

Cuantificación de los aportes hídricos subterráneos a la laguna de Santa Olalla a partir de balances hídricos diarios (Parque Nacional de Doñana, Huelva)

Groundwater input quantification to Santa Olalla pond by means of daily water balances (Doñana National Park, Huelva)

Miguel Rodríguez-Rodríguez, Ana Fernández-Ayuso y Francisco Moral

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

ABSTRACT

In this project, a daily water balance in Santa Olalla interdunal pond, one of the few ones with permanent hydroperiod in Doñana National Park, has been made. The balance was made by determining the water inputs and outputs, using meteorological data from nearby stations as well as three-hours interval data of the water level in the pond. The results indicate a groundwater input of 0.39 hm³ to the pond from January 2015 to March 2016, compared to 0.11 hm³ by direct precipitation. The groundwater level in nearby piezometers located on the dunal aquifer remained above the water level of the pond during the study period. Maintaining the water table levels in the unconfined aquifer is of vital importance to assure the groundwater input to the pond in the future. For this reason, groundwater withdrawals in this unique ecosystem must be monitored and appropriately managed.

Key-words: Wetlands, surface water – groundwater interaction, Doñana N.P.

RESUMEN

En este estudio se ha realizado un balance hídrico a escala diaria en la laguna de Santa Olalla, una de las pocas lagunas de hidroperiodo permanente del Parque Nacional de Doñana. El balance volumétrico se ha realizado determinando las salidas y entradas a partir de los datos meteorológicos de estaciones cercanas y de los registros trihorarios del nivel del agua de la laguna. Los resultados indican unos aportes por escorrentía, mayoritariamente subterránea, a la laguna de 0,39 hm³ desde enero de 2015 a marzo de 2016, frente a 0,11 hm³ de entradas por precipitación directa. El nivel freático en piezómetros cercanos, ubicados en las arenas del manto eólico, se mantuvieron por encima de la cota de lámina de agua libre de la laguna durante el periodo de estudio. El mantenimiento de estos niveles en el acuífero libre es de vital importancia para que no se comprometa esta aportación subterránea en el futuro, para lo cual se debe controlar y mantener la vigilancia de las extracciones de agua subterránea en el entorno de este ecosistema singular.

Palabras clave: Humedales, relación aguas superficiales – aguas subterráneas, P.N. Doñana.

Geogaceta, 61 (2017), 47-50
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 30 de junio de 2016
Revisión: 3 de noviembre de 2016
Aceptación: 25 de noviembre 2016

Introducción

Las extracciones de aguas subterráneas en el área de Doñana han provocado un impacto hidrológico en algunas zonas del Parque, tal y como advierten desde hace varios años diversos organismos (Custodio *et al.*, 2009). El acuífero de Doñana se extiende por unos 2600 km² de las provincias de Huelva y Sevilla. Este territorio depende en gran medida de las aguas subterráneas para el abastecimiento a poblaciones y para el regadío de cultivos. Sobre este acuífero se sitúa el Espacio Na-

tural de Doñana, que posee una superficie protegida (Parque Nacional y Parque Natural) próxima a 1080 km². Muchos de los ecosistemas de Doñana dependen de las aguas subterráneas, que en amplios sectores se encuentran a muy poca profundidad. Los acuíferos también alimentan a numerosas lagunas estacionales y permanentes y a los principales arroyos de la zona Olías Álvarez y Rodríguez-Rodríguez, 2013. Existen evidencias de que los descensos piezométricos originados por la extracción de aguas subterráneas están produciendo cambios en la vegetación, la

deseccación o disminución de los niveles de agua en lagunas próximas a Matalascañas, así como la disminución de los aportes hídricos a arroyos. (i.e. Serrano y Serrano, 1996; Muñoz Reinoso, 2001; Serrano *et al.*, 2008; Custodio *et al.*, 2009; Manzano *et al.*, 2009). La laguna de Santa Olalla se sitúa en la zona de reserva biológica del Parque Nacional, a sólo 4 km de la población de Matalascañas. Es la más extensa de las numerosas lagunas existentes en relación con el manto eólico de Doñana. Como se puede observar en la figura 1, forma parte del sistema lacustre



Fig. 1.- Localización de las lagunas de Santa Olalla, Dulce y de Las Pajas, de los piezómetros P1, P2 y P3, y la estación meteorológica del Palacio de Doñana. Asimismo, se señala la ubicación de otras lagunas asociadas al manto eólico de Doñana (Brezo, Charco del Toro, Zahillo y Taraje) y del núcleo urbano de Matalascañas. En violeta, la delimitación de la cuenca superficial del sistema Dulce-Olalla-Las Pajas.

