

Aplicación de un modelo de flujo y del método de Darcy segmentado al cálculo de la descarga en una laguna somera. Caso de la laguna de Santa Olalla

Application of a flux model and segmented-Darcy approach to estimate the groundwater discharge to a shallow pond. Case of Santa Olalla pond

Miguel Rodríguez-Rodríguez¹, Sergio Martos-Rosillo², Ana Fernández-Ayuso¹ y Ricardo Aguilar¹

¹ Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales. Universidad Pablo de Olavide. C/Utrera, km 1, 41013. Sevilla
mrodod@upo.es; aferayu@upo.es; ragumar@alu.upo.es

² Instituto Geológico y Minero de España. Oficina de Granada. C/Ríos Rosas 23, 28003. Madrid
s.martos@igme.es

ABSTRACT

In this work, the segmented Darcy method and a flux model (TOPODRIVE) have been applied to estimate the groundwater contribution to an endorheic pond located near the Atlantic coast of the Iberian Peninsula, Santa Olalla pond (Doñana N.P.). This has been possible thanks to the daily data extracted from four piezometers located in the north, south, east and west of the pond. The results indicate a discharge to the pond of 1.32 hm³ during a period of seven months (summer and autumn, 2016). On the other hand, the analysis of the variations of groundwater level recorded in the deepest piezometer (c. 20 m depth) indicates a semidiurnal oscillation of several cm, which implies a tidal influence in the coastal aquifer. In the shallower piezometers (c. 3 m deep) a daily oscillation has been recorded, indicating that processes taking place in the unsaturated zone influence the water level.

Key-words: hydrogeological modelling, hydrological regime, coastal ponds, Doñana.

RESUMEN

En este trabajo se ha aplicado el modelo de flujo TOPODRIVE y se ha utilizado el método de Darcy segmentado para estimar los aportes hídricos subterráneos a una laguna endorreica situada cerca de la costa Atlántica de la Península Ibérica, la laguna de Santa Olalla (P.N. Doñana). Esto ha sido posible gracias a los datos diarios extraídos de cuatro piezómetros situados en el norte, sur, este y oeste de la laguna. Los resultados obtenidos indican una descarga hacia la laguna de 1,32 hm³ durante un periodo de siete meses (verano y otoño de 2016). Por otra parte, el análisis de las variaciones de nivel piezométrico registradas en el piezómetro más profundo (c. 20 m de profundidad) indican una oscilación semidiurna de varios cm, lo cual implica influencia mareal en el acuífero costero. En los piezómetros más someros (c. 3 m de profundidad) se ha registrado una oscilación diaria, lo que indica que el nivel somero está influenciado por procesos que tienen lugar en la zona no saturada.

Palabras clave: modelización hidrogeológica, régimen hídrico, lagunas costeras, Doñana

Geogaceta, 63 (2018), 27-30
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 1 de julio de 2017
Revisión: 9 de octubre 2017
Aceptación: 23 de octubre 2017

Introducción

El método de Darcy segmentado se ha utilizado frecuentemente para estimar el caudal de agua a través del medio saturado hacia lagunas endorreicas (Roseberry y Hayashi, 2013). En este tipo de ecosistemas, la descarga/recarga subterránea es el componente del balance hídrico más complejo de cuantificar. Por tanto, suelen usarse diferentes metodologías para estimar la componente subterránea del balance hídrico para contrastar los resultados de cada método, siendo el de Darcy segmentado uno de los utilizados habitualmente.

