

## **CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO Y APROXIMACIÓN AL BALANCE HÍDRICO DE LAS LAGUNAS AMARGA Y DE LOS JARALES (LUCENA, CÓRDOBA)**

**Salamanca, 12-15 noviembre 2018**

**José Manuel GIL MÁRQUEZ\*, Bartolomé ANDREO NAVARRO\*, Matías MUDARRA MARTÍNEZ\* y Luis LINARES GIRELA\*\***

(\* ) Departamento de Ecología y Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Facultad de Ciencias s/n. E-29071, Málaga [josemgil@uma.es](mailto:josemgil@uma.es), [andreo@uma.es](mailto:andreo@uma.es), [mmudarra@uma.es](mailto:mmudarra@uma.es)

(\*\*) Academia Malagueña de Ciencias. C/Moratín, 4 (1º-2), E-29015, Málaga. [luislinares@telefonica.net](mailto:luislinares@telefonica.net)

### **RESUMEN**

La génesis de las lagunas Amarga y de Los Jarales (Lucena, Córdoba) está asociada a la karstificación de los materiales arcilloso-evaporíticos triásicos (Keuper) del Complejo Caótico Subbético (CCS). Con objeto de determinar el grado de relación entre las aguas subterráneas y las lagunas se han efectuado (1) un registro limnimétrico automatizado y un control climático en sus inmediaciones que ha permitido cuantificar las componentes de entrada (precipitación y escorrentía) y salida (evaporación) de los humedales, y (2) campañas de piezometría para caracterizar el sentido de los flujos subterráneos. La morfología de la cubeta de la laguna de Los Jarales se ha precisado a partir de datos LiDAR. Finalmente, se han simulado las evoluciones limnimétricas de ambas lagunas, utilizando diferentes métodos para el cálculo de la escorrentía.

Los resultados obtenidos han permitido precisar los balances hídricos de ambos humedales durante varios años secos y constatar que la relación humedal-agua subterránea influye sobre la dinámica de las dos lagunas, aunque en distinto grado. Un control hidrometeorológico más prolongado ayudaría a profundizar en el conocimiento del funcionamiento hídrico de ambas lagunas, lo que facilitaría las tareas de gestión y conservación.

**Palabras clave:** *humedal kárstico-evaporítico, balance hídrico, simulación limnimétrica*

### **INTRODUCCIÓN**

Las lagunas Amarga y de Los Jarales (Lucena, Córdoba) son Reservas Naturales incluidas en el listado de humedales del Convenio de Ramsar y catalogadas como Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA). El origen de ambos humedales se relaciona con procesos de

disolución/karstificación de los materiales evaporíticos (yeso y halita) infrayacentes, embebidos estos en una matriz arcillosa triásica que constituye la mayor parte de los llamados Complejos Caóticos Subbéticos (CCS). Pese a que el origen de ambas lagunas es similar, presentan distinto funcionamiento hídrico y también difieren en lo que se refiere a su balance. Los trabajos previos efectuados en la zona (ALJIBE-CONSULTORES, 2005; CMA, 2005, CHG, 2008, MORAL et al., 2013; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ et al., 2016) han descrito el comportamiento hídrico de ambos humedales y cuantificado los elementos que componen sus balances. Aunque las conclusiones alcanzadas en todos ellos son similares, los parámetros utilizados en las simulaciones limnimétricas realizadas difieren notablemente, en parte porque ni el periodo de observación ni la frecuencia de monitorización/modelización son las mismas.

El objetivo de este trabajo es avanzar en la comprensión del funcionamiento hídrico de las lagunas Amarga y de Los Jarales, con especial énfasis en la relación existente entre los humedales y las aguas subterráneas. Para ello se han realizado simulaciones de las variaciones limnimétricas a paso de tiempo diario, para las cuales se ha tenido en cuenta el contexto hidrogeológico del entorno. Asimismo, se pretende analizar la aplicabilidad de distintas metodologías para el cálculo de los elementos de entrada a las lagunas; en concreto, la escorrentía superficial.

## **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Las lagunas Amarga y de Los Jarales se ubican en un altiplano de 80 km<sup>2</sup> de superficie que se extiende entre los ríos Genil, al sur, y Anzur, al norte (Figura 1.1). Los materiales que afloran pertenecen a los CCS y están constituidos por una megabrecha arcilloso-evaporítica en la que hay embebidos bloques de distinta naturaleza (VERA y MARTÍN-ALGARRA, 2004), muchos de los cuales son de naturaleza carbonática. Discordantes sobre las rocas de los CCS hay depósitos postorogénicos formados por areniscas, conglomerados, margas y calcarenitas de edades comprendidas entre Mioceno y Cuaternario (Figura 1.2 y 1.3).

El relieve es alomado, con pendientes suaves y abundante presencia de zonas endorreicas, en alguna de las cuales existen humedales (Figura 1.1). Además, en el área hay manantiales y pequeños rezumes, así como pozos y sondeos, que evidencian la existencia de flujos de agua subterránea (CMA, 2005; GIL-MÁRQUEZ, 2018). En la zona central del área de estudio, a 407 m s.n.m., se sitúa la laguna de Los Jarales (Figura 1.3), un humedal estacional de 5 ha de superficie media de inundación y más de 3 m de altura máxima de lámina de agua. No presenta inundación durante los años más secos, aunque puede mantener lámina de agua en el estío en periodos húmedos. La laguna Amarga se encuentra 3 km al NO de la anterior (Figura 1), a 366 m s.n.m. Su cubeta es profunda y su hidroperiodo permanente. Su columna de agua varía entre 2,5 m y cerca de 6 m de altura, según las condiciones hidroclimáticas, y su superficie de inundación media es de 4 ha. Las cuencas vertientes a las lagunas de Los Jarales y Amarga tienen 90,4 y 256,9 ha, respectivamente. En ellas afloran depósitos postorogénicos (Mioceno-Cuaternario) de margas, areniscas y conglomerados, además de materiales arcilloso-evaporíticos de los CCS (Figura 1.2 y 1.3). Estos últimos son más abundantes en la cuenca de la laguna Amarga, en la que también existen bloques dolomíticos.

