

Caracterización de un sistema hidrogeológico complejo con variabilidad extrema de la densidad: Laguna de Fuente de Piedra (Málaga). Vinculación con un sistema kárstico regional hipersalino

J. Heredia, J. M. Ruiz y A. García de Domingo

IGME. C/ Ríos Rosas, 23 –28003, Madrid-ESPAÑA
j.heredia@igme.es; jm.ruiz@igme.es; a.garcia@igme.es

RESUMEN

La Laguna de Fuente de Piedra -declarada Reserva Natural- fue uno de los primeros humedales españoles incluidos en el Convenio de Ramsar y es el segundo lugar en importancia de anidamiento de flamencos del Mediterráneo occidental tras La Camargue en Francia. Una gestión hídrica sostenible es fundamental en la estrategia conservacionista de esta Reserva, para ello un modelo numérico es una potente herramienta de apoyo. El sistema de la Laguna de Fuente de Piedra (Málaga) posee una gran complejidad hidrogeológica. La circulación del agua subterránea tiene lugar mediante sistemas de flujo estratificados debido a los contrastes de densidad entre el agua dulce, las aguas salobres, la salmuera subsuperficial y la salmuera procedente de un sistema kárstico regional hipersalino. Estos sistemas de flujos subterráneos, junto con la escorrentía superficial, descargan en la cuenca "endorreica" de la laguna, contribuyendo a mantener el humedal. La salmuera subsuperficial alcanza valores de salinidad 5 veces superiores al agua de mar y la procedente del sistema kárstico hipersalino supera a esta última en un orden de magnitud. Finalmente, se propone un modelo conceptual del sistema que integra la información de fuentes diferentes y explica muchas observaciones que otros modelos no han podido explicar.

Palabras clave: densidad variable, humedal, laguna de Fuente de Piedra (Málaga), modelo conceptual

Characterization of a complex hydrogeological system under extrem density variability: Fuente de Piedra lake (Málaga, Spain). Connection with an hypersaline regional karstic system

ABSTRACT

Fuente de Piedra lake –declared as a Nature Reserve- was one of the first Spanish wetlands to be incorporated into the Ramsar Convention and it is a nesting site for the largest flamingo colonies in the western Mediterranean, after the Camargue wetland in France. Sustainable water management is basic in conservation strategy of the Nature Reserve, so that numerical model will be a useful tool. Fuente de Piedra lake system (Málaga) is characterized by a great hydrogeological complexity. Groundwater flow takes place by means of stratified flow systems due to the existence of marked density contrasts between fresh groundwater, brackish waters, subsurface brines and hypersaline regional karst brines. Groundwater flows and surface runoff discharge into an endorheic basin lake, supporting the wetland. Subsurface brine reaches a TDS value about five times that of seawater and hypersaline regional karst brines is still one order of magnitude larger than that. Finally, it proposes a conceptual model that integrates information from different sources and it explains many observations that other conceptual models can't do it.

Key words: conceptual model, Fuente de Piedra lake (Málaga), variable density, wetland

Introducción

La laguna de Fuente de Piedra, posee una cuenca endorreica de unos 150 km², que representa unas diez veces el área de la laguna, 13,5 km². La cuenca se sitúa en el norte de la provincia de Málaga, en la divisoria hidrográfica entre la cuenca del Guadalquivir y la cuenca del Guadalhorce (Fig. 1). Para el período 1995/96-2007/08, en la cuenca de la laguna, la precipi-

tación y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite) media anual, se estimaron en 467 mm año⁻¹ y 830 mm año⁻¹ respectivamente y, en la laguna, la evaporación a lámina libre en 1467 mm año⁻¹ (IGME, 2009). La laguna posee un régimen estacional, secándose en verano. En trabajos anteriores, los recursos hídricos medios en la cuenca se estimaron entre 20 y 23,6·10⁶ m³ año⁻¹; de éstos, 6·10⁶ m³ año⁻¹ corresponden a la precipitación directa sobre la lagu-

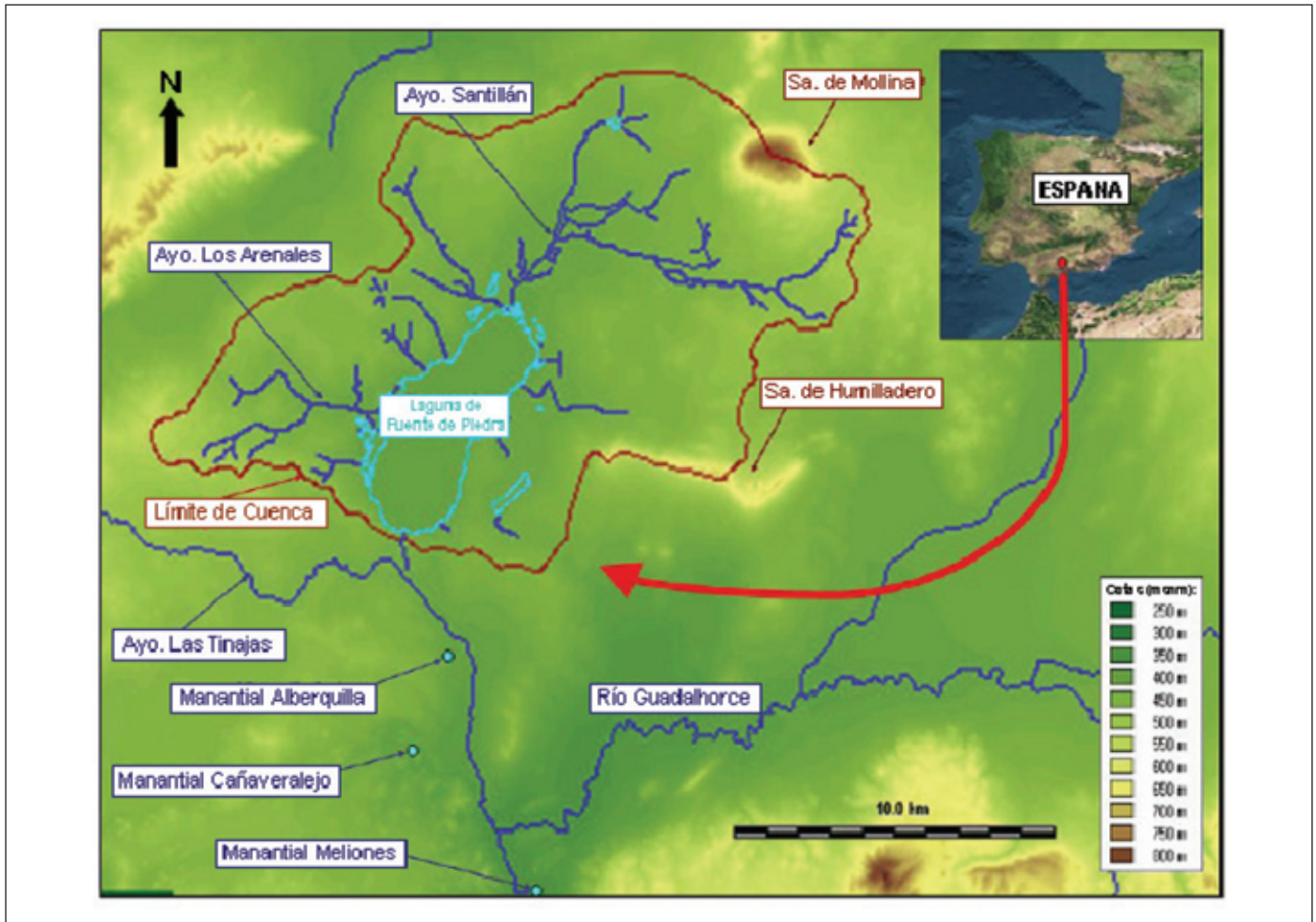


Figura 1. Localización de la cuenca de Fuente de Piedra
 Figure 1. Location of the Fuente de Piedra Lake basin

na; 5,6 a $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ a la escorrentía superficial y 8,6 a $10,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ a la subterránea (Linares, 1990; ITGE, 1998).

Los cauces más importantes de la red hídrica superficial son los arroyos Santillán, al norte, y Los Arenales, al oeste, con unas cuencas de 55,08 km² y 20,21 km², respectivamente, que representan algo más del 50% de la cuenca de la laguna. La superficie restante está ocupada por pequeños arroyos y cuencas endorreicas (Linares *et al*, 2001). En los últimos 15 años, si se exceptúa los años húmedos o los eventos tormentosos excepcionales, el aporte superficial a la laguna es irrelevante y se restringe a las aguas residuales de las poblaciones de Fuente de Piedra (2232 h) y Humilladero (3016 h).

Respecto a las demandas hídricas de este sistema, el requerimiento de jerarquizarlas y el establecer una gestión sostenible requiere definir un modelo con-

ceptual consistente y desarrollar un modelo numérico coherente con aquel.

El IGME da comienzo a su actividad investigadora en la cuenca en el año 1975. En 1984 presenta el primer gran estudio hidrogeológico de la misma (ITGE, 1984). Posteriormente este sistema fue objeto de Tesis Doctorales que lo estudiaron tanto en su conjunto (Linares, 1990), como en aspectos parciales (Almecija, 1997) o enmarcados en estudios regionales (Rodríguez, 2002). En 1997/98 se realizó el último estudio integral sobre los recursos hídricos de la cuenca. En los últimos años, el IGME continúa desarrollando trabajos de investigación en este sistema hidrogeológico orientados a caracterizar y definir un modelo conceptual de funcionamiento consistente que sea base de un modelo numérico, además de iniciar estudios paleoclimáticos, en el marco del cambio global.

Modelo geológico

La cuenca endorreica de Fuente de Piedra se encuentra emplazada en las Zonas Externas de la Cordillera Bética, en el denominado Complejo Caótico Subbético, (CCS) (Fig. 2).

El CCS está formado por series de rocas sedimentarias de origen subbético, cuya edad esta comprendida entre el Triás y el Mioceno inferior. Se caracteriza por presentar una estructura interna muy compleja y deformada, afectada por procesos de intensa y larga aloctonía, que han deslizado gravitatoriamente perdiendo su coherencia interna, transformándose en un conjunto de masas caóticas brechificadas (Vera *et al.*, 2004). Estas masas deslizadas también se conocen como Complejo Olistostrómico Subbético (Perez López *et al.*, 1994)

Litoestratigrafía

Complejo Olistostrómico Subbético

Debido al predominio de materiales triásicos en su composición, esta unidad ha sido cartografiada como Triásico y denominada de diferentes formas "Triás de Antequera-Osuna" o "Triás en facies germano-andaluza" (Cruz San Julián, 1972).