La laguna de Santa Olalla, situada sobre la formación de los mantos eólicos cuaternarios del Parque Nacional de Doñana (Almonte, Huelva, Fig. 1), ha sido objeto de investigaciones de índole hidrogeológica con anterioridad, por lo que se conoce su funcionamiento hidrogeológico con cierto detalle (Sacks *et al.*, 1992; Lozano, 2004; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2017). Es una laguna de flujo a través o *flow-through* de aguas subterráneas situada sobre un acuífero libre formado fundamentalmente por arenas finas eólicas. La descarga regional en el acuífero se dirige en dirección SO, hacia

el Océano Atlántico y hacia las marismas, al NE. Las lagunas constituyen sistemas de flujo locales y se forman en las depresiones, debido a la intersección de la superficie del terreno con el nivel freático. Dependiendo de la época del año, del estado de inundación de la laguna y de la posición del nivel freático, se forman diferentes sistemas de flujo de carácter regional y/o local (Lozano, 2004). Durante el periodo de estudio (Junio de 2016 a Enero de 2017) la laguna estuvo inundada. Alcanzó una profundidad máxima de 2 m y una profundidad mínima de 1,2 m. El objeto del presente estudio es comparar

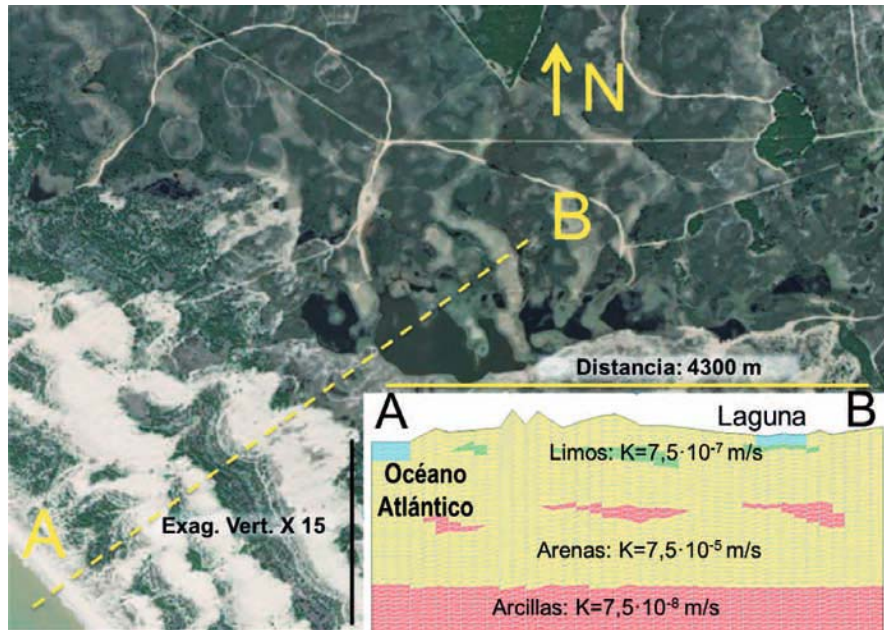


Fig. 1.- Distanciade la laguna de Santa Olalla (B) al Océano Atlántico (A), así como diagrama en el que se muestra la estructura y composición del acuífero de arenas en la zona de estudio.

Fig. 1.- Distance from Santa Olalla pond (B) to the Atlantic Ocean (A) as well as diagram in which the structure and composition of the sand aquifer in the study zone is illustrated.

el método de Darcy con el método del balance de masas, aplicado con anterioridad en la laguna, así como establecer un modelo hidrológico conceptual utilizando un modelo 2D de flujo.

Metodología

Se ha utilizado el modelo de flujo en 2D Topodrive (Hsieh, 2001), al que se han incorporado los elementos geométricos que configuran el modelo conceptual de funcionamiento de la laguna de Santa Olalla (Fig. 1). La información utilizada para elaborar el modelo está basada en los trabajos de Lozano (2004). El modelo hidrogeológico en este sector consiste en dos unidades acuíferas con diferente transmisividad separadas por una capa arcillosa que actúa como confinante respecto a la anterior. Para la modelización, se han tenido en cuenta la unidad superior de arenas (amarillo en Figs. 1 y 3) y la capa de arcillas semiconfinante (rojo). Las conductividades hidráulicas asignadas a las arenas se han obtenido mediante la reinterpretación de ensayos de bombeo en piezómetros cercanos a la laguna de Santa Olalla, utilizando el programa PIBE 2.0 (Padilla y Delgado, 2006). El mejor ajuste de la gráfica descenso-tiempo se obtuvo con el método de Neuman.

