

Caracterización del funcionamiento hidrológico de la laguna de Zóñar (Andalucía, España). Implicaciones de la extracción de aguas subterráneas en la evolución del nivel de agua.

Characterizing the hydrological regime of Zóñar Lake (Andalusia, Spain). Implications of groundwater abstraction in the evolution of the water level.

Miguel Rodríguez-Rodríguez, Francisco Moral y Manuel Beltrán

Universidad Pablo de Olavide. Carretera de Utrera, km 1, 41013 Sevilla. mrodrrod@upo.es; fmormar@upo.es; mbelmir@upo.es

ABSTRACT

This paper reports the characterization of the hydrological functioning in Zóñar lake, located in the province of Cordoba, in Southern Spain. The interpretation of morphometric indexes, together with a water budget from 1992 to 2006, enabled us to evaluate the hydrogeological functioning of the system and the evolution of the lake water level. A simple soil-water budget in the watershed was implemented previously to the lake-water budget to estimate both runoff and near-surface groundwater flow (i.e. surplus from the soil-water budget). Runoff is produced by inter and intra annual pulses and groundwater flow is characterized by its uniformity. Results from the lake-water budget show a good correlation (>90%) after calibration with time-series of water level in the lake. The model of the water budget can be thus considered calibrated and two possible scenarios of groundwater withdrawal within the basin were analyzed. Finally, we believe that the development of this hydro-morphological methodology can be useful to the assessment and the future management of this water body and similar ecosystems under a changing semi-arid climate.

Key words: Water resources, numerical simulation, continental wetlands, Cordoba lakes (Spain).

Geogaceta, 48 (2010), 135-138
ISSN: 0213-683X

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010
Fecha de revisión: 21 de abril de 2010
Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010

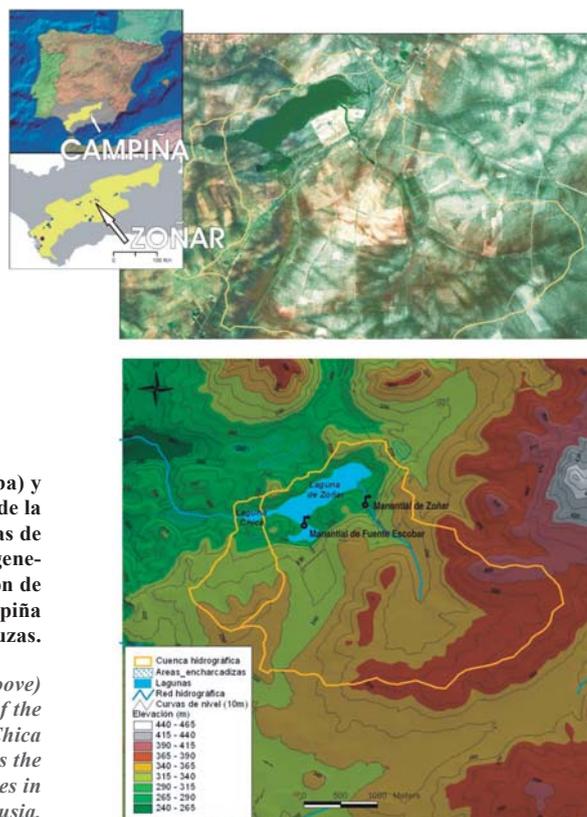
Introducción

La laguna de Zóñar se localiza en la campiña cordobesa, concretamente en el municipio de Aguilar de la Frontera (ver Fig. 1). Su cuenca vertiente tiene una superficie de 954 ha y el área inundada es de 46 ha. Zóñar es la laguna más profunda de Andalucía (16,5 m de profundidad máxima) y recibe aportes hídricos subterráneos de manera constante gracias a la existencia de dos manantiales: el manantial de Zóñar y el de Fuente Escobar (Fig. 1). Es una de las pocas lagunas permanentes de la campiña del sur de España (Rodríguez-Rodríguez, 2007). En época de aguas altas se une con la laguna Chica, situada a unos 300 m al oeste (Fig. 1).