Fig. 1.- Location of Santa Olalla, Dulce and Las Pajas ponds and P1, P2, P3 piezometers and Palacio de Doñana weather station. Also the location of other ponds associated with the sand dunes of Doñana (Brezo, Charco del Toro, Zahillo and Taraje) and the town of Matalascañas. The delimitation of the surface basin of the system Olalla-Dulce-Pajas is shown in purple.

Dulce-Olalla-Las Pajas, ya que en épocas de aguas altas todas estas lagunas forman un cuerpo de agua continuo. La cuenca superficial del sistema Dulce-Olalla-Pajas tiene una superficie total de 500 ha (Fig. 1). En las inmediaciones de la laguna se han perforado tres piezómetros someros (P1, P2 y P3). También se muestra la localización de un sensor de C.E., temperatura y presión de la columna de agua, instalado en la zona más profunda de la laguna y la situación de la estación meteorológica del Palacio de Doñana. Cabe mencionar, por último, la proximidad de la línea de costa (2,6 km) a la laguna. El objetivo de este trabajo es la realización de un balance hídrico a escala diaria de la laguna de Santa Olalla, una de las pocas de hidropereodo permanente de Doñana, para determinar en qué medida esta laguna es dependiente de las aportaciones subterráneas del acuífero del manto eólico. El balance volumétrico, realizado a partir de datos meteorológicos y de los registros del nivel del agua medidos en la regleta de la laguna, ha permitido una notable mejora del conocimiento de su funcionamiento hídrico, así como la cuantificación de las principales entradas y salidas de agua al sistema hídrico. Finalmente, las medidas de temperatura y conductividad eléctrica del agua y el análisis químico de las muestras tomadas en los piezómetros y en la laguna han permitido la caracterización físico-química de las aguas subterráneas y superficiales de la zona de estudio.

Materiales y métodos

En cada uno de los piezómetros comentados anteriormente se han colocado sensores de nivel de agua (Diver®), programados para tomar medidas trihorarias de niveles de agua subterránea. Por otro lado, en la regleta de la laguna se ha instalado un sensor de tipo CTD, capaz de medir la conductividad eléctrica, temperatura y profundidad de la lámina de agua,

programado para hacerlo también de forma trihoraria. El análisis químico de componentes mayoritarios en las muestras de agua tomadas en la laguna de Santa Olalla se ha realizado mediante un cromatógrafo iónico DIONEX, modelo ICS-1000. Se ha empleado el programa TRASERO (Padilla y Delgado, 2012), para la estimación de la escorrentía para diferentes capacidades de campo. Las entradas por precipitación (P) se han calculado a partir de los datos de estaciones meteorológicas cercanas (Almonte-Rocío y Palacio de Doñana), una vez analizadas y corregidas las series. Para calcular las salidas por evaporación (E) se ha aplicado la fórmula original de Penman (1956), que según McMahon *et al.* (2013) es el método más adecuado para lagunas someras, y que ha dado buenos resultados en otras lagunas de la cuenca baja del río Guadalquivir (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2016). Los cambios de volumen de agua almacenado en la laguna ($\Delta\theta$) se han determinado a partir de los registros de nivel medidos en la regleta de la laguna. La escorrentía (Esc.) se ha calculado por diferencia, mediante la ecuación: $Esc. = E - P \pm \Delta\theta$. Todos los componentes se han determinado en mm/día. Para el cálculo de dichos componentes en volumen se ha utilizado la curva hipsométrica de la cubeta lacustre.