Este complejo megabréchico es el producto de la resedimentación de series subbéticas que se deslizan mediante flujos gravitatorios de alta densidad, mezclados con depósitos de sedimentación autóctonos. Está constituido, como todo olistostroma, por una matriz formada, fundamentalmente, por arcillas, margas, yesos y sales, producto de la resedimentación de materiales asociados al Triásico superior y unos olistolitos o bloques, de naturaleza y tamaño muy variado, desde centimétrico a kilométrico -"montañas enteras"- (Vera y Martín Algarra, 2004). Los olistolitos, están formados por materiales triásicos no desestructurados (dolomías negras, arcillas, yesos y sales), y por calizas y dolomías brechificadas del Jurásico, (Lías inferior y medio), con un espesor medio de unos 200 m y máximos de 500 m (sierras de Molina y Humilladero). Asimismo, en esta zona se han cartografiado otros bloques asignados al Cretácico, formados por margas y margocalizas blancas que pasan hacia techo a margocalizas y margas de tonos rosados. Los olistolitos paleógenos están constituidos por margas y margocalizas blancas con escaso interés hidrogeológico.

La edad asignada al Complejo Caótico Subbético se haya comprendida entre el Burdigaliense superior y el Tortoniense inferior (García Cortes *et al.*, 1991, Sanz de Galdeano *et al.*, 1992).

Dentro de los límites de esta cuenca endorreica se ha localizado, mediante sondeos, a unos 50 m de profundidad por debajo de la laguna, un nivel de acumulación de materiales yesífero-salinos. Este nivel puede corresponder a una concentración sedimentaria de este tipo de litologías o al sustrato autóctono o para-autóctono, del CCS.

Mioceno superior

Esta unidad aflora ampliamente en la cuenca de Fuente de Piedra, fundamentalmente por el sector septentrional de la misma. Esta constituido por una serie de calcarenitas bioclásticas, arenas y margas, con intercalaciones de niveles de conglomerados. Su sedimentación se ha realizado discordantemente sobre el Complejo Caótico Subbético soterrando un importante paleorelieve, en algunas zonas muy abrupto. Este factor y su ambiente de sedimentación han condicionado la existencia de grandes variaciones locales de espesor, que puede alcanzar el centenar de metros, y el predominio local de ciertas facies litológicas.

Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios aflorantes en la cuenca pueden agruparse, según sus características hidrogeológicas, en varios conjuntos morfológicos: depósitos de laderas, sistemas aluviales, depósitos endorreicos y lagunares, travertinos, depósitos eluviales y costras.

Tectónica

La tectónica de la región, esta condicionada por la distribución y acumulación sedimentaria de los materiales yesífero-salinos del CCS, cuyos tipos estructurales dominantes se centran en procesos de desplazamientos tectónicos, deformaciones por transformación de yeso-anhidrita, disolución de materiales evaporíticos y movimientos halocinéticos. Pérez-López y Pérez-Valera (2003) señalan que la presencia de bloques del Jurásico, Cretácico o Terciario podría deberse o al arrastre de los materiales diapíricos en su ascenso, o al deslizamiento de algunos bloques procedentes de los mantos. Los procesos halocinéticos debieron de ocurrir antes, durante y después de los movimientos orogénicos alpinos, provocando que las facies olistostrómicas se mezclen con facies de origen diapírico.

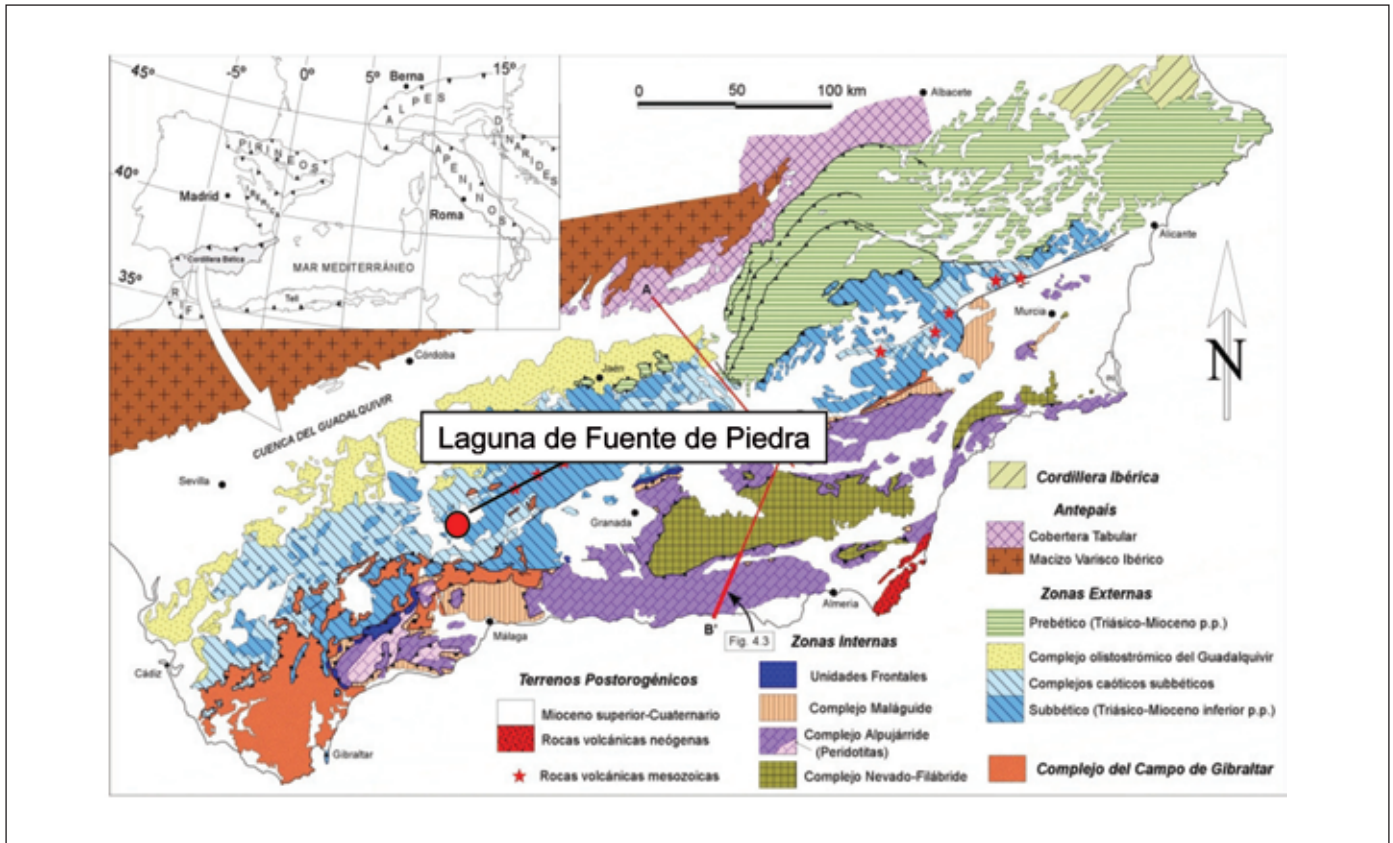


Figura 2. Mapa Geológico de la Cordillera Bética y sus unidades (Vera y Martín Algarra, 2004)
 Figure 2. Geologic map showing Betic Cordillera Units (Vera y Martín Algarra, 2004)

En el Complejo Caótico Subbético no se observan direcciones estructurales dominantes, aunque los humedales existentes en esta zona se orientan, preferentemente, en direcciones N-60°-E, coincidente con la dirección preferencial de karstificación (Durán y Molino, 1986).

Los depósitos del Mioceno superior aflorantes en esta cuenca endorreica, se disponen prácticamente horizontales o con suaves buzamientos y discordantes sobre los sedimentos del CCS. Se encuentran afectados por un sistema de fracturas que pueden asociarse a movimientos diapíricos recientes.

Geomorfología

El proceso morfológico más importante a indicar es la karstificación que se desarrolla sobre los materiales yesífero-salino del Complejo Caótico Subbético, CCS. Su desarrollo es más intenso en las zonas de acumulación de este tipo de litologías.

Hidrogeología de la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra

En esta zona se pueden definir dos acuíferos: el superior formado por los materiales de naturaleza detrítica asignados al Mioceno superior y Cuaternario y el inferior de tipo kárstico, formado sobre los materiales yesífero-salinos del CCS. En estos acuíferos se distinguen tres sistemas de flujo, uno en el acuífero superior y dos sistemas en el acuífero inferior.

Acuífero superior

Agrupación a los depósitos formados por las calcarenitas, arenas y conglomerados del Mioceno superior y los sedimentos detríticos del Cuaternario y a los bloques de calizas y dolomías jurásicas que constituyen las sierras de Humilladero y Molina y algunos otros de menor dimensión. Su espesor oscila entre 30 y 100 m, soterrando un paleorelieve preexistente desarro-

llado sobre el CCS. Este acuífero, permeable por porosidad intergranular y de naturaleza libre, presenta grandes variaciones de permeabilidad debido a los importantes y rápidos cambios laterales de facies existentes entre los materiales detríticos que lo conforman y los niveles margosos. Sus límites laterales coinciden aproximadamente con la divisoria de aguas superficiales de la cuenca de la laguna. Este acuífero define al sistema de flujo superior de tipo intergranular y localmente kárstico.

Acuífero inferior

El Complejo Caótico Subbético constituye un acuífero muy heterogéneo, fundamentalmente de naturaleza kárstica, desarrollado sobre la matriz arcillo-yesifera-salina de este olistostroma y sobre los bloques de naturaleza muy variada, tanto carbonatada como yesífero-salina. Este acuífero kárstico, de tipo confinado, se extienden, posiblemente, fuera de los límites de esta zona endorreica. En el CCS se pueden deter-

minar dos sistemas de flujo. El sistema de flujo *superior* se instala sobre litologías muy variadas, preponderantemente formadas por arcillas y niveles margosyesíferos estratificados, que configuran un medio de baja permeabilidad. El sistema de flujo *inferior* de tipo kárstico, se desarrolla sobre las acumulaciones masivas de yesos y sales. La geometría de este acuífero es difícil de determinar pues esta definida por la distribución sedimentaria de los materiales kárstificables (yesos y sales).