En este trabajo se ha considerado que las lagunas de Zóñar y Chica constituyen un único sistema hidrológico. Cuando el sistema lagunas de Zóñar-Chica supera los 16,5 m de profundidad, se produce el desbordamiento por el extremo occidental, hacia el arroyo de la Humbrera, afluente del río Cabra (Moral *et al.*, 2008).

Fig. 1.- Ortofotografía (arriba) y mapa de altitudes (abajo) de la cuenca vertiente de las lagunas de Zóñar y Chica. *En el mapa general se representa la localización de las principales lagunas de campiña andaluzas.

Fig. 1.- Aerial photography (above) and map of altitudes (below) of the watersheds of Zóñar and Chica lakes* The general map shows the location of the main playa-lakes in Andalusia.



El cultivo de olivar en secano es mayoritario, junto con pequeñas parcelas de viñedo. Hay pocas explotaciones que capten las aguas subterráneas para riego, de forma que se puede considerar que en la actualidad este hidrosistema funciona en régimen natural. No obstante, de acuerdo con Valero-Garcés *et al.* (2006), en la década de 1960 los manantiales que nutren a Zóñar fueron desviados para empleo humano cerca del núcleo de Aguilar de la Frontera, con el consecuente descenso en los niveles de agua.

A partir de la década de 1970 el empleo de estas fuentes de agua se redujo progresivamente, deteniéndose completamente con la declaración de la laguna como Reserva Natural en 1982. Simultáneamente, los principales pozos cercanos a la laguna se clausuraron. Dada la singular importancia de este humedal, que está protegido como Reserva Integral, Reserva Natural, zona ZEPa y zona RAMSAR, se pretende con este trabajo caracterizar el funcionamiento hídrico del sistema para, posteriormente, poder modelizar su evolución y simular distintos escenarios de explotación de los recursos hídricos.

Metodología

Se han realizado observaciones de campo de diferentes aspectos relacionados con la geología, el relieve, la hidrología y los usos del suelo en la zona de estudio. Se han inventariado los puntos de agua en la cuenca y se han medido niveles y calidad del agua subterránea. Los límites de la cuenca vertiente superficial se han definido inicialmente mediante el empleo del Modelo Digital del Terreno (MDT) a escala 10 m (Junta de Andalucía, 2005). El funcionamiento hídrico se ha estudiado mediante el cálculo de los distintos componentes del balance hídrico de la laguna. A partir de las observaciones en campo y la revisión bibliográfica, se ha desarrollado un modelo conceptual del funcionamiento hídrico de la laguna, en el que las entradas suceden por precipitación directa sobre el vaso y por escorrentía superficial, generada en la cuenca vertiente de la laguna, y escorrentía subterránea, que surge por los manantiales de Zóñar y Escobar. Las salidas, por su parte, corresponden a la evaporación directa desde la superficie inundada de la laguna y a rebosamientos eventuales desde la misma.

Se ha dispuesto de una serie muy completa de datos hidro-meteorológicos mensuales desde el año 1992 hasta 2006: Series de medidas del caudal de los ma-

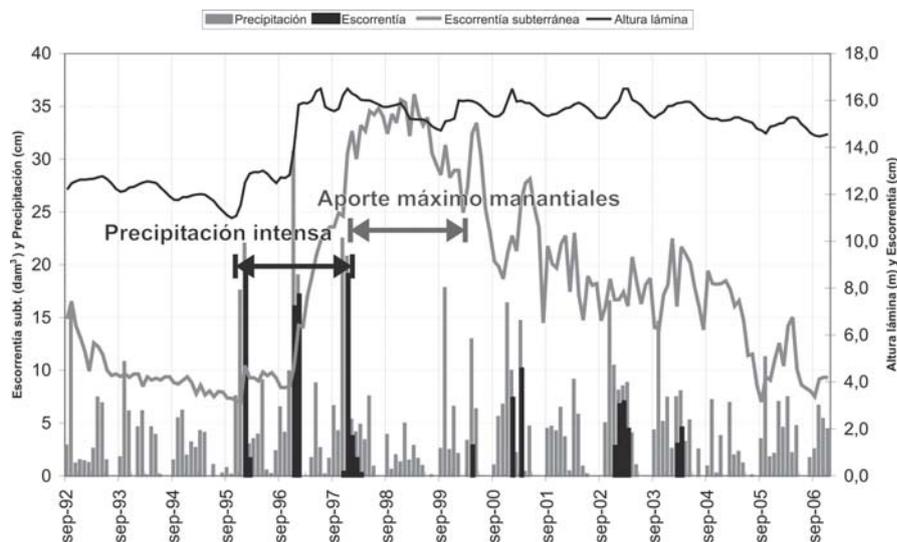


Fig. 2.- Evolución de niveles en la laguna de Zóñar. Se representa la aportación mensual de manantiales así como la escorrentía total y la precipitación.