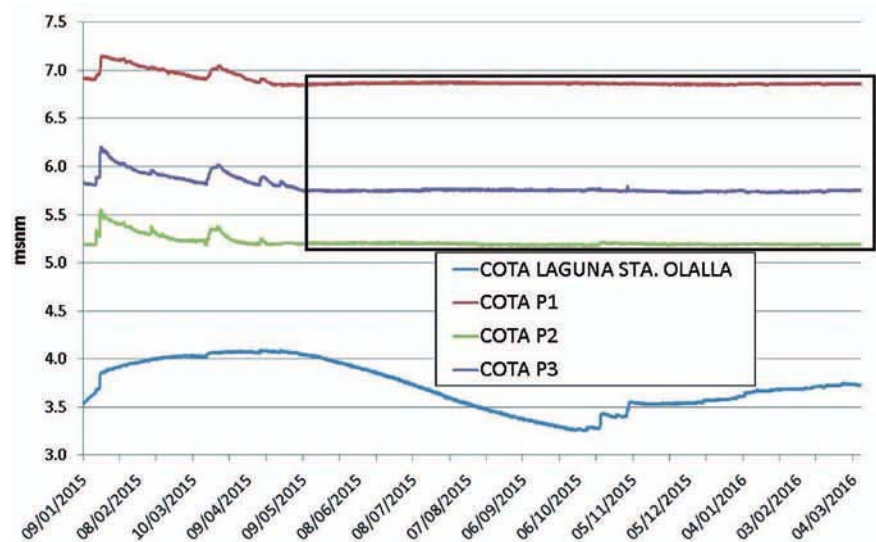


Fig. 2.- Evolución de los niveles de agua en los piezómetros (P1, P2 y P3) y en la laguna de Santa Olalla. *A partir de mayo de 2015, y hasta el final del periodo de estudio, los piezómetros someros (1 m de profundidad) no registraron nivel (ver recuadro). En cualquier caso, se comprobó que los niveles no descendieron bajo la cota de la laguna en piezómetros cercanos instalados por el IGME.

Fig. 2.- Evolution of the water level in the piezometers (P1, P2 and P3) and in Santa Olalla pond. *From May 2015 until the end of the study period, shallow piezometers (1 m deep) did not show any level record (see box). Anyhow, levels did not fall below the pond level in nearby piezometers installed by the IGME.

Resultados

Durante el periodo de estudio, las entradas de agua a la laguna se han producido por precipitación directa sobre el vaso lacustre y por escorrentía que, dada la elevada permeabilidad de los materiales arenosos sobre los que se ubica la laguna, es mayoritariamente subterránea. Las salidas se han producido casi exclusivamente por evaporación desde la lámina de agua superficial. En la figura 2 se observa la variación de niveles en cada uno de los piezómetros, así como la variación del nivel de la laguna durante el periodo de estudio. La cota piezométrica en el acuífero se sitúa entre 2 y 4 m por encima de la cota de la laguna. Se aprecia que el piezómetro 1, situado al N, registra subidas de nivel al comienzo del periodo de estudio menos pronunciadas que los otros dos piezómetros, situados al S. Por otro lado, cabe resaltar que tanto el nivel de la laguna como el de los piezómetros experimenta una subida en los valores registrados en los meses de enero a mayo, que coincide con un periodo de abundantes precipitaciones (Fig. 3). A partir de esa fecha, los piezómetros, de 1 m de profundidad, no registran nivel. En la figura 3, se muestra la evolución de las precipitaciones, conductividad eléctrica, nivel de la laguna y temperatura del agua. A principios del periodo de estudio, invierno de 2015, se registran fuertes precipitaciones que llegan a superar 4 cm diarios, lo que se traduce en una importante subida del nivel del agua de la laguna en torno a 50 cm. Por ejemplo, el 18 de enero de 2015 desde las 9h hasta las 12h se produce un aumento del nivel del agua de 9 cm y un ascenso paulatino hasta mayo de 2015. Desde mayo de 2015 a octubre del mismo año, se produce un descenso del nivel (0,8 m en total). Las precipitaciones ocurridas en el otoño de 2015 provocan un aumento del nivel de casi 30 cm. A partir de este momento y hasta principios de marzo hay un ascenso suave del nivel de 20 cm. En el caso de la temperatura, se observa una oscilación anual, con valores máximos en verano (29,8°C) y mínimos en invierno (9,44°C), así como una bajada de temperaturas cuando se producen precipitaciones. Los valores de conductividad eléctrica del agua experimentan una importante subida de más de 5 mS/cm a finales de enero de 2015 hasta principios de febrero de 2015, momento en el cual empiezan a disminuir de forma progresiva hasta julio