El uso de la ecuación de Darcy para determinar el caudal que atraviesa un medio

poroso se emplea comúnmente para estimar los intercambios entre aguas subterráneas y lagunas:

$$Q = -KA[(h_1 - h_2) / l]$$

donde Q (m^3/s) es el caudal que atraviesa el fondo de la laguna, K es la conductividad hidráulica (m/s), A (m^2) es el área de interfase entre el sedimento y el agua a través de la cual se produce el intercambio hídrico. En este trabajo, A se ha obtenido multiplicando



Fig. 2.- Perímetro de la laguna de Santa Olalla, cuenca hidrológica superficial y piezómetros empleados en el estudio. Se señala la división por segmentos de la laguna para la aplicación del método y el nivel piezométrico.

Fig. 2.- Santa Olalla pond perimeter, hydrological basin and piezometers used in the study case. The segments division of the pond for the applied method and piezometry is marked.

el espesor estimado de la unidad superior de arenas (b): entre 2 y 10 m (Sacks *et al.*, 1992) y la longitud de la orilla (Perímetro, P) en cada uno de los cuatro piezómetros (ver Fig. 2). Por otra parte, $h_1 - h_2$ o Dh es la diferencia entre el nivel piezométrico medido en un piezómetro cercano y la superficie de la laguna y l es la distancia desde el piezómetro hasta la orilla de la laguna en un momento determinado. La relación $\Delta h/l$ es el gradiente hidráulico (i), de tal forma que:

$$Q = -KAi$$

En este trabajo, se ha obtenido un valor diario para el gradiente hidráulico mediante el uso de transductores de presión instalados en la regleta de la laguna y los cuatro

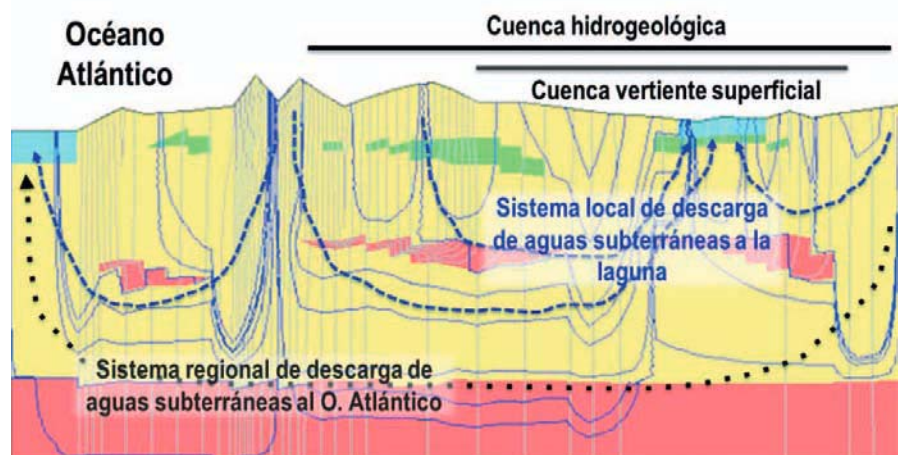


Fig. 3.- Modelo de flujo en la zona de estudio. Se señalan las dimensiones de la cuenca hidrogeológica y de la cuenca vertiente superficial. Se distingue también el sistema de flujo regional del local. La superficie representada corresponde al nivel piezométrico medio.

Fig. 3.- Flow model in the study zone. The dimension of the hydrogeological basin and the surface hydrological basin are signaled. The regional flow system can be distinguished from the local flow system. The surface corresponds to the average piezometric level.

piezómetros (N-S-E-W) durante 7 meses, concretamente desde el 25/06/2016 al 25/01/2017. El cálculo de Q se ha obtenido para cada día (en m^3/s). Posteriormente, se ha sumado este caudal para el periodo completo. La distancia orilla – piezómetro (l) y el perímetro (P) variaron durante el periodo de estudio. Por tanto, se ha utilizado un valor de verano (88 días) y otro de otoño (121 días) para obtener la distancia del piezómetro a la orilla y para el perímetro. En la tabla I, los valores de l y P son la media de los valores utilizados en verano y otoño. Finalmente, se realizaron perfiles de temperatura y conductividad del agua en la orilla O de la laguna para detectar posibles flujos verticales.