En esta investigación se identificaron cuerpos de salmueras ligados a kárstificaciones. El primer cuerpo de salmuera descubierto (sondeo Blancares-El Labrador, Fig. 3) se sitúa a más de 5 km al norte de la laguna -zona de descarga de la cuenca- y próximo a la divisoria de aguas. El emplazamiento de esta salmuera no se corresponde con el modelo conceptual clásico de las cuencas endorreicas en climas semiáridos, en el cual las salmueras se localizan en la zona de descarga (Risacher *et al*, 1998). Esta singularidad fue uno de los motivos para la realización de tres campañas de geofísica que indicaron la existencia de

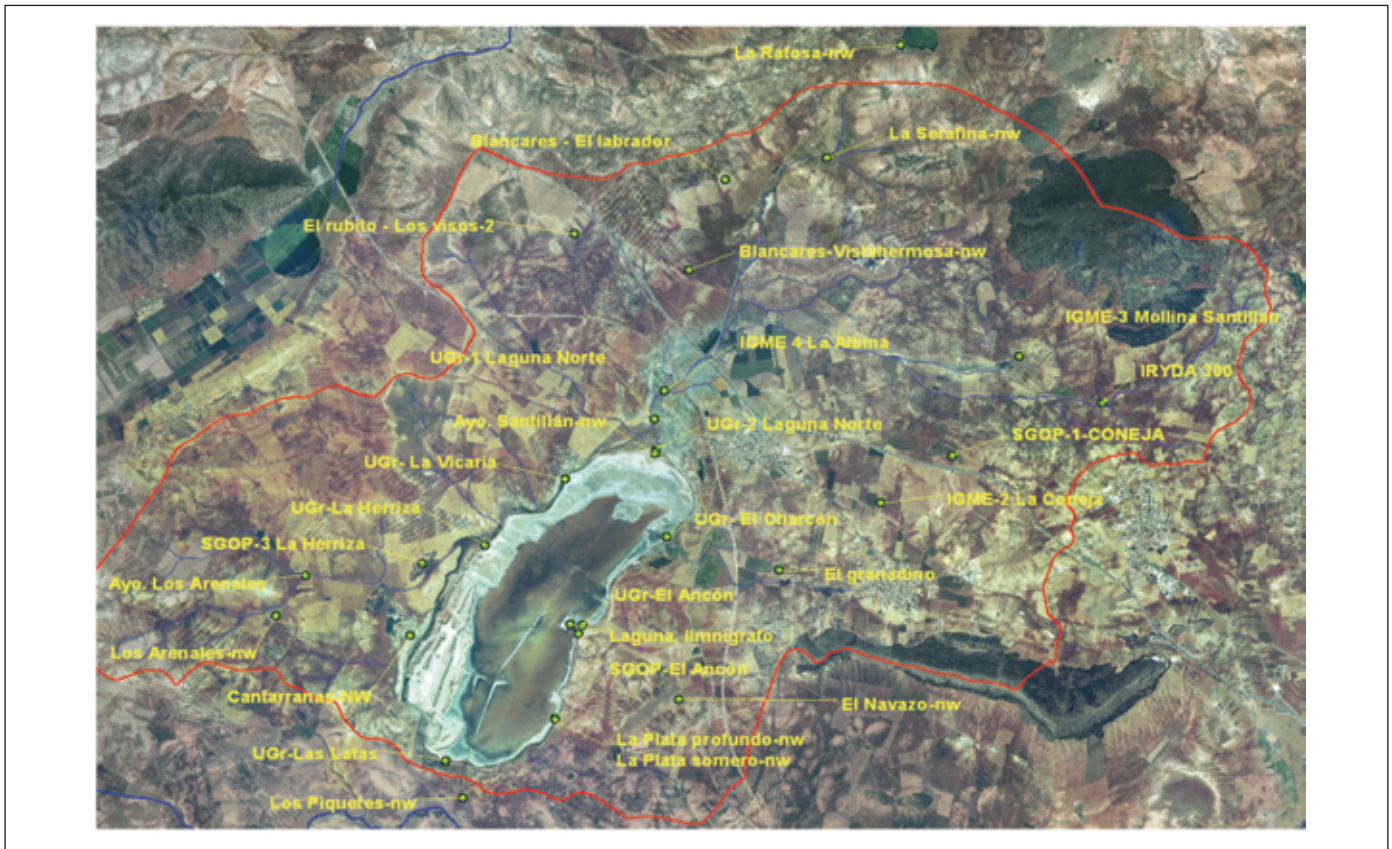


Figura 3. Sondeos de la red de control sistemática de conductividad eléctrica, CE
 Figure 3. Soundings of the electric conductivity, EC, systematic control network

numerosos cuerpos de salmueras no sólo en el entorno de la laguna, sino en distintos puntos de su cuenca. Sondeos posteriores confirmaron esta interpretación de la geofísica, al identificar en la cuenca cuerpos de salmueras en la divisoria de aguas Sur, Los Piquetes, y en la cuenca media, Blancares-Vistahermosa (Fig. 3). En el entorno de la laguna los sondeos de La Plata-profundo, Desembocadura del Santillán y Cantarranas (Fig. 3) localizaron salmuera asociada probablemente a niveles karstificados a unos 50-60 m de profundidad por debajo de la laguna (Ruiz *et al.*, 2006; Heredia *et al.* 2007).

Hidroquímica

La toma de muestras de salmuera se realizó, según el caso, con bomba electrosumergida o con bomba peristáltica. El protocolo de muestreo fue el siguiente: 1, realización en el sondeo de un perfil de conductividad eléctrica, CE; 2, identificación del nivel de interés y su

respectiva CE; 3, emplazamiento de la bomba en el nivel a muestrear; 4, remoción mediante bombeo del agua almacenada en el sondeo y 5, controlando la CE del agua bombeada y con este parámetro como índice de representatividad de la muestra se procede a su toma.

Identificación de familias de aguas

Mediante análisis químicos e isotópicos se han caracterizado familias de aguas, las cuales son concordantes con la estructura hidrogeológica de la cuenca. Su perfil hidroquímico se expone en el diagrama de Piper de la Figura 4 y sus principales rasgos son los siguientes:

- Las aguas de los *bloques carbonatados jurásicos* - acuífero superior- de las Sierras de Humilladero y Molina pertenecen a facies fundamentalmente bicarbonatadas cálcicas con valores inferiores a 0,9 mS/cm de conductividad. Presentan un notable contenido en nitratos (10-45 mg/L) cuyo origen

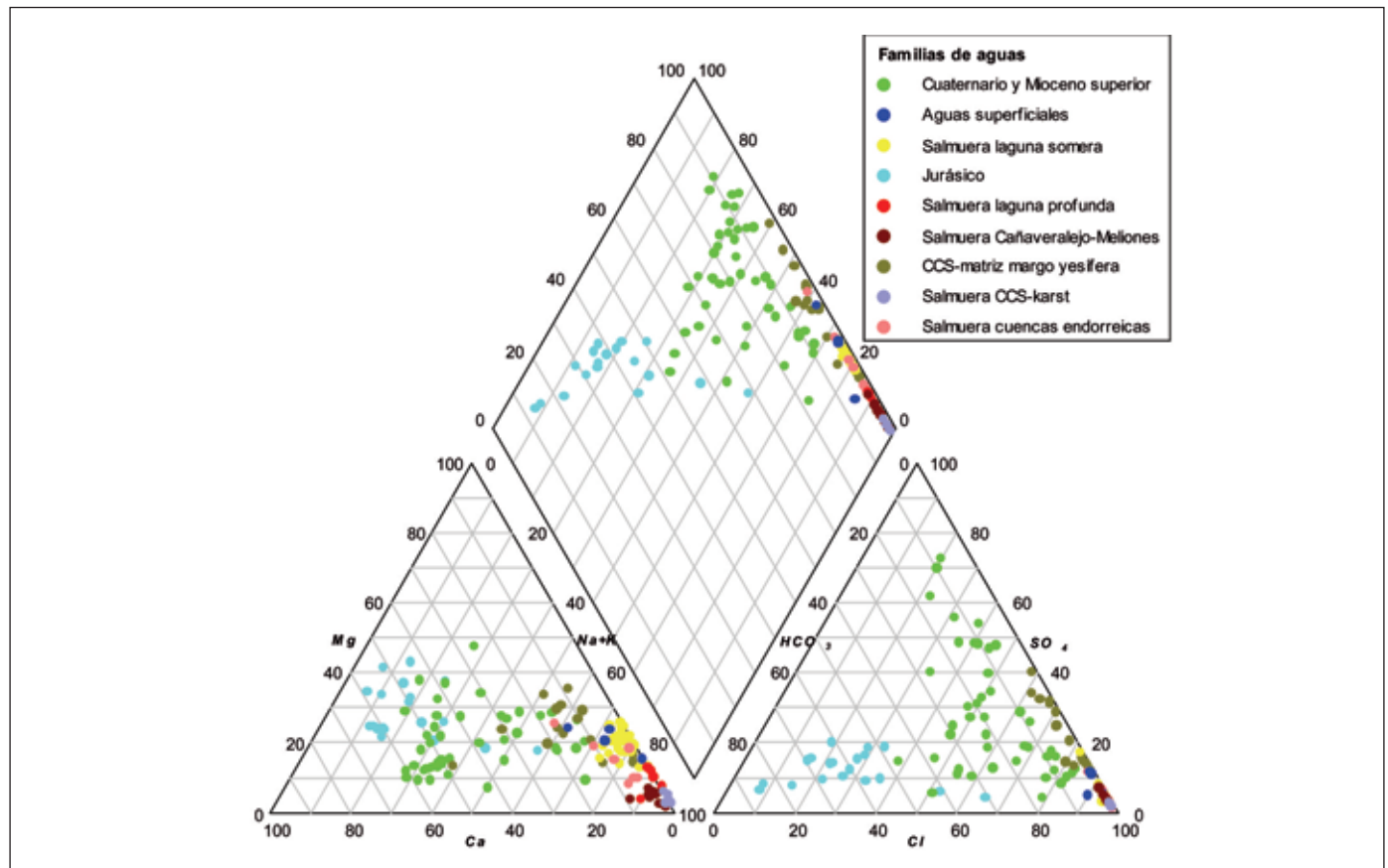


Figura 4. Diagrama de Piper (muestrados 2003-2007)
Figure 4. Piper Diagram (sampling date 2003-2007)

podría deberse a la explotación intensa para abastecimiento urbano de estos acuíferos, que habría provocado la inversión del sentido natural del flujo subterráneo. Debido a ello recibirían agua de peor calidad procedente de los vecinos acuíferos detríticos miocenos, con los que se encuentran conectados hidráulicamente y sobre los se desarrolla una importante actividad agrícola. Esta agua se mezcla con agua más profunda y de mayor tiempo de residencia, también movilizada por las fuertes extracciones. Ello se evidencia en los contenidos de ^3H de las muestras, pues son inferiores a los valores de la precipitación (3-5 UT). Los fuertes bombeos para abastecimiento producen también notables descensos piezométricos en las sierras.