Fig. 2.- Water level evolution in Zóñar lake. The figure also shows the monthly inputs from the springs, as well as the overall runoff and rainfall values.

nantiales, conductividad eléctrica (C.E.) del agua, evaporación en tanque, niveles de la lámina de agua, precipitación y temperatura. La calidad de los datos fue evaluada mediante su correlación con los obtenidos en la estación ubicada en la laguna Amarga, próxima a la zona. Los valores de evaporación mensual registrados en la estación de Zóñar fueron completados a partir de los provenientes de los embalses de La Cordobilla y Malpasillo y de la cercana estación «Aguilar-Laguna de Zóñar». Por otra parte, mediante el empleo de SIG y del MDT de Andalucía y la batimetría de la laguna (Sánchez de la Orden *et al.*, 1992), ha sido posible estimar, a partir de los datos mensuales de nivel, el correspondiente volumen de agua almacenado mensualmente en la laguna.

	Escorrentía total	Aporte manantiales	Ppc.	Ev.
Mínimo	0,00	0,73	0,00	14,1
Mediana	0,00	1,8	13,0	46,7
Máximo	192	4,1	148	117
Rango	192	3,3	148	103
Suma	9172	3036	3773	8879
Media	53,3	1,97	21,9	51,6

Tabla I.- Estadísticos básicos de los principales componentes del balance hídrico de la laguna de Zóñar (dam³/mes) en régimen natural durante el periodo de estudio (1992-2006).* Las salidas por el rebosadero se han estimado en 3,321 dam³.

*Table I.- Basic statistics of the main components of the Zóñar lake water balance (dam³/month) under natural conditions during the study period (1992-2006). *Overflow outputs have been estimated in 3,321 dam³.*

Así pues, conociendo la variación mensual en el volumen de agua almacenada en la laguna durante los periodos sin rebosamiento, las entradas por precipitación y las salidas por evaporación, ha sido posible estimar los valores mensuales de entradas por escorrentía necesarios para que se cumpla el balance hídrico de la laguna. Este método permite la calibración y validación de diversos modelos de precipitación-escorrentía, habiéndose empleado en este caso para calibrar el valor del balance de agua en el suelo en la cuenca de la laguna (Moral *et al.*, 2008).

Resultados

En la figura 2 se puede apreciar la evolución de la lámina de agua en la laguna de Zóñar desde 1992 a 2006, así como los valores de precipitación mensual registrada, la escorrentía generada en la cuenca y los caudales aportados por los manantiales. La precipitación media anual es de 507 mm.

La precipitación directa sobre la laguna totaliza 0,27 hm³/año. El valor calculado de evaporación desde la laguna es de 0,63 hm³/año. El valor de escorrentía calculada es de 0,65 hm³/año y el valor de las aportaciones subterráneas de 0,23 hm³/año (Tabla I). La hidrodinámica de ambos manantiales, con un desfase de casi dos años (Fig. 2) entre los mayores episodios de precipitación y, por tanto, de infiltración y los caudales máximos, pone de manifiesto el carácter relativamente poco permeable de la mayor parte de los mate-

riales que constituyen la cuenca de la laguna, fundamentalmente margas miocenas del relleno de la cuenca del Guadalquivir. Intercalados ente estas margas hay niveles calcareníticos de mayor permeabilidad que afloran en la zona sur de la laguna.

En la tabla II se pueden observar las principales características morfoclimáticas de la laguna de Zóñar y los estadísticos básicos de dichas características en las 48 principales lagunas de campiña de Andalucía. Se puede apreciar que la laguna de Zóñar es de las más extensas de Andalucía, si exceptuamos las lagunas de Fuente de Piedra, Medina y El Conde. El valor mediano de extensión de cubetas y cuencas en las lagunas de campiña andaluza es de 8,1 y 113 ha, respectivamente (Tabla II) frente a las 46 y 954 ha de la laguna de Zóñar.