El clima en la región es de tipo mediterráneo subcontinental, con veranos muy cálidos y secos. Los valores medios anuales históricos de la precipitación y temperatura del aire son 508 mm y 17,2°C, respectivamente (GIL-MÁRQUEZ, 2018). El periodo de control incluido en el presente estudio (2014/15-2016/17) puede considerarse seco, con valores de

precipitación anual de 324 mm (2014/2015), 403 mm (2015/16) y 366 mm (2016/17), registrados en una estación ubicada en el centro del altiplano (Figura 1.1).

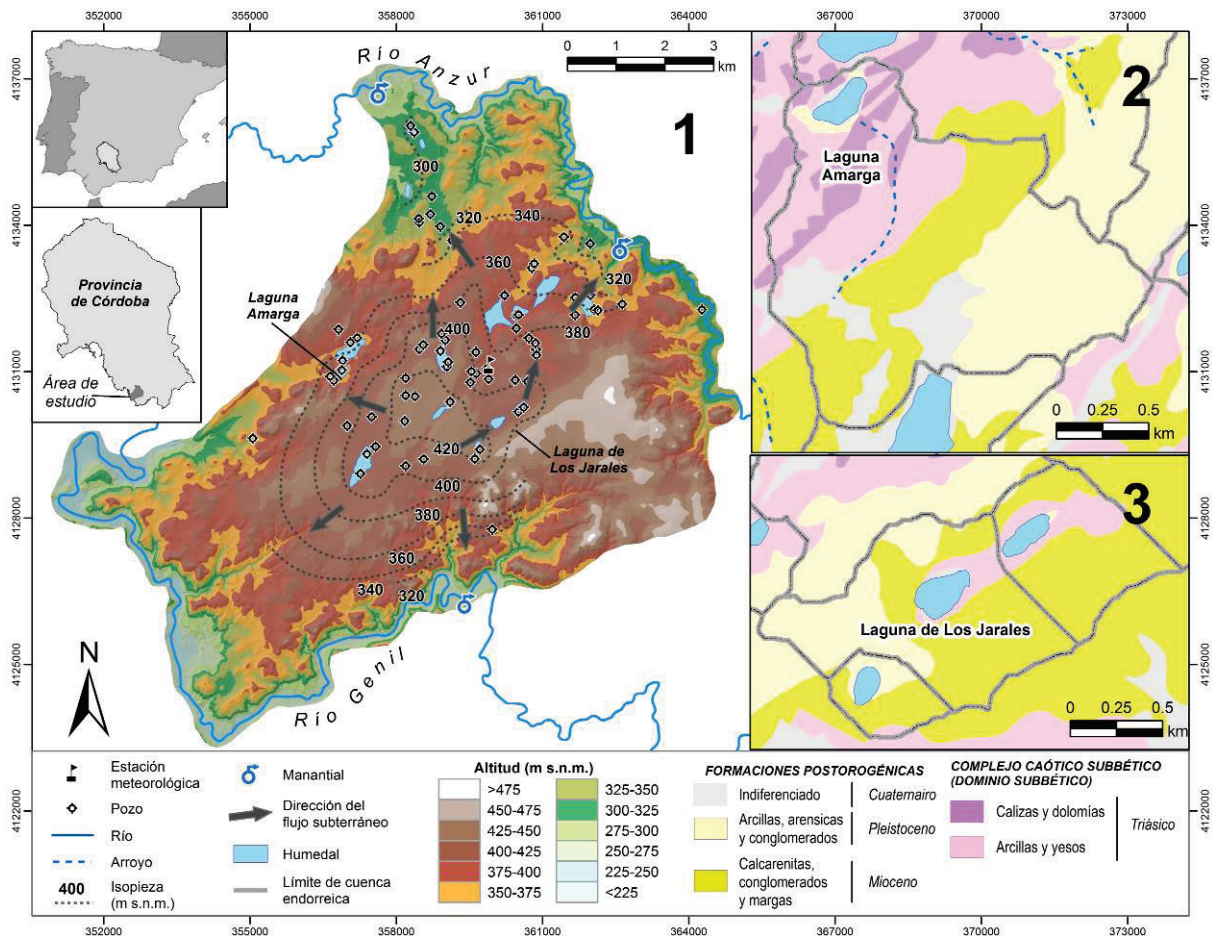


Figura 1. Marco geográfico, esquema piezométrico del área de estudio (1) y geología de las cuencas vertientes a las lagunas Amarga (2) y de Los Jarales (3).

## METODOLOGÍA

Con objeto de caracterizar la dirección y el sentido de los flujos subterráneos en el área de estudio se llevaron a cabo cuatro campañas de medidas piezométricas en distintas situaciones hidroclimáticas (mayo y septiembre de 2015, y enero y marzo de 2016). En ellas se consideraron 39 pozos y sondeos. Dichas medidas, junto con los datos de cota de surgencia de manantiales, rezumes y humedales, han servido para la realización de esquemas piezométricos orientativos del flujo de agua subterránea.