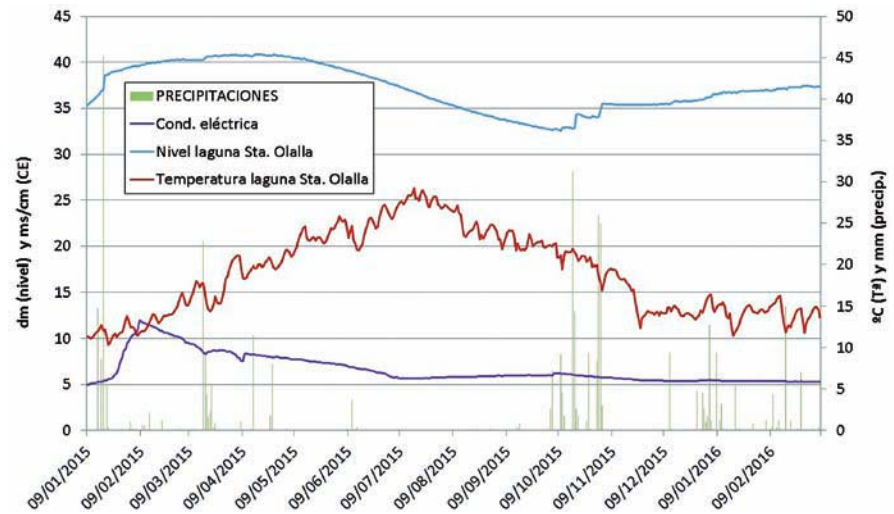


Fig. 3.- Serie de precipitaciones en el periodo de estudio registradas en la estación meteorológica del Palacio de Doñana. Evolución de la conductividad eléctrica, nivel (dm sobre el nivel del mar) y temperatura del agua en la laguna de Santa Olalla.

Fig. 3.- Series of rainfall during the study period recorded in the weather station Palacio de Doñana. Evolution of the electrical conductivity, stage (dm above sea level) and temperature of the water in Santa Olalla pond.

del mismo año. A partir de ahí la conductividad se mantiene estable en torno a los 5 mS/cm, hasta el final del periodo de estudio. Los resultados del balance hídrico, expresados como valores acumulados del volumen (m^3) se pueden observar en la figura 4, distinguiéndose las entradas (precipitaciones y escorrentía) de las salidas (evaporación) y la variación acumulada en el almacenamiento a escala diaria. La escorrentía se ha calculado a partir de la fórmula del balance hídrico ($Esc. = E - P \pm \Delta\theta$). Se observa un incremento progresivo de la escorrentía, por lo que la entrada de agua a la laguna por esta vía es constante. Existen tres momentos en los que se observan incrementos mayores en el nivel, que corresponderían con episodios de entrada por escorrentía superficial. Las salidas en este caso son debidas a la evaporación y, en ocasiones, a la descarga de la laguna al acuífero, como se puede observar en los descensos en la escorrentía de finales de octubre a principios de noviembre de 2015. Las entradas por precipitación directa fueron de 399 mm (equivalentes a 0,118 hm^3). Los volúmenes de escorrentía calculados mediante el balance fueron de 0,392 hm^3 , mientras que la salida mayoritaria se produjo por evaporación, 1810 mm (equivalentes a 0,461 hm^3). El incremento en almacenamiento ($\Delta\theta$) fue moderado. La conductividad eléctrica media del agua de la laguna fue de 6,65 mS/cm y la mediana de 5,92 mS/cm. La temperatura fue relativamente elevada (18,67°C de media), es-

tando por encima de la temperatura del aire (16,84°C) la mayor parte del año. La profundidad media de la laguna fue de 1,27 m. La máxima profundidad alcanzada fue de 1,64 m (abril de 2015) y la mínima 0,8 m (noviembre de 2015). Las aguas de la laguna son de tipo clorurado sódicas, con una salinidad total de 4086 mg/l. Por otro lado las aguas subterráneas próximas a la laguna, muestreadas en los piezómetros, son dulces, de tipo bicarbonatado-sódicas con una salinidad media de 183,14 mg/l.

