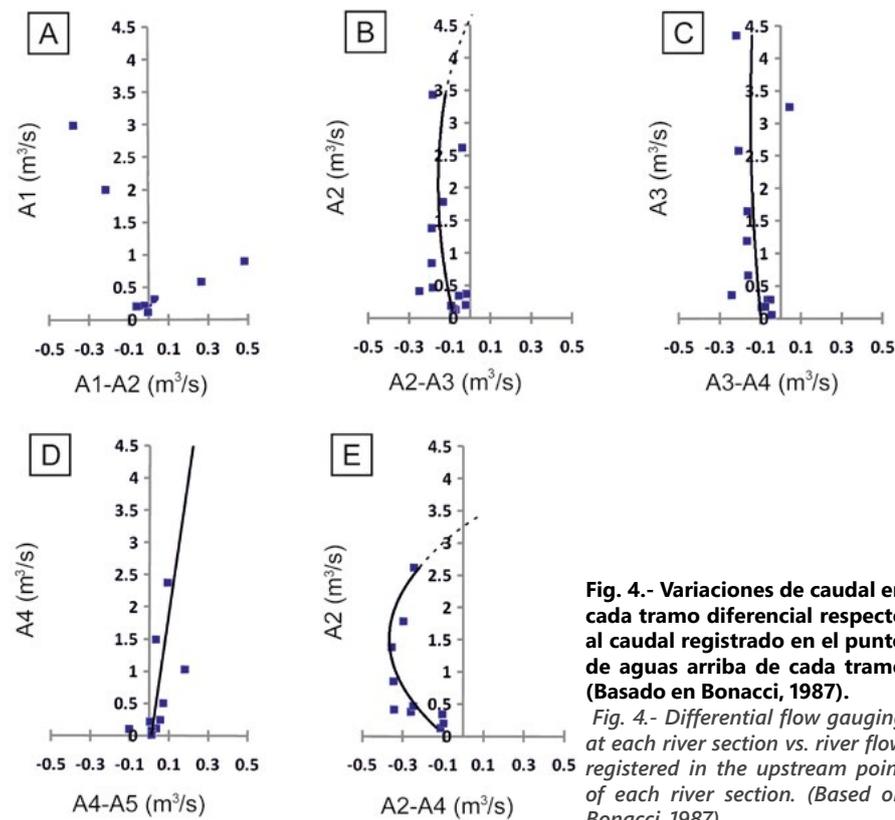


Fig. 4.- Variaciones de caudal en cada tramo diferencial respecto al caudal registrado en el punto de aguas arriba de cada tramo (Basado en Bonacci, 1987).

Fig. 4.- Differential flow gauging at each river section vs. river flow registered in the upstream point of each river section. (Based on Bonacci, 1987).

Conclusiones

La interacción entre las aguas subterráneas y superficiales en el río Guadalfeo presentó variaciones en la distribución tanto temporal como espacial. Los aforos diferenciales junto con los registros de nivel freático permitieron detallar con mayor exactitud que otros métodos indirectos las zonas en las que el río Guadalfeo alimenta el acuífero Motril-Salobreña o recibe aportaciones del mismo, así como cuantificar esas relaciones. La actividad humana, mediante la regulación del caudal del río, intervino de manera importante en la relación de ambos cuerpos de agua. Todo ello pone de manifiesto la fuerte relación existente río-acuífero y la importancia de tratarlos como un sistema único.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias a los fondos del proyecto CGL2016-77503-R financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER) y del grupo de investigación de la Junta de Andalucía RNM-369. Los autores también quieren agradecer la facilitación de los datos meteorológicos a la Red Hidrosur y los datos de caudales al Sistema de explotación de Béznar-Rules de la Consejería del Medio Ambiente y Ordenación del Terreno de la Junta de Andalucía. También a los revisores anónimos de este trabajo por sus sugerencias.

Tramos	Longitud del tramo (m)	Pérdidas de caudal (L/s)	Infiltración (hm ³ /año)	Infiltración por metro lineal (L/s.m)
A1-A2	1881	43.54	1.4	0.02
A2-A3	2583	117.5	3.7	0.05
A3-A4	1445	132.6	4.2	0.09
A4-A5	1130	-48.5	-1.6	-0.04

Tabla I.- Pérdidas de caudal (L/s), infiltración total (hm³) e infiltración por metro lineal (L/s.m) durante el año de medida.

Table. 1.- River flow loss (L/s), total infiltration (Mm³) and infiltration per linear meter (L/s.m) during the 1-year period.

Referencias

Bonacci. O. (1987). Karst Hydrology. Springer Verlag, Berlin, 184p.

Boulton, A.J. (1993). *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 44(4), 553-564.

Calvache, M.L., Rubio, J.C., López-Chicano, M., González-Ramón, A., Ibañez, S., Martín-Rosales, W., Soler, R., Díaz-Losada, E. y Peinado Parra, T. (2003). *Simpósio Internacional sobre Tecnología de la Intrusión de agua de mar en Acuíferos Costeros*. IGME, Madrid, 77-85.

Calvache, M.L., Ibañez, S., Duque, C., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rubio, J.C., González, A. y Viseras, C. (2009). *Hydrological Processes*, 23, 1268.1281.

Calvache, M.L., Sánchez-Úbeda, J.P., Duque, C., López-Chicano, M. y de la Torre, B. (2016). *Water Resources Management*, 30, 559-575.

Cey, E., Rudolph, D.L. y Parkin, G.W. (1998). *Journal of Hydrology*, 210, 21-37.

Duque, C., Calvache, M.L., Rubio, J.C., López-Chicano, M., González-Ramón, A., Martín-Rosales, W. y Cerón, J.C. (2005). In: VI SIAGA, *Libro de Comunicaciones*, 343-547.

Duque, C. (2009). *Influencia antrópica sobre la hidrogeología del acuífero Motril-Salobreña*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 196 p.

Duque, C., Calvache, M.L. y Engesgaard, P. (2010). *Journal of Hydrology*, 381, 121-133.

Duque, C., López-Chicano, M., Calvache, M.L., Martín-Rosales, W., Gómez-Fontalva, J.M. y Crespo, F. (2011). *Hydrological Processes*, 25, 2261-2274.

Harte, P. y Kiah, R. (2009). *Hydrogeology Journal*, 17, 409-424.

Krause, S., Bronstert, A., y Zehe, E. (2007). *Journal of Hydrology*, 347, 404-417.

Luc, L. (2004). *Journal of Hydrology*, 288, 312-326.

McCallum, A.M., Andersen, M.S. y Acworth, R.I. (2013). *Ground Water*, 52(2).

Penman, H.L. (1956). *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 4, 9-29.

Tsur, Y. y Graham-Tomasi, T. (1991). *Journal of Environmental Economics and Management* 21(3), 201-224.

Wood, E. F., Roundy, J.K., Troy, T.J., et al. (2011). *Water Resources Research* 47.

Winter, T.C., Harvery, J.M., Franke, O.L. y Alley, W.M. (1998). US Geological Survey Circular 1139.