En las lagunas Amarga y de Los Jarales se instalaron equipos de registro automático de la altura de la lámina de agua, que han proporcionado series de datos limnimétricos diarios. La información obtenida comprende desde octubre/2014 a septiembre/2017, en la laguna Amarga, y desde marzo/2014 hasta julio/2015, en la de Los Jarales. Además, en esta última, se realizaron lecturas puntuales de altura de lámina de agua hasta septiembre de 2017.

La caracterización morfológica de la cubeta de la laguna de Los Jarales se ha basado en datos de elevación LiDAR (PNOA, 2016), suministrados por el Instituto Geográfico Nacional

(IGN). Estos datos cuentan con un error cuadrático medio en las medidas verticales inferior a 10 cm y una densidad nominal de datos de 0,5 punto/m<sup>2</sup>. El vuelo fotogramétrico a partir del que se generaron las nubes de puntos utilizadas fue realizado en verano de 2015, cuando la laguna de Los Jarales estaba seca. Ello ha permitido obtener un modelo digital del terreno (MDT) de toda su cubeta, con un tamaño de píxel de 0,5 m x 0,5 m, a partir del que se ha calculado el área de inundación correspondiente a distintas alturas de lámina de agua (h), a intervalos de 0,5 m. El volumen almacenado entre dos intervalos de altura h<sub>1</sub> y h<sub>2</sub> ha sido obtenido de la siguiente forma:

$$V_{h_1-h_2} = \frac{A_1 - A_2}{2} \cdot (h_1 - h_2)$$

donde A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> son las áreas ocupadas por el humedal en las alturas h<sub>1</sub> y h<sub>2</sub>, respectivamente.

En la Figura 2 se relacionan los valores de h considerados con sus correspondientes volúmenes y áreas de inundación. Las ecuaciones que mejor definen las curvas hipsométrica y de llenado, que relacionan h con A y V, respectivamente, (Figura 2.1 y 2.2) se han calculado mediante el uso del programa informático *CurveExpert*. Los datos LiDAR no ofrecen información batimétrica aplicable a toda la serie de registro limnimétrico obtenida en la laguna Amarga, ya que corresponden a la mitad del periodo de investigación. No obstante, ALJIBE-CONSULTORES (2005) obtuvieron la curva de llenado y la curva hipsométrica del humedal (Figura 2.3 y 2.4) a partir de los datos batimétricos publicados por GARCÍA-FERRER et al. (1983). Las cuencas hidrográficas vertientes a ambas lagunas también han sido delimitadas a partir de los MDT creados con información LiDAR.

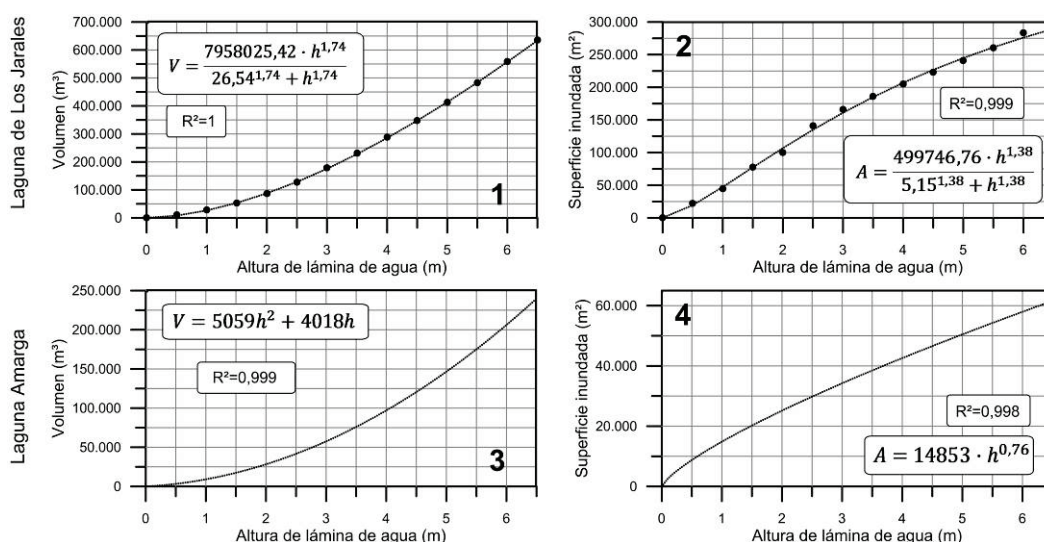


Figura 2. Relación de la altura de lámina de agua (h) con el volumen de agua almacenado (V) y la superficie inundada (A) en las lagunas de Los Jarales (1 y 2) y Amarga (3 y 4). Las ecuaciones de la laguna Amarga proceden de ALJIBE-CONSULTORES (2005).

Para calcular la escorrentía que se genera en las cuencas vertientes a ambas lagunas se han empleado dos metodologías ampliamente utilizadas en los balances hídricos de humedales: el método del número de curva (CN) del *Soil Conservation Service* (SCS) de los EEUU (MCKILLOP et al., 1999; VOLDSETH et al., 2007) y el balance de agua en el suelo –BAS– (KRASNOSTEIN & OLDHAM, 2004; MORAL et al., 2013; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ et al., 2016).

El método del CN o del SCS (MOCKUS, 1964) considera que la escorrentía superficial comienza a producirse cuando un evento lluvioso excede un determinado valor umbral ( $P_0$ ), independientemente de que el suelo esté saturado o no. El valor de  $P_0$  puede ser seleccionado de una tabla en función del uso del terreno, del porcentaje de pendiente y del tipo de suelo (MOPU, 1987). De forma general, cuanto menos permeable sea el suelo, menos densa la vegetación y mayor la pendiente, menor será el valor de  $P_0$  (cercano a 0 mm). Por el contrario,  $P_0$  tomará valores elevados (>100 mm) cuanto menos propicias sean las condiciones para generar escorrentía. Los valores de  $P_0$  considerados en este estudio son relativamente bajos (10, 15 y 19 mm), debido a que las cuencas vertientes a los humedales cuentan con pendientes moderadas y suelos poco permeables, y a que en su mayoría están ocupadas por olivar (o vegetación natural poco densa).