- Las facies de las aguas de los *depósitos mio-cuaternario* son principalmente cloruradas-sulfatadas calcico-magnésicas, tienen mayores valores de conductividad (1-7 mS/cm) y el total de sólidos disueltos (TSD) varía de la Sg/L. Su contenido en nitratos varía entre 30 y 200 mg/L.

- Las aguas muestreadas en *materiales del Complejo Caótico Subbético* -acuífero inferior- poseen facies distintas según correspondan al sistema de flujo *inferior*, de tipo kárstico, o al *superior*, que discurre por la matriz margo-yesífera. El agua del sistema *inferior* son salmueras cloruradas sódicas, su conductividad eléctrica varía entre 225 y 235 mS/cm y su Residuo Seco (RS) varía entre 315 y 350 g/L. Las aguas del sistema *superior* presentan facies sulfatadas-cloruradas magnésico-sódicas, con valores de conductividad eléctrica entre 20 y 60 mS/cm y las concentraciones que alcanzan los 45 g/L de TSD.

Caracterización hidrogeoquímica de las salmueras

Uno de los aspectos característicos del sistema hidrogeológico de Fuente de Piedra es la, ya referida, existencia de salmueras cloruradas sódicas con contenidos de hasta 350 g/L de RS. Para la caracterización de

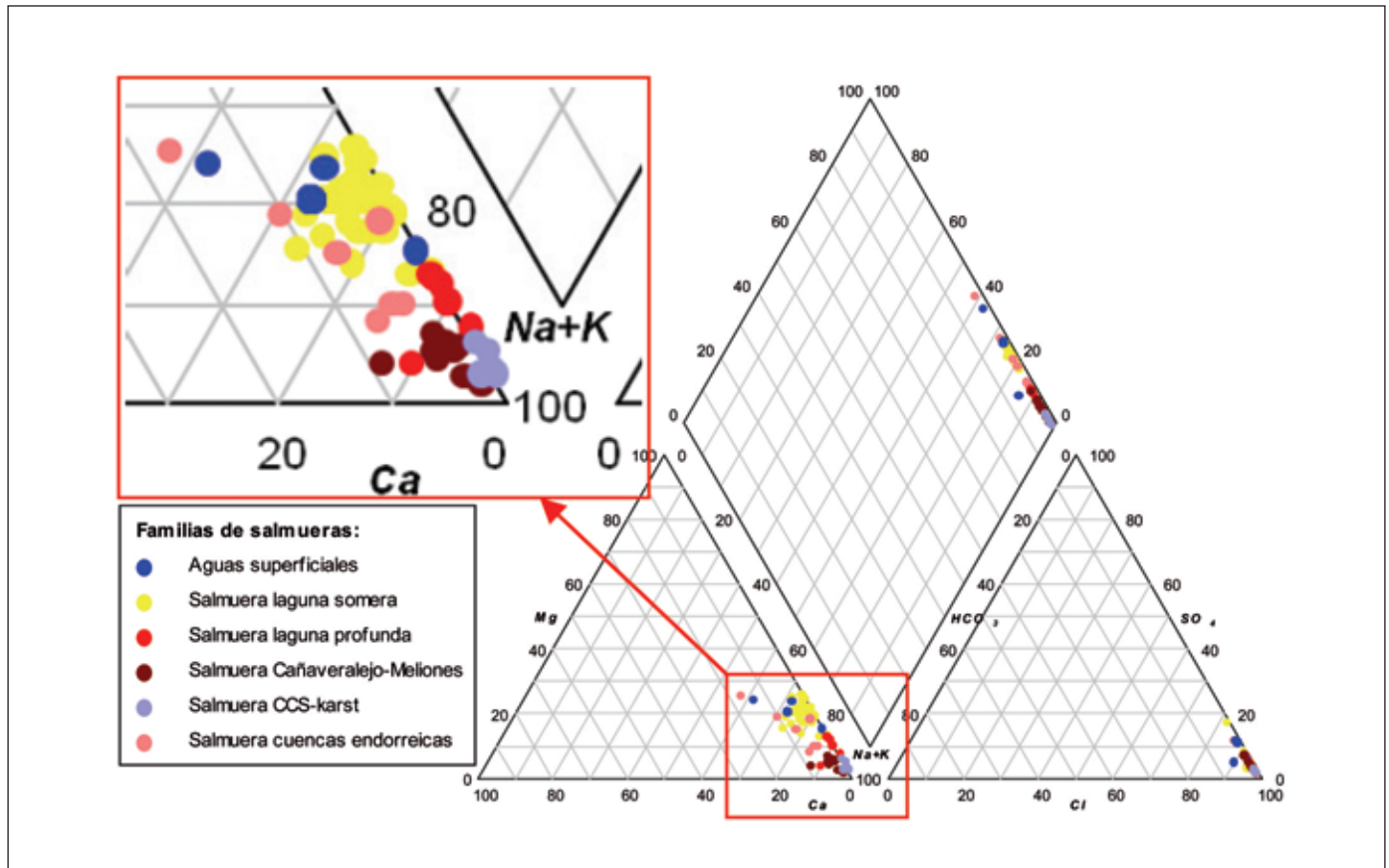


Figura 5. Caracterización de salmueras: detalle de diagrama Piper (TSD > 50 g/L)
 Figure 5. Groundwater brine samples (TDS > 50 g/L) Piper diagram detail

las mismas, se ha llevado a cabo una clasificación preliminar atendiendo básicamente a su distribución espacial, pero que considera el grado de vinculación con el sistema de flujo *inferior* del CCS, de tipo kárstico (Fig. 5). Así, se distinguen: una salmuera somera alrededor de la laguna de Fuente de Piedra, captada en piezómetros poco profundos (< 40 m) realizados por la Universidad de Granada en los '90; otra profunda, captada alrededor de la laguna; los cuerpos de salmuera en distintos puntos de la cuenca, que se consideran representativas del sistema *inferior* del CCS y, finalmente, la salmuera localizada en cuencas endorreicas vecinas a la de la laguna. Exceptuando la salmuera somera de los alrededores de la laguna, las restantes salmueras se han muestreado en sondeos cuyas profundidades varía entre los 100 m y los 150 m, construidos por el IGME en el marco de estos trabajos. Se presentan como referencia salmueras de los manantiales kársticos hipersalinos de Meliones y Cañaveralejo de la vecina cuenca del río Guadalhorce (Fig. 1).

De modo general, pueden distinguirse unas salmueras cloruradas sódicas (TSD hasta 200 g/L) con importantes contenidos de ión magnesio, sobre todo las someras de alrededor de la laguna y las de las cuencas endorreicas vecinas, de otras de facies exclusivamente cloruradas sódicas como las de los manantiales hipersalinos de la cuenca del Guadalhorce y las muestreadas en sondeos profun-

dos en los cuerpos de salmuera de la cuenca (Blancares-Vista Hermosa, Los Piquetes; Blancares-El Labrador, Fig. 3) que presentan una hidroquímica semejante. El origen de estas últimas salmueras se atribuye casi exclusivamente a un factor litológico por disolución de materiales evaporíticos existentes. Las salmueras profundas del entorno de la laguna se presentarían como una mezcla entre estas últimas salmueras cloruradas sódicas y las salmueras someras del entorno de la laguna.

En la Figura 6 se representan los gráficos de relaciones iónicas Cl/Na⁺ y Cl/Mg²⁺. En el primero se observa que las salmueras de los manantiales kársticos de la cuenca del río Guadalhorce y la de cuerpos, representativa del sistema *inferior* del CCS, se sitúan sobre la línea Cl-Na en relación 1:1. Ello se podría interpretar como un origen por disolución de halita (factor litológico por disolución de materiales evaporíticos). Las salmueras restantes se separan de esta relación.

En el gráfico Cl/Mg²⁺, las salmueras que se alinean en la recta Cl/Na 1:1, presentan para un mismo rango de concentración de magnesio, concentraciones elevadas de cloruro. En el resto de muestras, la concentración de magnesio aumenta proporcionalmente al incremento de la concentración de cloruro. Se observa que la concentración de magnesio es mayor en la salmuera subsuperficial del entorno de la laguna debido a procesos de concentración evapora-