Resultados

El flujo de agua subterránea en la unidad superior de arenas se produce predominantemente de forma vertical descendente (Fig. 3). El frente de dunas constituye un umbral hidrogeológico (Fig. 2), de tal forma que, desde dicho umbral o divisoria, el flujo subterráneo se dirige hacia el mar y hacia la laguna de Santa Olalla. Por otra parte, se observa un sistema de flujo regional que descarga hacia el SO, lo cual coincide con la dinámica regional este acuífero (Lozano, 2004).

Además, se aprecia como la cuenca superficial de la laguna (delimitada con línea amarilla en la figura 2) es de menor tamaño que la cuenca hidrogeológica. Es decir, si bien el sistema de alimentación subterránea de la laguna de Santa Olalla es un sistema de flujo local, la cuenca hidrogeológica de dicho sistema es de mayor tamaño que la cuenca vertiente superficial.

En la tabla I se pueden observar los parámetros hidráulicos empleados para la estimación del caudal por el método de Darcy segmentado. Los gradientes medios (i) han sido de 0,01 (P-N), 0,06 (P-S), 0,03 (P-E) y 0,03 (P-O). Los resultados de descarga subterránea obtenidos en cada sector se muestran en hm^3 para todo el periodo estudiado. Los cuatro sectores totalizan una descarga de $1,32 hm^3$.

En la figura 4 se puede observar la evolución del nivel piezométrico en el piezómetro del oeste de la laguna de Santa Olalla (P-W), de 20 m de profundidad y ranurado de 14 a 17 m. En dicha figura, se observa claramente una oscilación semi-diurna de entre 2 y 4 cm, debida a la influencia de las

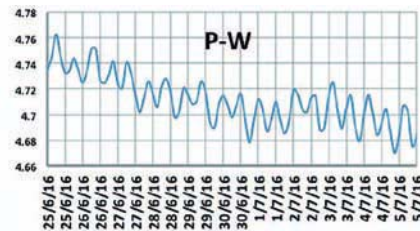


Fig. 4.- Evolución del nivel piezométrico, expresado en m sobre nivel del mar, en el P-W.

Fig.4.- Piezometric level, in m above sea level, in P-W.

mareas en el acuífero costero. Esto indica que el medio es suficientemente transmissivo como para que las subidas y bajadas mareales influyan en la masa de agua subterránea y prueba que la dinámica de la laguna de Santa Olalla está en estrecha relación con la dinámica del acuífero de los mantos eólicos. La figura 5 representa la evolución piezométrica, en este caso en el pozo del norte de la laguna de Santa Olalla (P-N).

Éste es un pozo abierto de gran diámetro y 3,5 m de profundidad que se encuentra retirado de la orilla y está a mayor cota. En el pozo no se observa con claridad una oscilación semi-diurna sino más bien diurna, lo cual estaría relacionado con procesos que tienen lugar en la zona no saturada. En cualquier caso, el descenso total del nivel piezométrico ha sido de 8 cm/10 días en ambos casos. Finalmente, se realizaron perfiles de temperatura en la orilla oeste de la laguna, donde se localiza el P-W. Se registró una marcada termoclina desde la superficie ($28,5\text{ }^\circ\text{C}$) hacia el fondo ($21,3\text{ }^\circ\text{C}$) en tan solo 22 cm de columna. A 10 cm bajo el fondo se registró una temperatura de $19,9\text{ }^\circ\text{C}$. El nivel piezométrico medido en P-W en la fecha del perfil fue de -53 cm (esto es, de 53 cm sobre la superficie del suelo) indicando que el acuífero en ese sector se encontraba confinado. Esto es indicativo de entradas de agua subterránea a menor temperatura desde el acuífero a la laguna.