La gran profundidad del vaso lacustre determina un elevado volumen de reservas hídricas (que llega hasta 4,4 hm³). La extensión máxima que podría ocupar la laguna se ve limitada por la presencia del rebosadero; la relación cuenca/cubeta en esta laguna es de 20,7, bastante superior a la media en el resto de lagunas de campiña (12,6). Las aguas son salobres y experimentan variaciones estacionales poco acusadas, aunque se observa una mayor salinidad al final de los periodos de sequía. El valor mediano de salinidad es 1,6 g/L y la C.E. varía entre 2,3 y 5 mS/cm (Moral *et al.* 2008). Los manantiales de Zóñar y Escobar drenan, en conjunto, un caudal medio de 7,5 L/s y sus aguas presentan valores de C.E. de 1,2 y 1 mS/cm, respectivamente. La facies hidroquímica del agua de la laguna es clorurada sódica y la de los manantiales es mixta.

Discusión

La aplicación de un modelo de funcionamiento hídrico para lagunas de campiña, previamente aplicado por los autores a otras lagunas andaluzas (Moral *et al.*, 2008) ha aportado resultados coherentes, de manera que se entiende que la laguna de Zóñar se ajusta a este modelo, teniendo en cuenta las características particulares – una fracción importante de la escorrentía es de origen subterráneo - de este sistema. De no existir aportaciones ocultas a la laguna, lo que es improbable ya que los caudales son muy constantes durante el estiaje y no se tiene constancia de que se hayan secado nunca, la alimentación subterránea a la laguna constituye en torno al 25% de la escorrentía total. Este valor

	Nº Valores	Zóñar	Min.	Mediana	Max.	Media	CV (desv. /media)
Cubeta (ha)	48	45,9	1,6	8,1	1271	42,8	4,3
Cuenca (ha)	48	954	30,2	112,9	14299	543,4	3,8
Lluvia útil (mm)	48	83,6	50,5	102,0	334,4	126,0	0,6
Salinidad (g/l)	48	1,6	0,1	2,9	41,2	6,8	1,3
Prof. (m)	48	16,5	0,1	1,9	16,0	2,5	1,1
%Pend. cuenca	48	5,7	1,7	6,0	17,4	6,7	0,5
Evap. (mm)	48	1598,5	1150,0	1579,7	1694	1526,1	0,1

Tabla II.- Características morfoclimáticas de Zóñar y valores estadísticos básicos para dichas características en las 48 principales lagunas de campiña de Andalucía.

Table II.- Morphoclimatic characteristics of Zóñar lake and basic statistics for those characteristics of the 48 main playa-lakes in Andalusia.

contrasta con los calculados por otros autores (ADARO, 1989), que indican que el flujo subterráneo constituye aproximadamente el 50% de las aportaciones.

Una vez calibrado el modelo de balance hídrico para la laguna de Zóñar – el coeficiente de correlación R² entre los valores medidos y los simulados es de 0,93 – se han considerado dos posibles escenarios de explotación de los recursos hídricos subterráneos futuros en la cuenca (Fig. 3). La simulación 1 se ha realizado detrayendo del balance hídrico el volumen de aportes subterráneos, es decir, considerando que la fracción de escorrentía subterránea es el 25% de la escorrentía total, se han sustraído los aportes de los manantiales. Este caudal sería equivalente al bombeo necesario para transformar en regadío 110,6 ha de olivar de la cuenca con una dotación me-

dia de 2.000 m³/ha/año. Se observa en la figura 3 un descenso paulatino de los niveles, que se recuperan tras los episodios de entrada de escorrentía superficial a la laguna en diciembre de 1996 y de 1997, así como en la primavera de 2003 y 2004.