El BAS (THORNTHWAITE & MATHER, 1955) supone que el suelo tiene cierta capacidad de almacenamiento hídrico, denominada reserva útil (RU). El agua del suelo varía según la entrada debida a la precipitación que cae sobre él y la salida provocada por la evapotranspiración real (ETR), que retira agua del suelo hasta agotar el volumen existente o hasta su máximo potencial (ETP). En el momento en el que la suma de los volúmenes de agua del suelo y de precipitación supera la ETP se produce lluvia útil (LLU), entendida como el total de la escorrentía y la infiltración. Se ha calculado la ETP siguiendo las ecuaciones de Thornthwaite, Hargreaves y Blaney-Criddle, con el fin de comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos. Los valores de RU utilizados son 125, 100, 75, 60 y 50 mm y se han aplicado coeficientes de escorrentía a la lluvia útil (LLU) del 100, 75 y 50%, ya que la permeabilidad de los materiales en el área de estudio es generalmente baja.

El cálculo de la evaporación directa en lámina de agua libre se ha realizado a partir de los valores climáticos registrados en la estación ubicada en el centro del altiplano (Figura 1.1), mediante la ecuación de Penman (1956). De acuerdo con un artículo de McMahon et al. (2013), en el que se revisaban numerosos trabajos, dicha ecuación es una de las que mejor permite estimar la evaporación en humedales someros.

La modelización de las variaciones diarias de lámina de agua de los humedales durante el tiempo de observación se ha realizado considerando sus curvas hipsométricas y de llenado (Figura 2), la precipitación registrada en la estación meteorológica (Figura 1.1), la escorrentía obtenida al aplicar las distintas metodologías aplicadas y la evaporación calculada según el método de Penman. Las componentes subterráneas del balance de los humedales se estudiarán a partir de las diferencias entre las evoluciones limnimétricas observadas y las modelizadas.

## RESULTADOS

En la figura 1.1 se representa, a modo de ejemplo, el esquema piezométrico elaborado a partir de las medidas realizadas en enero de 2016. El trazado de las isopiezas es muy similar en todas las campañas y parecido al obtenido en trabajos previos (CMA, 2005), por lo que sólo se muestran los datos de esa fecha. La morfología de las isopiezas revela que la superficie piezométrica se adapta al relieve, de manera que en el centro del altiplano se observa un domo piezométrico, que constituye una zona de divisoria hidrogeológica, desde donde las aguas subterráneas fluyen, de forma radial y centrífuga, hacia sus bordes.

En la Tabla 1 se indica el grado de ajuste de cada una de las simulaciones realizadas respecto a las series de registro limnimétrico, mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE, *Root of the Mean Square Error*) y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ). El primero mide la magnitud del error predictivo y valora la exactitud del ajuste, a partir de las diferencias entre los valores simulados y los observados. El segundo parámetro evalúa la relación entre ambas series de datos, por lo que refleja su covariación, independientemente de la escala. La metodología de cálculo de la escorrentía que peores resultados ha generado ha sido la derivada de la ETP obtenida por el método de Thornthwaite, que proporciona valores altos de RMSE y bajos de  $R^2$  (Tabla 1). Con los métodos de Hargreaves y Blaney-Criddle se obtienen resultados más aceptables y muy similares, aunque ligeramente mejores en el segundo caso. Las simulaciones realizadas con el método del SCS se correlacionan generalmente bien con el registro limnimétrico y los errores del RMSE son bajos (Tabla 1).