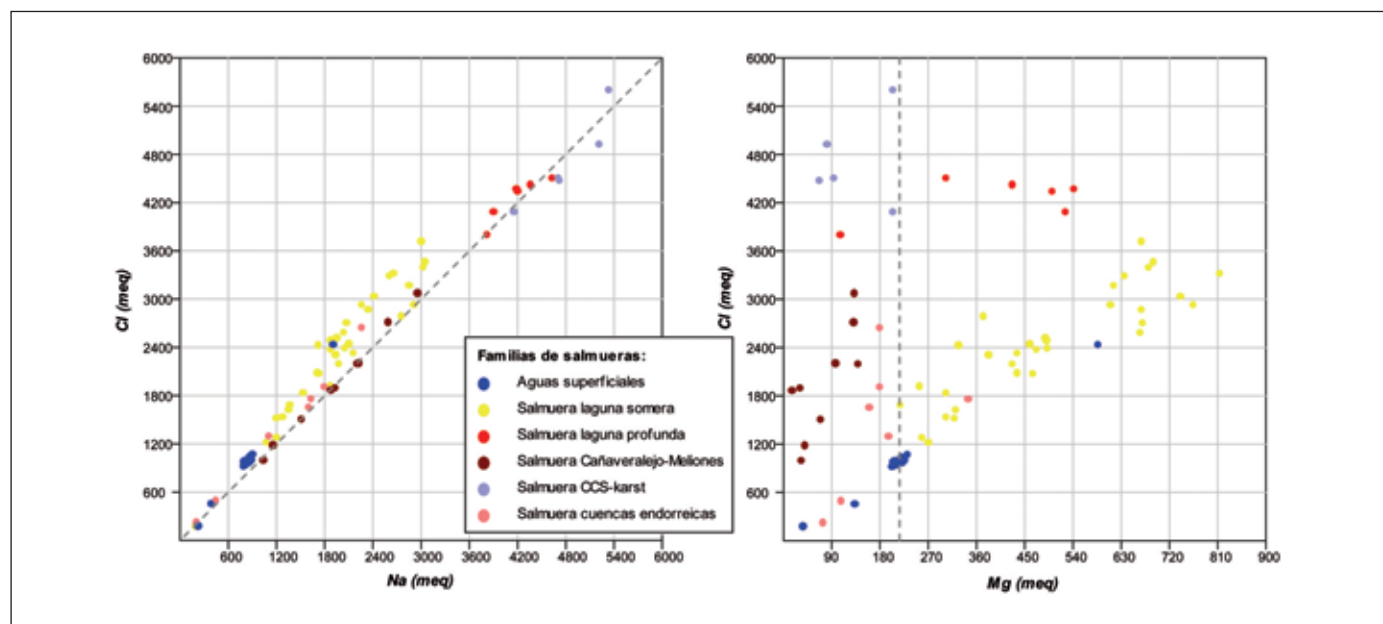


Figura 6. Relaciones iónicas Cl/Na⁺ y Cl/Mg²⁺
Figure 6. Ionic ratios Cl/Na⁺ and Cl/Mg²⁺

tiva, disolución y precipitación -precipitación de calca y disolución de yeso (desdolomitación)- que elevan la concentración del ión magnesio. Las salmueras profundas del entorno de la laguna presentan un comportamiento disperso, con rasgos que van desde los de las salmuera de los cuerpos a la salmuera somera del entorno de la laguna.

Caracterización isotópica de las salmueras

El diagrama $\delta^{18}\text{O}$ - δD (Fig. 7) permite apreciar la incidencia del proceso de evaporación sobre los grupos de salmueras que se han diferenciado. En un extremo, con los valores más positivos -indicativos de ser las más enriquecidas en isótopos estables-, se encuentran las aguas superficiales de la laguna y de charcas vecinas, conjuntamente a dos norias poco profundas situadas en el vaso de la laguna. Estas aguas presentan las salmueras más evaporadas. En el otro extremo, las salmueras de los cuerpos, repre-

sentativa del sistema *inferior* del CCS, y los manantiales hipersalinos de la cuenca del río Guadalhorce, con los valores más negativos, evidencian no haber sufrido proceso evaporativo alguno. Entre estos extremos se encuentran las salmueras del entorno de la laguna, con la particularidad que la salmuera somera se sitúa a lo largo de una teórica línea de mezcla desde las más evaporadas, que corresponden a los sondeos poco profundos de la costa Norte y Este de la laguna, a las menos evaporadas muestreadas en los sondeos de la costa Oeste y Sur. Las salmueras profundas del entorno de la laguna (sondeos de La Plata profundo, Desembocadura de Santillán y Cantarranas, ver Figura 3) se encuentran entre las más evaporadas, junto a las salmueras someras de los sondeos UGr-2 y La Plata somero (Fig. 3). Las salmueras de las cuencas endorreicas vecinas acusan un proceso de evaporación similar al de la salmuera somera de la costa Oeste y Sur de la laguna, con excepción de la laguna de La Ratosa.

En la Figura 8 se representan los valores de $\delta^{18}\text{O}$

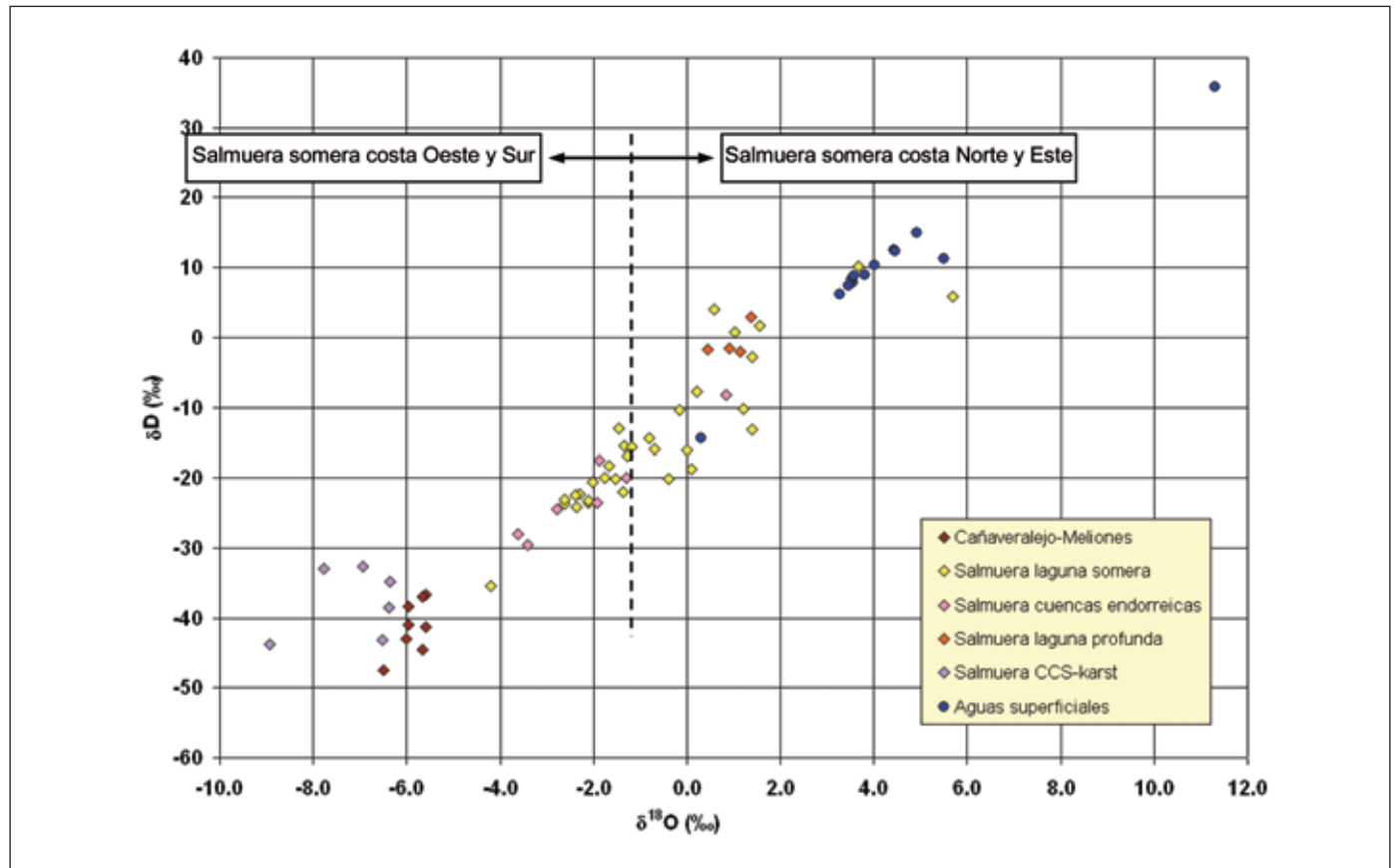


Figura 7. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ - δD de las muestras de salmueras
 Figure 7. Groundwater brine samples $\delta^{18}\text{O}$ - δD diagram

frente al Total de Sólidos Disueltos en g/L. Al igual que en el gráfico anterior, se diferencian claramente las salmueras somera y profunda del entorno de la laguna de Fuente de Piedra y las de las cuencas endorreicas respecto a la salmuera de los cuerpos y la de los manantiales hipersalinos de la cuenca del Guadalhorce. Estas últimas, para una misma señal isotópica, presentan un amplio rango de salinidades, indicando una dinámica subterránea distinta a las del entorno de la laguna. Se debe destacar que la salmuera con mayores TSD es la de los cuerpos, no presentan indicios de evaporación y poseen una señal isotópica similar a la de los manantiales hipersalinos y, al igual que estos, su salinidad parece deberse a la disolución de halita. Respecto a la salmuera somera del entorno de la laguna, las muestras más salinas (TSD > 150 g/L) corresponden a sondeos de la costa Norte y Este, la evolución de su TSD es proporcional al $\delta^{18}\text{O}$. Sin embargo, esta tendencia que podría suge-

rir que la salinidad de estas salmueras es proporcional a su grado evaporación, no es ratificada por las aguas superficiales pues las mismas estando más evaporadas que las salmueras someras son notablemente menos salinas. El análisis de la salinidad de las aguas superficiales debe considerar que no son el resultado exclusivo de la evaporación, según el caso, contribuyen además: la mezcla de aguas de precipitación directa y de descarga subterránea y la disolución de la costra salina del vaso de laguna. Hecha esta salvedad se observa que ambas salmueras, la somera y la de las aguas superficiales, presentan una baja dispersión y tendencias claras pero diferentes entre sí. Ello indicaría el distinto peso que tendría el proceso de evaporación-concentración en la génesis de ambas salmueras por existir otros aportes. En igual sentido, la salmuera profunda del entorno de la laguna, si bien presenta un grado de evaporación igual al de la salmuera somera más evaporadas es mucho