La simulación 2 se ha realizado considerando una sustracción de la escorrentía (superficial y subterránea) mayor, concretamente el caudal necesario para la transformación en regadío de 221,2 ha de olivar de la cuenca. En este caso, se observa que la laguna no llegaría a rebosar durante los periodos lluviosos. El nivel medio de agua en la laguna sería de 14,3 m y de 13,7 m en las Simulaciones 1 y 2, respectivamente, frente a un nivel medio teórico de 15 m. Si bien el descenso de la lámina pudiera parecer poco significativo, implica una reducción importante del volumen de agua almace-

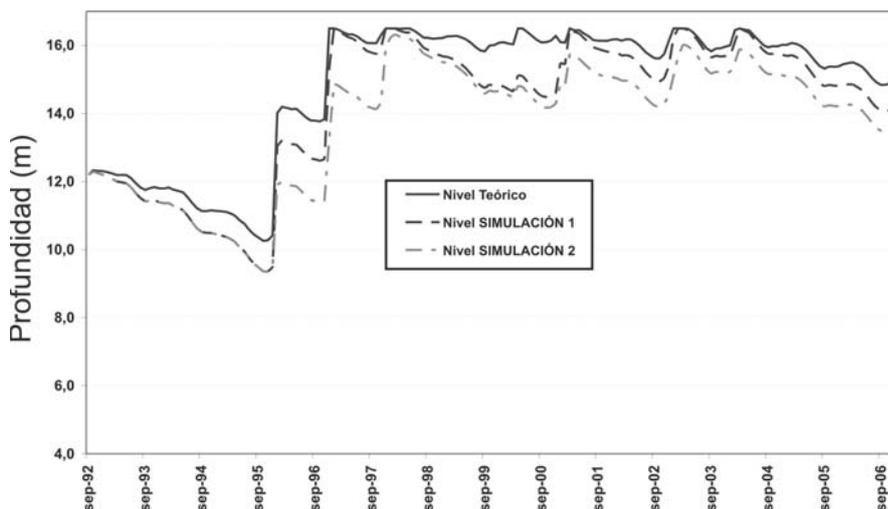


Fig. 3.- Evolución de niveles simulados en la laguna de Zóñar. La simulación 1 se ha realizado detrayendo del balance el caudal de los manantiales (almacenamiento dinámico). En la simulación 2 se ha detraído una aportación subterránea del 50%.

Fig. 3.- Evolution of the simulated water levels in Zóñar lake. Simulation 1 has been carried out removing spring inputs from the water balance (dynamic storage). Simulation 2 considers a 50% reduction of the groundwater inputs.

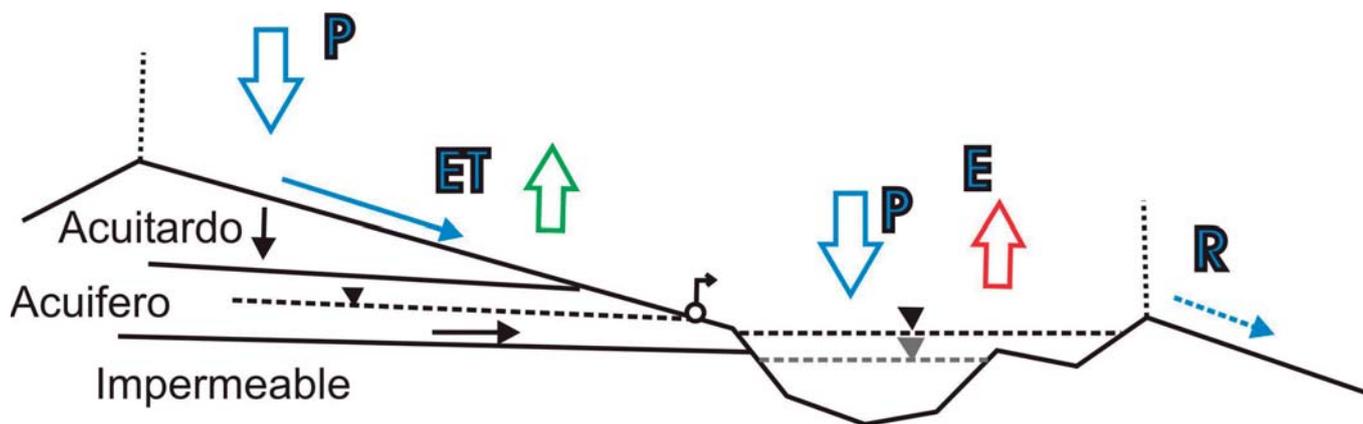


Fig. 4.- Modelo conceptual del funcionamiento hidrológico en la laguna de Zóñar. P = precipitación; ET = evapotranspiración real; E = evaporación y R = rebosadero.