| ETP        | Laguna  |      | Los Jarales |       | Amarga   |       | ETP            | Laguna         |                | Los Jarales |       | Amarga   |       | ETP  | Laguna                 |              | Los Jarales  |              | Amarga   |       |      |       |      |       |
|------------|---------|------|-------------|-------|----------|-------|----------------|----------------|----------------|-------------|-------|----------|-------|------|------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|-------|------|-------|------|-------|
|            | RU (mm) | Esc  | RMSE (m)    | $R^2$ | RMSE (m) | $R^2$ |                | RU (mm)        | Esc            | RMSE (m)    | $R^2$ | RMSE (m) | $R^2$ |      | RU/P <sub>0</sub> (mm) | Esc          | RMSE (m)     | $R^2$        | RMSE (m) | $R^2$ |      |       |      |       |
| Hargreaves | 125     | 100% | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 | Blaney-Criddle | 125            | 100%           | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 | SCS  | 10                     | -            | 0,42         | 0,902        | 0,33     | 0,768 |      |       |      |       |
|            |         | 75%  | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 |                |                | 75%            | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 |      |                        | 15           | 0,27         | 0,946        | 0,41     | 0,933 |      |       |      |       |
|            |         | 50%  | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 |                |                | 50%            | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 |      |                        | 19           | 0,22         | 0,958        | 0,63     | 0,921 |      |       |      |       |
|            | 100     | 100% | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 |                | Blaney-Criddle | 100            | 100%        | 0,19  | 0,957    | 0,84  |      | 0,909                  | Thornthwaite | 125          | 100%         | 0,64     | 0,684 | 1,50 | 0,545 |      |       |
|            |         | 75%  | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 |                |                |                | 75%         | 0,19  | 0,957    | 0,84  |      | 0,909                  |              |              | 75%          | 0,53     | 0,814 | 1,03 | 0,707 |      |       |
|            |         | 50%  | 0,19        | 0,957 | 0,84     | 0,909 |                |                |                | 50%         | 0,19  | 0,957    | 0,84  |      | 0,909                  |              |              | 50%          | 0,41     | 0,898 | 0,58 | 0,827 |      |       |
|            | 75      | 100% | 0,33        | 0,911 | 0,78     | 0,909 |                |                | Blaney-Criddle | 75          | 100%  | 0,29     | 0,924 |      | 0,78                   |              | 0,909        | Thornthwaite | 100      | 100%  | 0,87 | 0,389 | 2,72 | 0,007 |
|            |         | 75%  | 0,29        | 0,923 | 0,79     | 0,909 |                |                |                |             | 75%   | 0,26     | 0,930 |      | 0,79                   |              | 0,909        |              |          | 75%   | 0,71 | 0,627 | 1,98 | 0,259 |
|            |         | 50%  | 0,26        | 0,932 | 0,81     | 0,909 |                |                |                |             | 50%   | 0,24     | 0,940 |      | 0,81                   |              | 0,909        |              |          | 50%   | 0,54 | 0,817 | 1,19 | 0,728 |
|            | 60      | 100% | 0,50        | 0,825 | 0,44     | 0,950 | Blaney-Criddle |                |                | 60          | 100%  | 0,46     | 0,851 | 0,44 | 0,950                  |              | Thornthwaite |              | 75       | 100%  | 1,09 | 0,143 | 3,45 | 0,218 |
|            |         | 75%  | 0,42        | 0,872 | 0,52     | 0,961 |                |                |                |             | 75%   | 0,39     | 0,888 | 0,52 | 0,961                  |              |              |              |          | 75%   | 0,89 | 0,397 | 2,58 | 0,056 |
|            |         | 50%  | 0,34        | 0,908 | 0,61     | 0,955 |                |                |                |             | 50%   | 0,32     | 0,915 | 0,61 | 0,955                  |              |              |              |          | 50%   | 0,67 | 0,695 | 1,62 | 0,159 |
|            | 50      | 100% | 0,64        | 0,727 | 0,27     | 0,783 |                | Blaney-Criddle |                | 50          | 100%  | 0,57     | 0,773 | 0,27 | 0,783                  | Thornthwaite |              |              | 60       | 100%  | 1,24 | 0,040 | 3,91 | 0,341 |
|            |         | 75%  | 0,53        | 0,821 | 0,25     | 0,915 |                |                |                |             | 75%   | 0,47     | 0,843 | 0,25 | 0,917                  |              |              |              |          | 75%   | 1,01 | 0,243 | 2,96 | 0,202 |
|            |         | 50%  | 0,42        | 0,889 | 0,39     | 0,963 |                |                |                |             | 50%   | 0,38     | 0,893 | 0,39 | 0,965                  |              |              |              |          | 50%   | 0,76 | 0,599 | 1,91 | 0,000 |

Tabla 1. Raíz del error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de cada una de las simulaciones limnimétricas realizadas en las lagunas de Los Jarales y Amarga. Los valores están coloreados según una escala de rojo a verde, desde el peor al mejor.

En la Figura 3 se representan los resultados de las simulaciones limnimétricas de las lagunas de Los Jarales y Amarga, realizadas para el periodo de registro a partir de los tres supuestos que ofrecían mejor ajuste (Tabla 1). En la gráfica de la laguna de Los Jarales se ha incluido la escorrentía calculada según el método del SCS, considerando un valor umbral ( $P_0$ ) de 19 mm, y la obtenida mediante el BAS, con resultados de ETP derivados de la ecuación de Blaney-Criddle, asumiendo 100 y 75 mm como valores de RU; este último con una generación de escorrentía del 50% respecto de la LLU (Figura 3). Cabe señalar que las modelizaciones se han realizado para todo el periodo de control (abril 2014-septiembre 2017), aunque ninguna de las simulaciones representadas refleja inundación en la laguna durante el año 2016/17, de acuerdo con la realidad observada. De las tres simulaciones representadas, la que cuenta con menor RMSE (0,19 m) y uno de los mejores  $R^2$  (0,957) es la efectuada a partir del BAS con ETP de Blaney-Criddle y una RU de 100 mm. En dicha simulación no se llega a cubrir la RU y, por tanto, no se genera escorrentía, al igual que ocurre con el resto de casos con los mismos valores de  $R^2$  y RMSE (Tabla 1). Sin embargo, existe constancia visual de que sí se generó escorrentía durante los episodios lluviosos intensos. Al usar un valor de RU de 75 mm y un porcentaje de escorrentía respecto de la LLU del 50%, se obtiene un ajuste similar (Tabla 1) y se logra cierta cantidad de escorrentía, aunque no se consigue replicar la subida limnimétrica de 2015 (Figura. 3). El método del SCS sí simula escorrentía en episodios lluviosos intensos en los que la RU no está cubierta, por lo que sí se predicen ascensos limnimétricos acordes con los registrados (Figura 3), particularmente en noviembre de 2015.