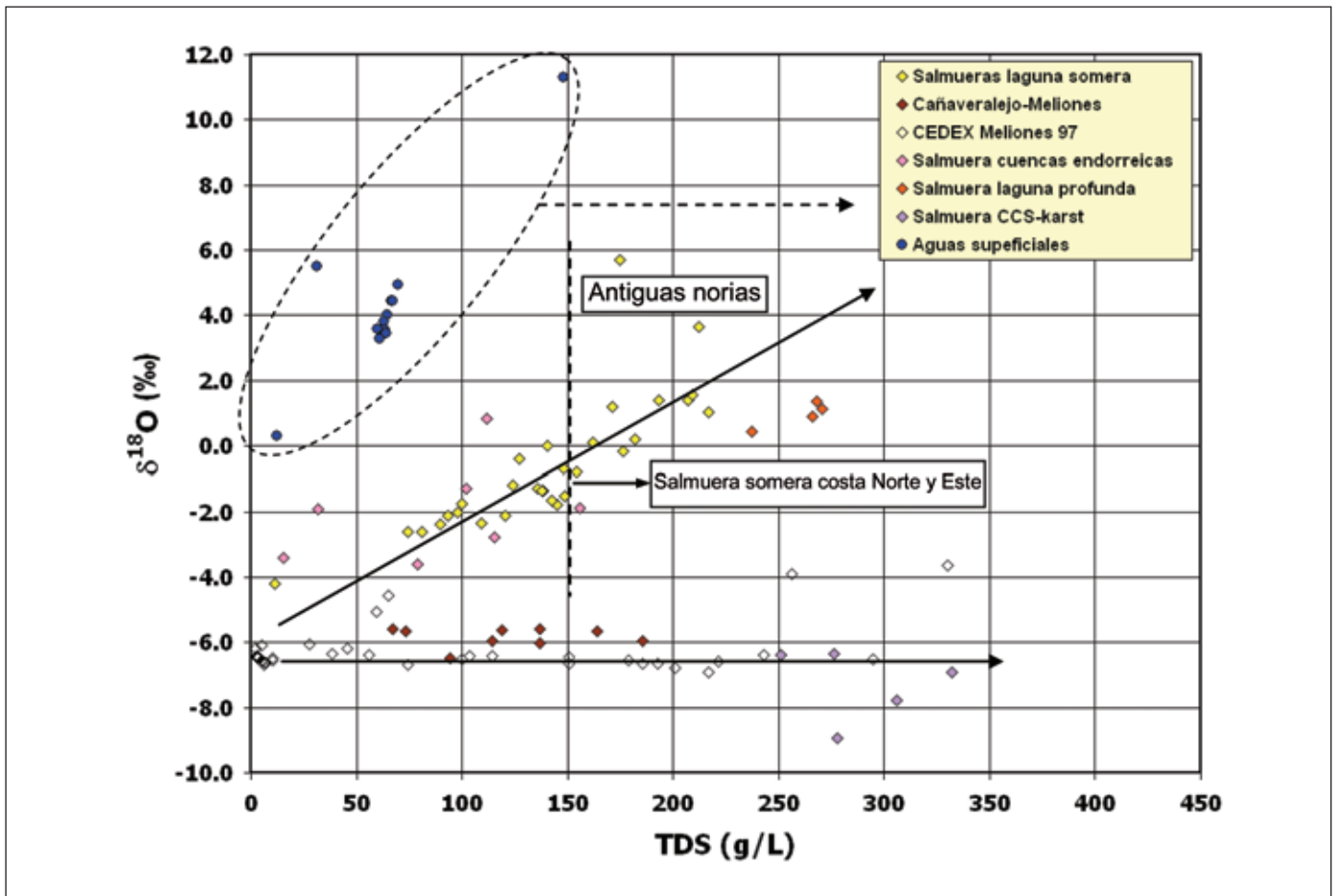


Figura 8. Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ -TSD (g/L)
 Figure 8. $\delta^{18}\text{O}$ -TDS (g/L) relationships

más salina que esta. A su vez, la salinidad de la salmuera profunda del entorno de la laguna es algo menor que la de los cuerpos. Todo ello podría presentar a la salmuera profunda del entorno de la laguna como una mezcla de la salmuera profunda de los cuerpos y la somera de la laguna, algo que ya era sugerido por la hidroquímica. La salmuera de las norias poco profundas del vaso de laguna está en una posición intermedia entre las de aguas superficiales y la somera. Finalmente, la salmuera de los sondeos de cuencas endorreicas vecinas presenta una evolución similar, aunque con mayor dispersión que la salmuera somera.

El análisis expuesto podría indicar la existencia en la cuenca endorreica de Fuente de Piedra de salmueras profundas asociadas exclusivamente a la presencia y disolución de materiales evaporíticos y sin conexión aparente con los procesos de concentración evaporativa que ocurre en el entorno de la laguna. Asimismo, sugeriría que la laguna recibe la descarga de estas salmueras profundas procedentes del sistema de flujo *inferior*, de tipo kárstico, del CCS.

Datación isotópica

Las aguas de los depósitos miocuaternarios tienen un contenido de ^3H igual al de la precipitación actual. El menor contenido de ^3H de las aguas de los bloques carbonatados de las sierras pone en evidencia una mezcla de aguas recientes con otras más antiguas. El bajo contenido de ^3H de las aguas salobres que discurren por los materiales margo-yesíferos del CCS indican tiempos de residencia prolongados, ello es coherente con su mayor evolución hidroquímica. La salmuera somera, excepto las norias poco profundas del vaso de la laguna, y la de las cuencas endorreicas tienen un escaso contenido de ^3H . La salmuera profunda de la laguna y la de los cuerpos, representativa del sistema *inferior* del CCS, carecen de ^3H .

Análisis piezométrico y de circulación de flujo

Metodología para el estudio de la densidad de las salmueras

En un estudio piezométrico de salmueras y aguas salobres es necesario conocer su densidad ρ , al menos, su densidad relativa, ρ_r , que es la relación entre su densidad y la densidad del agua dulce ($999,87 \text{ kg/m}^3$). Ello permite trabajar con niveles equivalentes que, al homogeneizar, ofrece tratar de forma conjunta y congruente las aguas independientemente

de su densidad. La medición de perfiles de CE es una técnica que tiene algunas ventajas frente a la determinación de la densidad. La medición de perfiles es más económica, ágil y ofrece una valoración continua del medio frente a la visión discreta que da el análisis. Los análisis químicos son insustituibles para caracterizar las aguas, pero al complementarlos con una red de perfiles de CE se alcanza, en términos de densidad, una caracterización más acabada del sistema.

Conocer la densidad relativa de la salmuera a partir de la conductividad eléctrica medida en campo exige realizar una transformación mediante una expresión matemática adecuada. En este ambiente salino, la definición de esta expresión resulta difícil, pues el rango de variación de la CE medida en campo varía entre $0,417 \text{ mS/cm}$ y 235 mS/cm y la densidad relativa, ρ_r , entre 1 y 1,20. Esta expresión se ha establecido mediante correlaciones entre la CE de campo y el Residuo Seco, RS, y entre este y la densidad relativa, ρ_r .

La correlación entre la CE de campo y el RS se estudió considerando un umbral que permitía establecer 2 correlaciones distintas según los datos fuesen mayores o menores a dicho umbral. Se estudiaron correlaciones para tres umbrales distintos. El umbral definido por $\text{CE} = 100 \text{ mS/cm}$ y $\text{RS} = 90 \text{ g/L}$ fue el que permitió establecer correlaciones más ajustadas y que, a su vez, ofrecían mejores acoples. Para valores mayores a este umbral ($\text{CE} > 100 \text{ mS/cm}$ y $\text{RS} > 90 \text{ g/L}$) se ajustó una correlación exponencial con un coeficiente de correlación de 0,987 y para valores menores se ajustó una correlación potencial de 0,999. Ambas correlaciones se acoplaron, en el intervalo de CE de $95,3 \text{ mS/cm}$ a $118,1 \text{ mS/cm}$, mediante la semisuma de las dos correlaciones. Entre los residuos secos y la densidad relativa se estableció una correlación con un coeficiente de correlación igual a 0,999.

Las correlaciones dadas permiten restituir la densidad relativa, ρ_r , a partir de la CE medida en campo. Esta metodología ($\text{CE}_{\text{campo}} \rightarrow \text{RS} \rightarrow \rho_r$) se contrastó con la expresión del Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards de UNESCO (1984, en Mc Cutcheon, *et al.*, 1992), que calcula la densidad relativa a partir del residuo seco, con corrección de temperatura. Los criterios de contraste fueron la media del valor absoluto de los residuos y la media de sus cuadrados, siendo el residuo la diferencia entre las densidades calculada y observada. El método propuesto mejora los resultados de la expresión de la UNESCO en más de un orden de magnitud para ambos criterios. Contrastes análogos con otras expresiones empíricas de uso habitual, ofrecieron resultados similares que ratifican la ventaja de esta metodología.

Desde el año 1992 se han realizado perfiles de CE en sondeos de la cuenca. A partir del 2004, esta práctica ha sido parte de la sistemática del proyecto y desde 2007 se mide mensualmente la red de control (Fig. 3) que monitoriza la evolución de la salinidad de los subsistemas de flujos.

Análisis piezométrico y de circulación de flujo

La densidad relativa del agua en el sistema hidrogeológico de Fuente de Piedra varía entre 1, en las calizas jurásicas, y valores algo mayores a 1,2, en las salmueras profundas. Esta gran variabilidad de la densidad en un escenario de las dimensiones de la cuenca (150 km²) y los altos valores que alcanza, obliga a realizar una piezometría tridimensional si se desea analizar el conjunto de sistema o las salmueras. La información disponible no permite definir una piezometría del sistema en 3D. Sin embargo, existe el conocimiento suficiente para interpretar en las salmueras tendencias piezométricas, sentidos de flujo y realizar estimaciones sobre sus aportes. En el acuífero superior, con circulación de agua dulce, se puede realizar un análisis piezométrico normal, aunque para caracterizar su patrón de flujo es ineludible considerar la salmuera y el condicionamiento que impone la misma a la escorrentía de este subsistema.