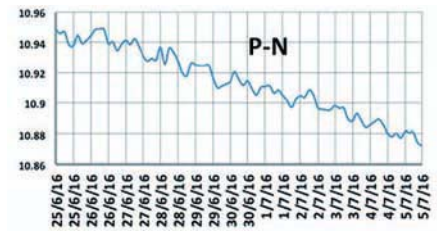


Fig. 5.- Evolución del nivel piezométrico, expresado en m sobre nivel del mar, en el P-N.

Fig. 5.- Piezometric level, in m above sea level, in P-N.

Discusión

Los caudales de descarga/recarga subterránea hacia la laguna de Santa Olalla han sido estimados por diferentes autores y por diferentes métodos desde principios de los años 90 del pasado siglo. Sacks *et al.* (1992) aplicaron un modelo en 2D para cuantificar flujos desde y hacia la laguna, así como transporte de solutos. Los resultados obtenidos por Sacks indican que la laguna de Santa Olalla se comporta como una laguna de descarga durante la fase húmeda de un ciclo hidrológico (año hidrológico 1990-91) pero advierten que durante la fase seca, se produciría recarga de aguas desde la laguna hacia el acuífero. Por tanto, la laguna es clasificada como de *flow-through* por dichos autores. Los resultados de los modelos aplicados indicaban también una lixiviación vertical de sales y el consecuente transporte de solutos desde la laguna hacia partes profundas del acuífero. Por otra parte, Manzano *et al.* (2009) indica que, en época seca, es el acuífero el que aporta agua a la laguna de Santa Olalla y hay precipitación de sales que, en las fases húmedas, son arrastradas desde la laguna hacia el acuífero. También clasifican a la laguna de Santa Olalla de *flow-through*. En el presente trabajo, los gradientes hidráulicos han sido, desde junio de 2016 a enero de 2017, positivos, esto es, la dirección de los flujos subterráneos fueron desde el acuífero a la laguna, lo que indica que el sistema ha sido

Piez.	K (m/s)	b (m)	l (m)	A (m^2)	Descarga (hm^3)	Piez.	K (m/s)
P-N	$7,5 \times 10^{-5}$	3	699	494	0,023	P-N	$7,5 \times 10^{-6}$
P-W	$7,5 \times 10^{-5}$	10	20	738	0,736	P-W	$7,5 \times 10^{-6}$
P-E	$7,5 \times 10^{-5}$	2	19	3500	0,486	P-E	$7,5 \times 10^{-6}$
P-S	$7,5 \times 10^{-5}$	2	20	660	0,080	P-S	$7,5 \times 10^{-6}$

Tabla I.- Parámetros hidráulicos empleados para la estimación del caudal por el método de Darcy segmentado y resultados obtenidos en cada sector.

Table I.- Hydraulic parameters for the estimation of the discharge volume by segmented Darcy method and obtained results by sector.

de descarga durante ambas estaciones. Sin embargo, en periodos más lluviosos sí se ha detectado inversión en el gradiente. Por otra parte, la conductividad eléctrica (C.E.) media en el agua subterránea en los piezómetros varía entre 0,2 mS/cm (P-W) y 1,5 mS/cm (P-E) son, por tanto, aguas dulces o ligeramente salobres hacia el E.