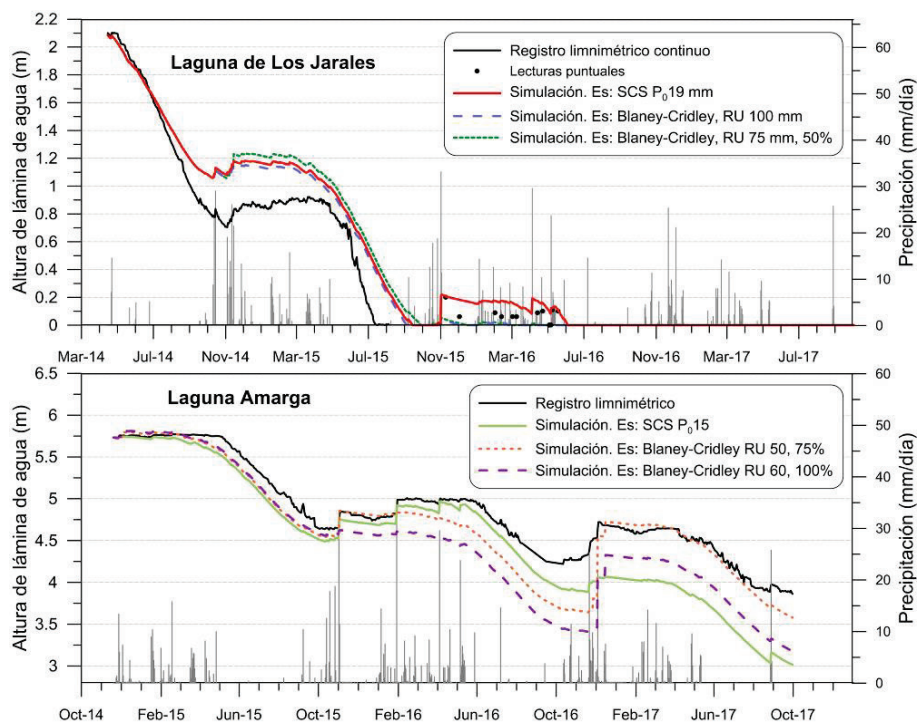


Figura 3. Resultado de la modelización limnimétrica de las lagunas de Los Jarales (marzo-2014-septiembre 2017) y Amarga (octubre 2014–septiembre 2017). Se incluyen las series de registro limnimétrico y de precipitación diaria.

Las simulaciones limnimétricas de la laguna Amarga (Figura 3) son las resultantes del método del SCS, con un umbral de escorrentía ( $P_0$ ) de 15 mm, y otras dos simulaciones derivadas del BAS, con ETP según Blaney-Criddle (RU de 50 mm y 75% de escorrentía y RU de 60 mm y 100% de escorrentía). Los valores de RU usados son bajos si se tiene en cuenta las características litológicas de la cuenca vertiente al humedal (predominantemente arcillosa), pero con RU mayores no se ha conseguido simular ascensos limnimétricos. La modelización con menor error considera un valor de RU de 50 mm (Tabla 1), con escasas diferencias entre los valores simulados y los reales, salvo en parte del año 2016 (Figura 3). Sin embargo, los ascensos limnimétricos modelizados no se asemejan a los registrados (enero y marzo 2016, agosto 2017) o no se modelizan ascensos que sí ocurren en la realidad (Figura 3). Lo mismo sucede al utilizar 60 mm de RU y se debe a que las precipitaciones que generaron la escorrentía que dio lugar a los ascensos tuvieron lugar en periodos en los que el suelo no estaba saturado. Con el método del SCS sí se predice la formación de escorrentía, ya que no depende de la RU, sino de la intensidad de la lluvia. En este caso, el valor de  $P_0$  que mejor ajuste ha conseguido es 15 mm, inferior al utilizado en la laguna de Los Jarales (19 mm). Ello es coherente con las características litológicas de las cuencas vertientes, menos permeables en la laguna Amarga debido a la abundancia de materiales arcilloso-evaporíticos (Figura 1).

Se han calculado los volúmenes atribuibles a las entradas a cada humedal por precipitación y escorrentía y a las salidas por evaporación (Tabla 2), a partir de las simulaciones realizadas con el método del SCS. La diferencia entre el volumen de agua real almacenado y el simulado ha sido atribuida al intercambio neto con las aguas subterráneas ( $\Delta G$ ). Los valores positivos de  $\Delta G$  indican aportación subterránea hacia el humedal.

En la laguna de Los Jarales, en el año 2014/15, la componente con mayor valor volumétrico es la evaporación ( $E_v=34,9 \text{ dam}^3$ ; Tabla 2). Las entradas por precipitación ( $P$ )

son 13,5 dam<sup>3</sup>, mientras que la aportación de la escorrentía (Es) es un orden de magnitud inferior. El balance de la laguna de Los Jarales del año 2014/15 indicaría que existe un volumen neto de entrada de recursos subterráneos de 0,6 dam<sup>3</sup> (Tabla 2). En cuanto al balance de la laguna Amarga, las salidas ocurridas por evaporación constituyen el elemento más significativo durante el periodo de observación (Tabla 2), con valores anuales de 75,1 dam<sup>3</sup> (2015/16) y 67,1 dam<sup>3</sup> (2016/17). Dichos valores son superiores a la suma de las entradas por precipitación y escorrentía, por lo que  $\Delta G$  es positivo y tiene un gran peso sobre el balance.

| Laguna      | Año hidrol. | V inicial | P    | Es   | Ev   | V final simulado | $\Delta V$ simulado | V final real | $\Delta V$ real | $\Delta G$ |
|-------------|-------------|-----------|------|------|------|------------------|---------------------|--------------|-----------------|------------|
| Los Jarales | 2014/15     | 19,2      | 13,5 | 1,6  | 34,9 | 0,0              | -19,8               | 0,0          | -19,2           | 0,6        |
| Amarga      | 2015/16     | 127,9     | 20,3 | 13,1 | 75,1 | 86,2             | -41,7               | 108,1        | -19,9           | 21,9       |
|             | 2016/17     | 108,1     | 15,0 | 2,3  | 67,1 | 58,3             | -49,8               | 91,7         | -16,4           | 33,4       |

Tabla 2. Resultado de los balances hídricos (en dam<sup>3</sup>). (V) volumen de agua almacenado; (P) entrada por precipitación directa; (Ev) salida por evaporación; (Es) entrada por escorrentía superficial; ( $\Delta V$ ) variación de volumen; ( $\Delta G$ ) intercambio neto con las aguas subterráneas.