Fig. 4.- Conceptual model of the hydrological functioning of Zóñar lake. P = rainfall; ET = actual evapotranspiration; E = evaporation and R = overflow.

nado y, sobre todo, de la superficie de orla de vegetación perilagunar, que se vería reducida en torno a 3 ha (Simulación 1) y 6 ha (Simulación 2).

Conclusiones

Los resultados de este trabajo aportan información acerca del comportamiento hídrico de la laguna de Zóñar. El modelo de funcionamiento, que ha sido validado en otros sistemas lagunares de campiña, se ajusta también a esta laguna, si bien en este caso con algunas variaciones respecto al modelo general (Fig. 4), fundamentalmente debido a la presencia de materiales acuitardos en la cuenca vertiente (margas y margocalizas) y de mayor permeabilidad (arenas y calcarenitas) a muro de los primeros, lo que supone un desfase de casi dos años entre los episodios de infiltración y los de descarga a partir de los dos manantiales principales. Los resultados del modelo numérico indican que el funcionamiento hídrico en esta laguna está fuertemente condicionado por pulsos de escorrentía, que condicionan ascensos bruscos de lámina de agua en poco tiempo. Los descensos de lámina de agua son graduales, lo que indica que las salidas de agua se producen por evaporación directa y a través de un emisario a partir de 16,5 m de profundidad. Esto implica un régimen hídrico de descarga: la laguna constituye una zona local de descarga

de aguas subterráneas. La gran extensión de la cuenca vertiente en relación con el área media de inundación y la gran profundidad de la cubeta son los factores claves que definen el hidroperiodo permanente de esta laguna. Finalmente, habría que destacar que la captación de aguas superficiales y subterráneas para regadío es, actualmente, poco significativa, pero es conveniente recordar la gran demanda potencial de agua de riego que representan los olivares de secano y el riesgo que representaría una futura explotación intensiva de las aguas subterráneas existentes en los niveles calcareníticos del Mioceno superior. Por tanto, sería conveniente establecer un área de protección hídrica que incluyera la cuenca vertiente de las lagunas Zóñar y Chica y, hacia el nordeste, parte de la cuenca del arroyo limítrofe (arroyo de Barriga) donde deben ser accesibles a la explotación las aguas subterráneas de los niveles calcareníticos. En esta área de protección hídrica propuesta deberían controlarse las captaciones de agua subterránea, especialmente los sondeos que capten las calcarenitas.

Agradecimientos

Se agradece a la Delegación de Medio Ambiente de la provincia de Córdoba la información climática e hidrológica suministrada. Este trabajo está parcialmente basado en los resulta-

dos de un Convenio (Moral *et al.*, 2008), financiado por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, y ha sido financiado en parte gracias a los Proyectos CGL2009 11-384 y RMN-3713.

Referencias

- ADARO (1989). *Estudio hidrogeológico de la laguna de Zóñar. Córdoba*. Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. 125 p.
- CMA (1992-2006). *Reservas y Parajes Naturales. Zonas Húmedas del Sur de Córdoba*. CMA, Delegación de Córdoba. Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2005). *Modelo digital del terreno de Andalucía. Relieve y Orografía*. Junta de Andalucía, Sevilla.
- Moral, F., Rodríguez-Rodríguez, M., Benavente, J., Beltrán, M. y Ortega, F. (2008). *Caracterización hidrogeológica de las lagunas de la Campiña Andaluza central*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 334 p.
- Rodríguez-Rodríguez, M., (2007). *Wetlands*, 27, 819-830.
- Sánchez de la Orden, M., Fernández-Delgado C. y Sánchez-Polaina, F.J. (1992). *Oxyura*, VI, Nº1.
- Valero-Garcés, B. L., González-Sampérez, P., Navas, A., Machín, J., Mata, P., Delgado-Huertas, A., Bao, R., Moreno, A., Carrión, J. S., Schwalb, A. y González-Barrios, A. (2006). *Journal of Paleolimnology*, 35,441-465