Discusión

Si bien el acuífero de los mantos eólicos está formado fundamentalmente por arenas (dunas), también hay depósitos menos permeables a diferentes profundidades (limos orgánicos y arcillas), lo que influye en que este sistema sea hidrogeológicamente complejo (Custodio *et al.*, 2009). La formación de lagunas temporales en determinadas zonas está condicionada, por tanto, por ser sectores de descarga local de las aguas subterráneas del acuífero y, probablemente, por la presencia de materiales de baja permeabilidad en profundidad. Tal y como ya se comprobó a comienzos de la década del año 2000 mediante métodos isotópicos e hidroquímicos (Lozano, 2004; Lozano *et al.*, 2001; Lozano *et al.*, 2002) la laguna de Santa Olalla recibe una importante contribución de las aguas subterráneas del acuífero libre de los mantos eólicos. En este trabajo, se ha constatado que esta

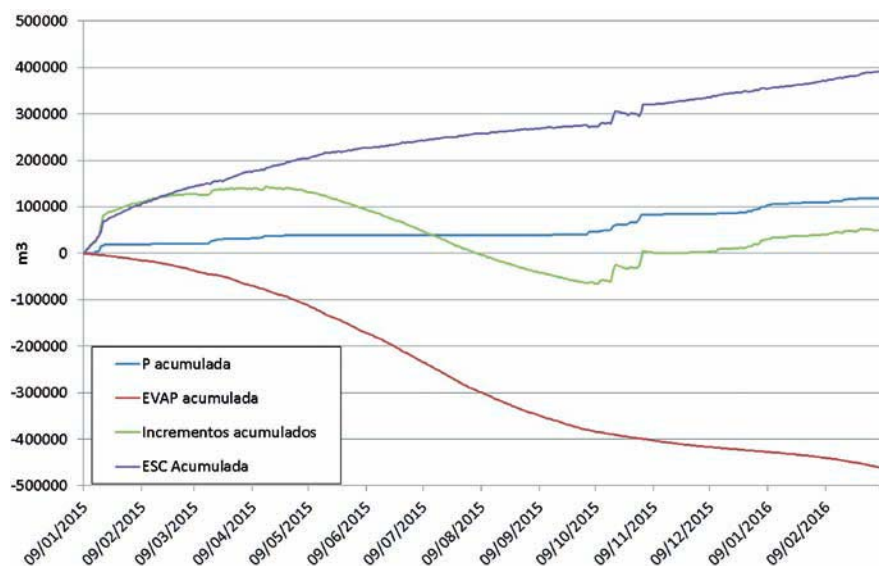


Fig. 4.- Balance hídrico diario. Los valores se presentan como acumulados de las precipitaciones, evaporación, almacenamiento y escorrentía.

Fig. 4.- Daily water balance. Data set is presented as accumulated values of rainfall, evaporation, storage and net groundwater flux.