En anteriores trabajos, las tasas de descarga subterránea estimadas mediante balances hídricos de detalle totalizan un aporte subterráneo de 0,40 hm³/año durante el año 2015 (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2017) y de 0,38 hm³/año durante 2016 (Hidalgo-Calvente, 2017). Estos valores son netamente inferiores a los 1,3 hm³ estimados en el presente estudio mediante el método de Darcy segmentado. Dada la estrecha relación entre la laguna y el acuífero, y que ésta es de *flow-through* (Fig. 3), es muy probable que el método de Darcy sobreestime los caudales de descarga hacia la laguna. Parte de esta descarga debe dirigirse hacia la costa o hacia el ecotono de la Vera. La oscilación semi-diurna, registrada en los piezómetros más profundos y relacionada con la influencia mareal, ha sido también puesta de manifiesto en otros acuíferos costeros andaluces (Nieto-López *et al.*, 2016, Sánchez-Úbeda, *et al.*, 2013a; 2013b). Finalmente, en la red de piezómetros instalados por el IGME se ha constatado la afección que los bombeos para riego y abastecimiento están produciendo en el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas asociados a la descarga de las aguas subterráneas (Rebollo *et al.*, 2008). Dicha afección ha modificado el equilibrio hidrológico en el acuífero de los mantos eólicos (Manzano *et al.*, 2009).

Conclusiones

En este trabajo se ha constatado que el método de Darcy segmentado aplicado a la estimación de la descarga subterránea hacia la laguna de Santa Olalla ha aportado valores que se encuentran por encima de los obtenidos en trabajos previos mediante otros métodos. Por otra parte, el empleo de modelos 2D de flujo en medio saturado ha contribuido a confirmar y mejorar el modelo conceptual de funcionamiento hídrico de esta laguna de tránsito, dependiente de las aguas subterráneas para su funcionamiento y el mantenimiento de su hidroperiodo. Finalmente, el análisis detallado de la evolución de los niveles en piezómetros profundos (20 m) ha puesto de manifiesto la conexión hidráulica del sistema de la laguna de Santa Olalla con el acuífero costero de los mantos eólicos de Doñana.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Universidad Pablo de Olavide "Monitorización hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en humedales de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (lagunas de los Mantos Eólicos de Doñana)". La financiación de la EBD-CSIC (Proyecto Life Watch) ha posibilitado instalar sensores de nivel en la laguna de Santa Olalla. Este trabajo es una contribución del grupo RNM-126 de la Junta de Andalucía. Finalmente, agradecemos la labor de dos revisores anónimos puesto que han mejorado sustancialmente la calidad del manuscrito definitivo.

Referencias

- Hidalgo-Calvente, A. (2017). *Modelización hidrológica y estimación de la descarga diaria de aguas subterráneas en una laguna somera*. Trabajo Fin de Grado. Univ. Pablo de Olavide. Sevilla, 21p.
- Hsieh, P.A. (2001). *Topdrive and Particle flow—Two computer models for simulation and visualization of ground-water flow and transport of fluid particles in two dimensions*. US Geological Survey, 286p.
- Lozano, E. (2004). *Las aguas subterráneas en Los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas*. Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Cataluña, 316p.
- Manzano, M., Custodio, E., Higuera, H., Puig, R. y Soler, A. (2009). *Boletín Geológico y Minero* 120, 377-392.
- Nieto-López, J.M., Andreo-Navarro, B. y Mudarra-Martínez, M. (2016). *Geogaceta* 59, 39-42.
- Padilla, A. y Delgado, J., (2006). *PIBE 2.0. Programa de Interpretación de Bombeos de Ensayo. Manual del usuario*. Diputación Provincial de Alicante, 200 p.
- Rebollo, A.M., Mediavilla, C., Ruiz, F. y Díaz, A.F. (2008). En: *VII Simposio del Agua en Andalucía, Comunicaciones II*, 655-664.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Fernández, A. y Moral, F. (2017). *Geogaceta* 61, 47-50.
- Roseberry, D.O. y Hayashi, M. (2013). En: *Wetland techniques* (J. Anderson y C. Davis, Eds.), Springer Netherlands, 87-225.
- Sacks, L.A., Herman, J.S., Konikow, L.F. y Vela, A.L. (1992). *Journal of Hydrology* 136 (1-4), 123-154.
- Sánchez-Úbeda, J.P., Calvache, M.L., Duque, C. y López-Chicano, M. (2013a). *Geogaceta* 53, 131-134.
- Sánchez-Úbeda, J.P., Calvache, M.L., López-Chicano, M., Duque, C. y Martín, W. (2013b). *Geogaceta* 53, 121-124.