La piezometría del acuífero superior -formado por depósitos del mio-cuaternario y los bloques del Jurásico de la sierra- definen un flujo convergente hacia la laguna, como es característico en las cuencas endorreicas. En los últimos 15 años, como resultado de las fuertes extracciones para abastecimiento y regadío, se ha reducido drásticamente la descarga subterránea en el sector del acuífero asociado a las cuenca del Santillán, la mayor de las subcuencas de la laguna. Ello se manifiesta en los perfiles de CE realizados desde el año 1992 en sondeos de la costa norte de la laguna -desembocadura del arroyo de Santillán- que permiten observar la posición somera de la salmuera superficial que se adentra centenares de metros desde la laguna y cuya cuña e interfase tienen una gran estabilidad estacional e interanual, independientemente de los niveles de la laguna o de los piezométricos (Heredia *et al.*, 2004a). En el sondeo UGr-1, situado a 500 m de la costa norte (Fig.3), de 2003 a 2008 la CE de los niveles más someros osciló entre 15,5 y 19 mS/cm (Fig 9.a). Los perfiles de tomografía eléctrica realizados en 2005 y 2006 ratifican esta conclusión (Ruiz *et al.*, 2006), Fig. 10. Otros perfiles de CE en distintos sondeos y perfiles tomográficos ejecutados en la costa norte y este de la laguna ponen de manifiesto que en este sector la descarga del acuífero superior puede no ser relevante (Heredia *et al.*, 2007; Ibarra *et al.*, 2008). En contraste, los perfiles de

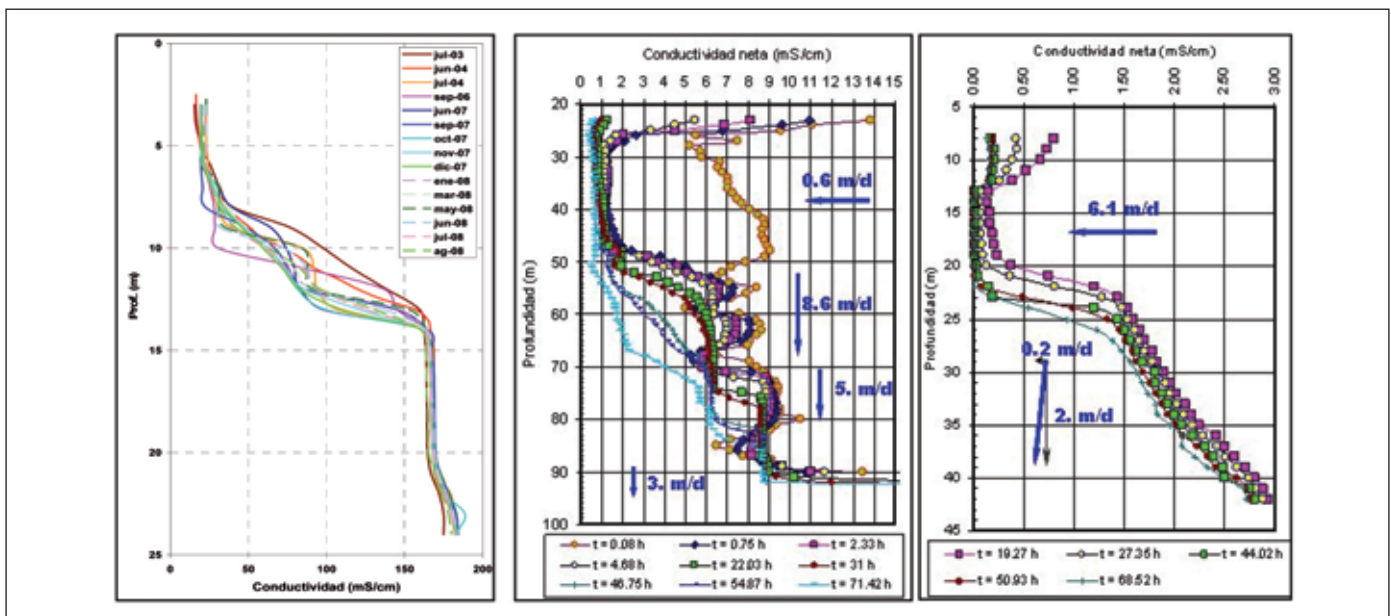


Figura 9. Perfiles de CE y ensayos de Flujo en el ámbito del acuífero superior. a. Sondeo UGr-1: Perfil de CE. b. Ensayos de flujo en sondeos emplazados en La Coneja

Figure 9. EC profiles and flow-tests in upper aquifer. a. UGr-1 piezometer: EC profile. b. Flow-tests in La Coneja piezometer

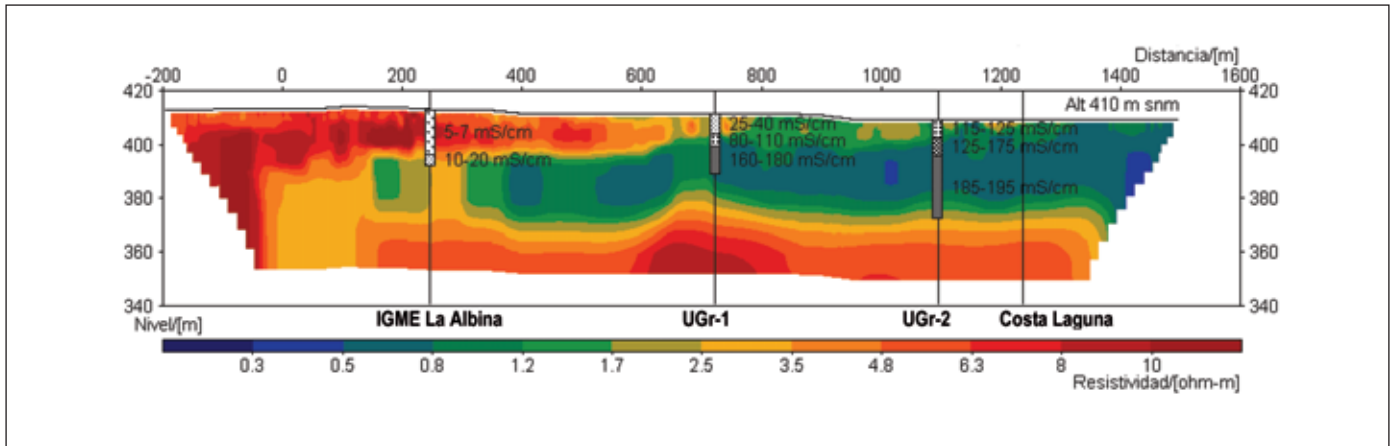


Figura 10. Tomografía eléctrica: posición de sondeos y costa de la laguna
 Figure 10. Electrical tomography profiling: boreholes situation and lake coastline

tomografía eléctrica ejecutados en la margen oeste-suroeste sugieren que este es el único sector de la costa donde el acuífero superior descarga un aporte significativo a la laguna.

Se ha identificado la presencia de flujos profundos vinculado a la matriz margo-yesífera del CCS mediante ensayos de flujo en sondeos emplazados en el paraje de La Coneja (Fig. 3). Estos sondeos atraviesan en el acuífero mio-cuaternario y alcanzan la matriz margo-yesífera del CCS. En ellos se identificaron por primera vez flujos profundos descendentes, que indican una recarga desde el acuífero superior a la matriz margo-arcillosa (Fig. 9.b). Los perfiles de CE de los dos sondeos profundos, IRYDA-300 y SGOP1-La Coneja (Fig. 3), que penetran en la matriz margo-yesífera del CCS, indican una gran estabilidad de la salinidad de estas aguas salobres, sin variaciones estacionales, ni interanuales (Fig 11.a).

Los perfiles de CE en los sondeos que alcanzan la salmuera ligada al sistema de flujo inferior del CCS, de tipo kárstico, tanto en los cuerpos alejados de la laguna, Blancares-El Labrador, Blancares-Vistahermosa y Los Piquetes (Fig. 3), como en los niveles profundos en el entorno de la laguna, Arroyo Santillán, La Plata profundo y Cantarranas (Fig. 3), poseen una gran estabilidad estacional e interanual (Figs. 11.b y c). En los cuerpos, la salmuera muestra prácticamente una interfaz neta, que produce un salto abrupto en la CE (Fig. 11.b) y se sitúa en torno a 330 msnm. En términos de nivel equivalente de agua dulce, la carga piezométrica media de la salmuera ligada a los flujos profundos del CCS evoluciona desde 422 msnm, a 5 km al norte de la laguna en Blancares-Vistahermosa, a 420,25 msnm, en el extremo de la costa norte en Arroyo Santillán, hasta alcan-

zar, en la zona sur de la laguna, niveles en torno a 419 msnm, en La Plata profundo y Los Piquetes. Estos niveles medios parecen sugerir un muy suave gradiente regional decreciente en sentido sur (0.5 ‰ a 0.3 ‰), hacia la cuenca del río Guadalhorce. Los hidrogramas son estables, con una variación estacional decimétrica, exceptuando a Blancares-Vistahermosa que se mantiene invariable (Fig. 12.a).

En el análisis piezométrico de las salmueras somera y profunda del entorno de la laguna se han utilizado los hidrogramas de dos sondeos emplazados en la costa norte y de otros dos situados en la sureste de la laguna. En cada par de sondeos, uno monitorizaba los niveles medios de la salmuera somera y el otro los de la profunda. En el norte, los sondeos Arroyo Santillán y UGr-2 alcanzan las salmueras profunda y somera, respectivamente. Los niveles observados de la salmuera profunda han sido inferiores a los niveles de la somera de forma prácticamente constante a lo largo del año, siendo la diferencia media de 0,21 m. En contraste con ello, si bien los hidrogramas de niveles equivalentes (Fig 12.b) son igualmente estables, en estos se observa que los niveles de la salmuera profunda y somera varían en torno a 419,4 msnm y 410,6 msnm, respectivamente, siendo la diferencia 8,8 m. En La Plata, costa sureste de la laguna, se presenta una situación análoga; con la diferencia que, en general, los niveles observados de las salmueras profundas son superiores a los de la somera y la diferencia media es de 0,28 m. Los hidrogramas de niveles equivalentes son igualmente estables, variando los niveles de la salmuera profunda en torno a los 416,2 msnm y los de la somera en torno a 409,5 msnm, la diferencia media es de 6,7 m.