alimentación alcanza el 78% del total de las entradas durante el periodo de estudio, asumiendo que la totalidad de la escorrentía necesaria es de origen subterráneo. Tan solo en momentos puntuales de elevada descarga y entradas por precipitación a la laguna, se aprecia que la laguna recarga el acuífero. Estos periodos de infiltración se traducen en un cambio de la pendiente en la curva de escorrentía acumulada (e.g. tras las fuertes precipitaciones de octubre de 2015). Aun así, es la evaporación directa la responsable de las principales salidas hídricas del sistema (>95%). Esta es la razón por la cual las aguas de la laguna son salobres: la entrada se produce con aguas subterráneas y de lluvia de baja salinidad (< 0,2 g/l) y las salidas se producen por evaporación, por lo que las sales permanecen en el sistema, incrementándose poco a poco la salinidad del agua de la laguna. El incremento de CE detectado al comienzo del estudio, y posterior descenso (Fig. 3) podría deberse al ascenso de una capa meromítica, aunque esta hipótesis no ha sido aún contrastada en campo. Finalmente, se ha estimado el tamaño de la superficie mínima de alimentación (i.e. la cuenca hidrogeológica) a la laguna de Santa Olalla y al sistema completo (Dulce-Olalla-Pajas). Este cálculo se ha realizado asumiendo unas entradas subterráneas de 0,39 hm³ durante el periodo de estudio. Posteriormente, se han realizado balances de agua en el suelo para dicho periodo con diferentes valores de reserva útil. Para obtener las en-

tradas citadas, y con una reserva útil entre 60 y 75 mm (Guardiola, C, *com. pers.*), la cuenca hidrogeológica del sistema Dulce-Olalla-Pajas tiene, al menos, una extensión superficial entre 2200 y 6300 has. Es decir, la cuenca hidrogeológica es sensiblemente mayor que la superficial (500 has). Por lo tanto, es de vital importancia continuar con la supervisión y el control de las extracciones de aguas subterráneas y monitorizar de manera continua los niveles piezométricos en el entorno de la laguna, tanto los niveles someros como los profundos.

Conclusiones

El balance hídrico a escala diaria realizado en la laguna de Santa Olalla pone de manifiesto una importante contribución de flujos subterráneos en la alimentación de la laguna (78%, frente al 22% de entradas por precipitación directa). Las principales salidas se producen por evaporación, salvo durante cortos episodios de intensas precipitaciones en los que la laguna recarga al acuífero. Las aguas son salobres y los niveles en piezómetros someros cercanos se mantuvieron sobre el nivel de agua de la laguna, lo que confirma los resultados obtenidos en el balance hídrico.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido posible gracias al convenio LIFE- Watch (EBD-CSIC).

Agradecemos a la Dra. C. Díaz-Paniagua su ayuda en las tareas de campo. Este estudio forma parte del convenio entre la Confederación Hidrológica 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)". El técnico de laboratorio J.M. Bruque Carmona ha colaborado en la elaboración de las figuras presentadas. Asimismo, agradecemos a un revisor anónimo y al Dr. J. Benavente sus aportaciones y consejos para la mejora de este manuscrito.

Referencias

- Custodio, E., Manzano, M. y Montes, C. (2009). *Las aguas subterráneas en Doñana: Aspectos ecológicos y sociales*. Ed. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. 243 p.
- Lozano, E., Delgado, F., Manzano, M. y Custodio, E. (2001) En: Congreso en Memoria de Germán Galarza. Barcelona 379-385.
- Lozano, E., Coletto, C., Manzano, M. y Custodio Gimena, E. (2002). In: 17th Salt Water Intrusion Meeting. 238-249
- Manzano, M., Custodio, E., Higuera, H., Puig, R. y Soler, A. (2009). *Boletín Geológico y Minero* 120, 377-392.
- McMahon, T. A., M. C. Peel, L. Lowe, R. Srikanthan y T. R. McVicar, (2013). *Hydrology and Earth System Sciences* 17(4): 1331-1363.
- Muñoz Reinoso, J.C. (2001). *Journal of Hydrology* 242, 197-209.
- Ollas Álvarez, M. y Rodríguez-Rodríguez, M. (2013). En: X Simposio de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos 30, 1121-1130.
- Padilla, A. y Delgado, J. (2012). Tratamiento y Gestión de series temporales hidrológicas (TRASERO). Diputación de Alicante. CD-ROM.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Fernández, A. y Moral, F. (2016). *Hydrobiologia* 782:155-168.
- Serrano, L. y Serrano, L. (1996). *Journal of Environment Management*. 46, 229-238.
- Serrano, L., Esquivias-Segura, M. P. y Zunzunegui, M. (2008). *Limnetica* 27(1), 65-77.