## DISCUSIÓN

El grado de correlación entre las simulaciones realizadas con el método del SCS y el registro limnimétrico es generalmente bueno y la magnitud de los errores es baja (Tabla 1). Ello podría deberse a la baja permeabilidad de los materiales que existen en las cuencas vertientes a los humedales. Así, la capacidad que tiene el suelo para infiltrar agua de lluvia se ve rápidamente sobrepasada en un evento lluvioso intenso y consecuentemente se genera escorrentía, lo que se ajusta mejor al planteamiento del método del SCS. Además, las condiciones hidroclimáticas secas registradas durante el periodo de estudio habrían propiciado que raramente el volumen máximo de reserva de la capa edáfica se alcanzara, de forma que el BAS no ha sido capaz de predecir la ocurrencia de escorrentía en determinados momentos. Las mejores simulaciones realizadas mediante BAS consideran valores de RU bajos (50-75 mm, Tabla 1), que no serían congruentes con los materiales que hay en superficie, pero sí con el escaso espesor del suelo y la limitada profundidad radical. La combinación de ambos factores junto con las condiciones semiáridas del área de estudio, otorga un peso elevado a la ETP que impide que el BAS se ajuste a la realidad estudiada. Por todo ello, en este caso, el método del SCS parece más idóneo. En trabajos previos de simulación limnimétrica y balances hídricos realizados en el área de estudio (CHG, 2008; MORAL et al., 2013; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ et al., 2016) se han logrado resultados satisfactorios al aplicar el BAS, con valores de RU de entre 103 y 260 mm, con los que no se conseguiría simular escorrentía en el periodo 2014/15-2016/17. Dichos cálculos se realizaron para años de tipo húmedo o medio y/o con datos mensuales. Por lo tanto, las condiciones hidroclimáticas y la periodicidad del control y la simulación limnimétrica condicionan en gran medida la elección de los parámetros considerados en la simulación. Con el fin de hallar un modelo válido para cualquier año, independientemente de las condiciones climáticas, sería conveniente disponer de series de registro limnimétrico diarias de larga duración.

La laguna de Los Jarales se encuentra en una posición intermedia entre la zona de recarga más elevada del área de estudio y los puntos de descarga situados a cotas inferiores, como evidencia el esquema de isopiezas (Figura 1.1). Se trataría, por tanto, de un humedal de tránsito entre las áreas de recarga y de descarga, que puede recibir aportaciones subterráneas además de constituir un elemento de recarga (ANDREO et al., 2016). Durante el periodo de



estudio, el funcionamiento hídrico de la laguna de Los Jarales ha estado condicionado principalmente por los elementos superficiales del balance, sobre todo por la evaporación y, en menor medida, por la precipitación caída sobre la lámina de agua (Tabla. 2). La interacción entre las aguas subterráneas y el humedal supone una pequeña parte del cómputo total del balance (CMA, 2005; CHG, 2009) que podría explicar la diferencia entre el registro limnimétrico y las simulaciones (Figura 3). La realización del balance a nivel mensual sugiere que la infiltración en el vaso lagunar o la alimentación subterránea pueden tener mayor peso en determinados momentos del año (GIL-MÁRQUEZ, 2018), aunque será necesario incluirlas en futuras modelizaciones para poder confirmarlo.

La variación de volumen ( $\Delta V$ ) simulada en la laguna Amarga en los años 2015/16 y 2016/17 es -41,7 y -49,8  $\text{dam}^3$ , respectivamente (Tabla 2). Ello supondría reducir el volumen almacenado desde 127,9  $\text{dam}^3$ , en octubre de 2015, hasta 36,4  $\text{dam}^3$  en septiembre de 2017, muy por debajo del agua existente en el humedal al final del periodo de registro (91,7  $\text{dam}^3$ ). El hidroperiodo permanente del humedal se explica por la existencia de aportaciones de origen subterráneo, no incluidas en las simulaciones realizadas, como sugiere el trazado de isopiezas (Figura 1.1), que pone de manifiesto la existencia de flujo subterráneo dirigido hacia la laguna Amarga. El volumen de dichas entradas sería de 21,9  $\text{dam}^3$ , en 2015/16, y 33,4  $\text{dam}^3$ , en 2016/17 (Tabla 2). Las aportaciones netas subterráneas estimadas en este estudio están en consonancia con las calculadas por ALJIBE-CONSULTORES (2005), con un valor medio de 28,9  $\text{dam}^3$ , y por MOYA (1988) para el año 1983/84 (33,6  $\text{dam}^3$ ), considerado de tipo medio desde el punto de vista hidroclimático. Por lo tanto, las entradas de recursos de origen subterráneo juegan un papel determinante en el balance hídrico de la laguna Amarga.

Por tanto, la diferencia de comportamiento hídrico entre las lagunas de Los Jarales y Amarga se debería a aspectos hidrológicos relacionados con las características de sus cuencas vertientes, e hidrogeológicos; es decir, referidos a la relación de los humedales con las aguas subterráneas. La posición de la laguna Amarga en zonas de descarga de los flujos subterráneos y la profundidad de su cubeta favorecen que el nivel piezométrico quede por encima del fondo del humedal en todo momento y, por tanto, que reciba aportaciones subterráneas. Por el contrario, la situación más elevada de la laguna de Los Jarales, junto con la menor profundidad de su cubeta, evita que esta sea intersectada por el nivel piezométrico en determinadas situaciones, lo que le impide recibir entradas de agua subterránea.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la relación de dos lagunas de origen kárstico-evaporítico con las aguas subterráneas, a partir del trazado de esquemas piezométricos y de la realización de simulaciones limnimétricas. Esto último ha permitido cuantificar los componentes de los balances hídricos y determinar la existencia e importancia de las aportaciones subterráneas. La posición de los humedales con respecto a la superficie piezométrica condiciona en gran medida su funcionamiento, por lo que es necesario conocer el contexto hidrogeológico de las lagunas, además de controlar los factores hidrológicos que afectan a su balance hídrico.

La utilización de distintos métodos para el cálculo de la escorrentía superficial generada en las cuencas vertientes a los humedales ha permitido contrastar su aplicabilidad. El método del *Soil Conservation Service* (SCS) proporciona mejores resultados en años de carácter seco, en los que la reserva útil apenas consigue cubrirse, pero en los que se produce escorrentía cuando

la capacidad de infiltración del suelo (predominantemente arcilloso) se ve sobrepasada.

La discrepancia entre los parámetros de las simulaciones obtenidos en este trabajo y en otros previos plantea la necesidad de efectuar un control limnimétrico diario en los humedales de forma prolongada e ininterrumpida. Las series de registro obtenidas servirían para calibrar modelos de funcionamiento hídrico que fueran aplicables a cualquier condición hidroclimática y que sirvieran de base para alcanzar un conocimiento más preciso de las relaciones humedal-agua subterránea, lo que resulta fundamental para la gestión, protección y, en su caso, restauración de humedales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución del grupo de investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía a los proyectos de excelencia RNM-8087 y RNM-6895R de la Junta de Andalucía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALJIBE-CONSULTORES (2005). *Estudio hidrogeológico de las lagunas del sur de Córdoba: lagunas de Rincón y Santiago, lagunas Amarga y Dulce*. NET 291875/1. Informe inédito, 195 pp.
- ANDREO, B., GIL-MÁRQUEZ, J.M., MUDARRA, M., LINARES, L., y CARRASCO, F. (2016). *Hypothesis on the hydrogeological context of wetland areas and springs related to evaporitic karst aquifers (Málaga, Córdoba and Jaén provinces, Southern Spain)*. Environmental Earth Sciences, 75(9), 1–19.
- CHG (2008). *Definición del Contexto Hidrogeológico de Humedales de la Campiña Andaluza Central*, 2 tomos. Informe técnico. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir/Univ. Pablo de Olavide. 355 pp.
- CMA (2005). *Definición del Contexto Hidrogeológico de Humedales Andaluces*, 7 tomos. Documento interno inédito. EGMASA-Grupo de Hidrogeología de la Univ. Málaga.
- GARCÍA-FERRER, A., RECIO ESPEJO, J.M. y SÁNCHEZ DE LA ORDEN, M. (1983). *Medidas Morfométricas y Batimétricas de las Lagunas Amarga y del Rincón (Córdoba)*. Boletín de la Estación Central de Ecología, 12 (23), 51-55.
- GIL-MÁRQUEZ, J.M. (2018). *Caracterización hidrogeológica de humedales y manantiales salinos asociados a acuíferos kársticos evaporíticos del sector central del Subbético*. Tesis Doctoral, Univ. Granada.
- KRASNOSTEIN, A.L. y OLDHAM, C.E. (2004). *Predicting wetland water storage*. Water Resour. Res. 40(10).
- McKILLOP, R., KOUWEN, N. y SOULIS, E.D. (1999). *Modeling the rainfall-runoff response of a headwater wetland*. Water Resour. Res., 35(4), 1165–1177.
- McMAHON, T.A., PEEL, M.C., LOWE, L., SRIKANTHAN, R. y MCVICAR, T.R. (2013). *Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: A pragmatic synthesis*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17(4), 1331–1363.
- MOCKUS, V. (1964). *Estimation of direct runoff from storm rainfall*. En: SCS, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, 30 pp.
- MOPU (1987). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Carreteras, 124 pp.
- MORAL, F., RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, M., BELTRÁN, M., BENAVENTE, J., y CIFUENTES, V.J. (2013). *Water Regime of Playa Lakes from Southern Spain: Conditioning Factors and Hydrological Modeling*. Water Environ. Res, 85(7), 632–642.
- MOYA, J.L. (1988). *Hidrogeología de las zonas húmedas del sur de la provincia de Córdoba*. Tesis Doctoral, Univ. Córdoba.
- PENMAN, H.L. (1956). *Evaporation: An introductory survey*. Neth. J. Agri. Sci, 4, 9–29.
- PNOA (2016). *Cobertura LiDAR. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*. Instituto Geográfico Nacional. Accesible en: <http://pnoa.ign.es/coberturalidar> [Consulta: 24 Feb 17].
- RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, M., FERNANDEZ, A. y MORAL, F. (2016). *Hydrological regime and modeling of three ponds of the Mediterranean area (south of Córdoba, Spain)*. Hydrobiologia, 782, 155–168.
- THORNTHWAITE, C.W. y MATHER, J.R. (1955). *The Water Balance*. Publ. in Climat., Vol.8, nº1, 86 pp.
- VOLDSETH, R.A., JOHNSON, W.C., GILMANOV, T., GUNTENSPERGEN, G.R. y MILLETT, B.V. (2007). *Model estimation of land-use effects on water levels of northern prairie wetlands*. Ecol. Appl. 17(2), 527–540