Los niveles equivalentes permiten contrastar dife-

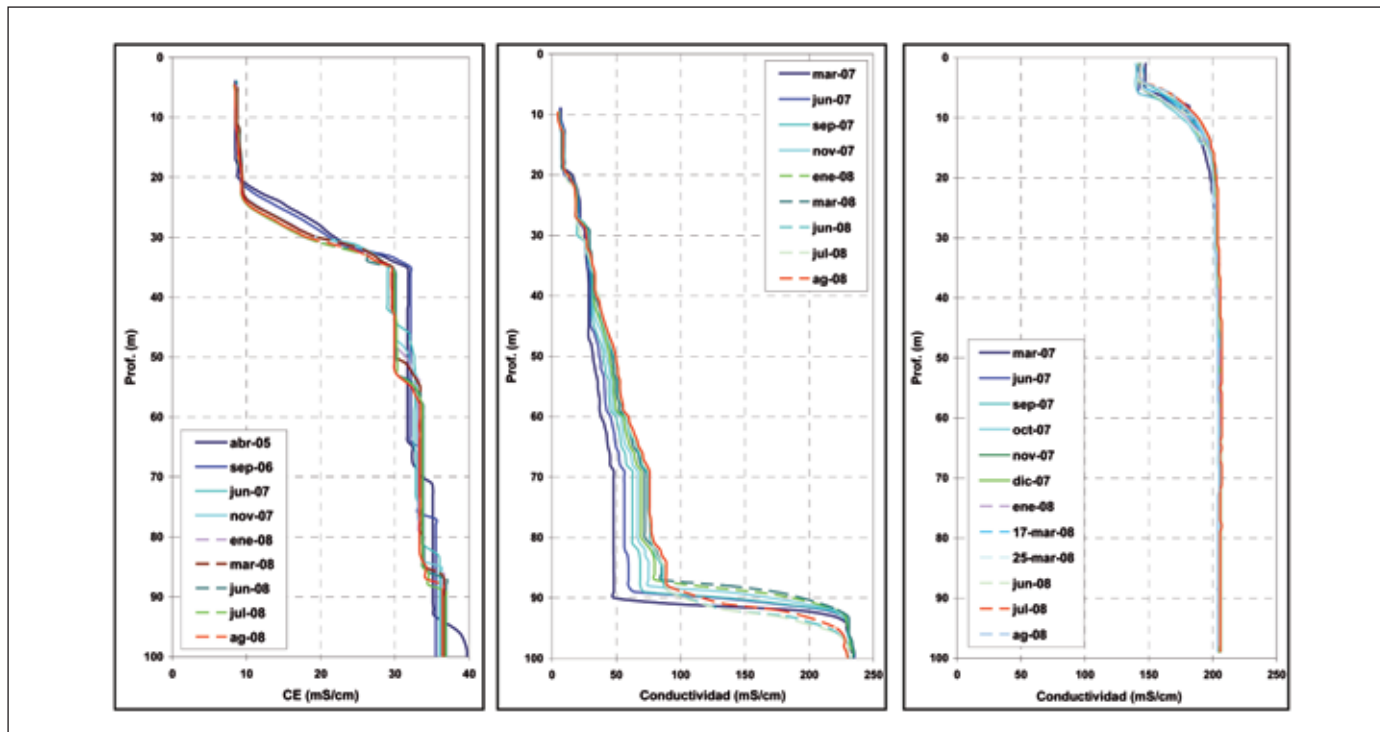


Figura 11. Perfiles de CE de sondeos que alcanzan distintas salmueras del Complejo Caótico Subético. a. Sondeo en matriz margo-yesífera: IRYDA-300. b. Sondeo en cuerpos de salmuera: Blancares-Vistahermosa. c. Sondeo en niveles profundos entorno de laguna: Santillán

Figure 11. Groundwater brines EC profiles in Subbetic Chaotic Complex boreholes. a. IRYDA-300 borehole in clay-gypsiferous matrix. b. Blancares-Vistahermosa borehole in conducting brine bodies. c. Sounding in deep label at the lake edge: Santillán

rentes cargas piezométricas con densidades distintas. Así, se puede observar que tanto en la costa norte como en la sureste existe un gradiente ascendente, que indicaría la descarga en la laguna de la salmuera profunda ligada al sistema de flujo inferior del CCS. Pues, no debe olvidarse, que tanto la hidroquímica como los isótopos indican que la salmuera profunda del entorno de la laguna es una mezcla de la salmuera somera y de la procedente del sistema kárstico del CCS. Se calcularon los gradientes piezométricos equivalentes en términos de la densidad relativa de la salmuera profunda del entorno de la laguna ($\rho_{media} = 1,14$) en la costa norte -desembocadura del arroyo Santillán- y en la sureste -La Plata-, su valor medio es 12 % en sentido ascendente. Así, si se supone que la salmuera profunda descarga en toda la laguna (superficie = 13,5 km²) y que la matriz margo-yesífera tiene una permeabilidad de 1×10^{-7} m/s (Custodio y Llamas, 1982), sus aporte anual sería 5,2 hm³ (380mm/a), aproximadamente. Esta evaluación se basa en la hipótesis de una descarga uniforme en el vaso de la laguna. Sin embargo, dada la heterogeneidad espacial de un sistema kárstico es probable la

existencia de vías preferentes en la descarga profunda.

Finalmente, es interesante señalar la particularidad que, al igual que la evaporación y la salinidad, en el entorno de la laguna la carga piezométrica de las salmueras somera y profunda decrecen de noreste a suroeste.

Modelo conceptual de la Laguna de Fuente de Piedra y modelo Genético-Evolutivo de La Salmuera

El modelo genético de la laguna, el modelo conceptual de su sistema hidrogeológico y el modelo genético-evolutivo de las salmueras están vinculados estrechamente. La génesis de la laguna está relacionada con procesos de karstificación y disolución, que afectan a los materiales yesífero-salinos del Complejo Caótico Subbético, CCS, en esta zona.

En contraste con la aceptación del modelo genético de la laguna, respecto al modelo genético-evolutivo de las salmueras, existen notables divergencias. Estas discrepancias se fundan en dos hipótesis for-

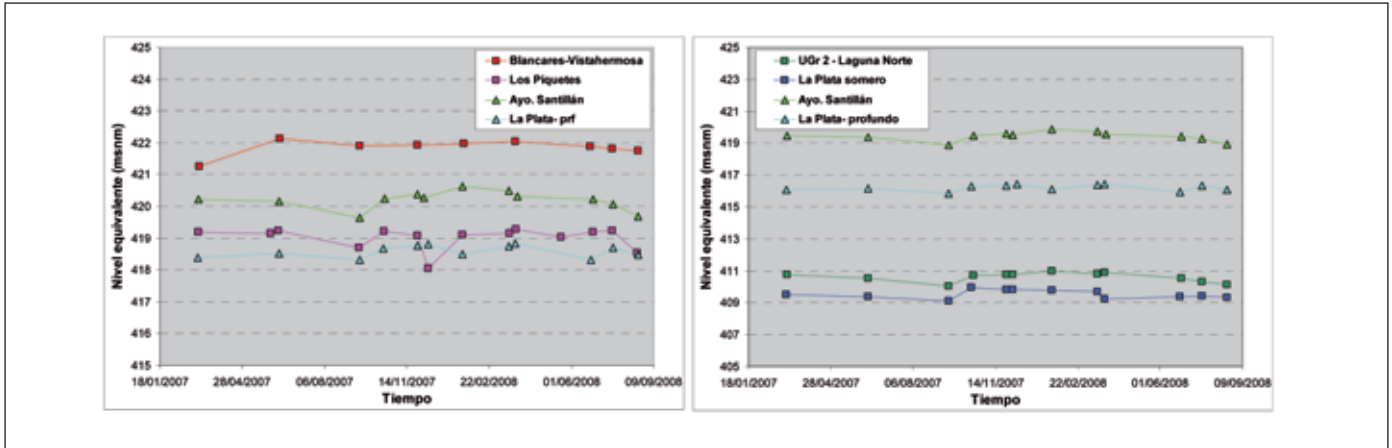


Figura 12. Hidrogramas de niveles equivalentes de agua dulce. a. Salmuera en el sistema de flujo inferior -CCS-. b. Salmuera del entorno de la laguna
 Figure 12. Fresh water equivalent- water levels hydrograph. a. Brine in low flow system -CCS-. b. Brine around the lake

muladas y hasta fecha reciente no contrastadas en la cuenca de la laguna. Una consideraba que “en la zona más superficial del Triásico, se producía circulación subterránea. Por el contrario, la zona más profunda actuaría como nivel de baja permeabilidad, donde o no existe karstificación o los conductos kársticos se han rellenado con residuos arcillosos insolubles, permitiendo el estancamiento de las aguas por encima de un determinado nivel” (Linares, 1990). Y la otra postula que “la disolución de los niveles yesíferos profundos puede ser acentuada por la presencia de fluidos hipersalinos ascendentes. En suma, que la presencia de grandes lagunas en el Trías de Antequera, estaría ligada a un flujo salino de carácter regional causante de una hiperkarstificación de los yesos subyacentes. Esta hiperkarstificación localizada sería la causante de la subsidencia-endorreísmo de las lagunas” (Calaforra, 1998; Calaforra *et al.*, 2002). Estas dos hipótesis acerca de los niveles karstificados más profundos del CCS llevan a modelos conceptuales del sistema hidrogeológico y a modelos genético-evolutivo de la salmuera distintos.

El primer modelo conceptual del sistema se funda en un conocimiento geológico que no identifica al CCS como tal y lo considera Trías e hidrogeológicamente conforma el basamento impermeable del acuífero miocuaternario, que es el único que descarga en la laguna. La red de observación que monitorizaba el sistema la constituían sondeos que no atravesaban aquel acuífero. En esta conceptualización, la salmuera son el resultado de un proceso de concentración evaporativa (Fig. 13.a). Un mayor conocimiento hidrogeológico, hidroquímico e isotópico, así como observaciones y pruebas hidráulicas en sondeos que

alcanzan la matriz margo-yesífera permitió identificar flujos a través, hacia y desde de este medio de baja permeabilidad. Así, identificando a estos materiales como parte del CCS (Heredia *et al.*, 2004-a) o considerándolos aún Triásico (Almecija, 1997, Rodríguez *et al.*, 2006), se formula un nuevo modelo conceptual que contempla un flujo a través de los mismos (Fig13.b). La matriz margo-yesífera del CCS se recargaría desde los depocentros del Mioceno superior (Heredia *et al.*, 2004-b). En este modelo conceptual, la salmuera es el resultado del proceso de concentración evaporativa más la evolución hidrogeoquímica: interacción agua-roca en los materiales evaporíticos, favorecida por largos tiempos de tránsito. Si en la zona profunda del CCS no existe karst o este se haya “sellado”, entonces no habrá vínculo con sistema de flujo alguno fuera de la cuenca. Por ello, en ambas conceptualizaciones, el dominio del sistema hidrogeológico se circunscribiría aproximadamente a la cuenca de la laguna (endorreísmo) y la única salida sería por evaporación en la zona de la laguna y sólo se encontraría salmuera bajo el vaso de esta. Bajo esta hipótesis se enmarcan los dos modelos conceptuales del sistema hidrogeológicos que estuvieron vigentes hasta la presente investigación.

Recientemente se propuso un modelo conceptual (Kohfahl *et al.*, 2008), que considera a la salmuera de la laguna el resultado de un proceso evaporativo y de la disolución de evaporitas triásicas por flujos circulantes a profundidades menores a 50 m. El modelo presenta la curiosidad que, a la par de considerar al Trías como basamento del sistema, propone que en la zona norte de la cuenca los flujos circulantes disuelven las evaporitas existentes en la matriz triási-

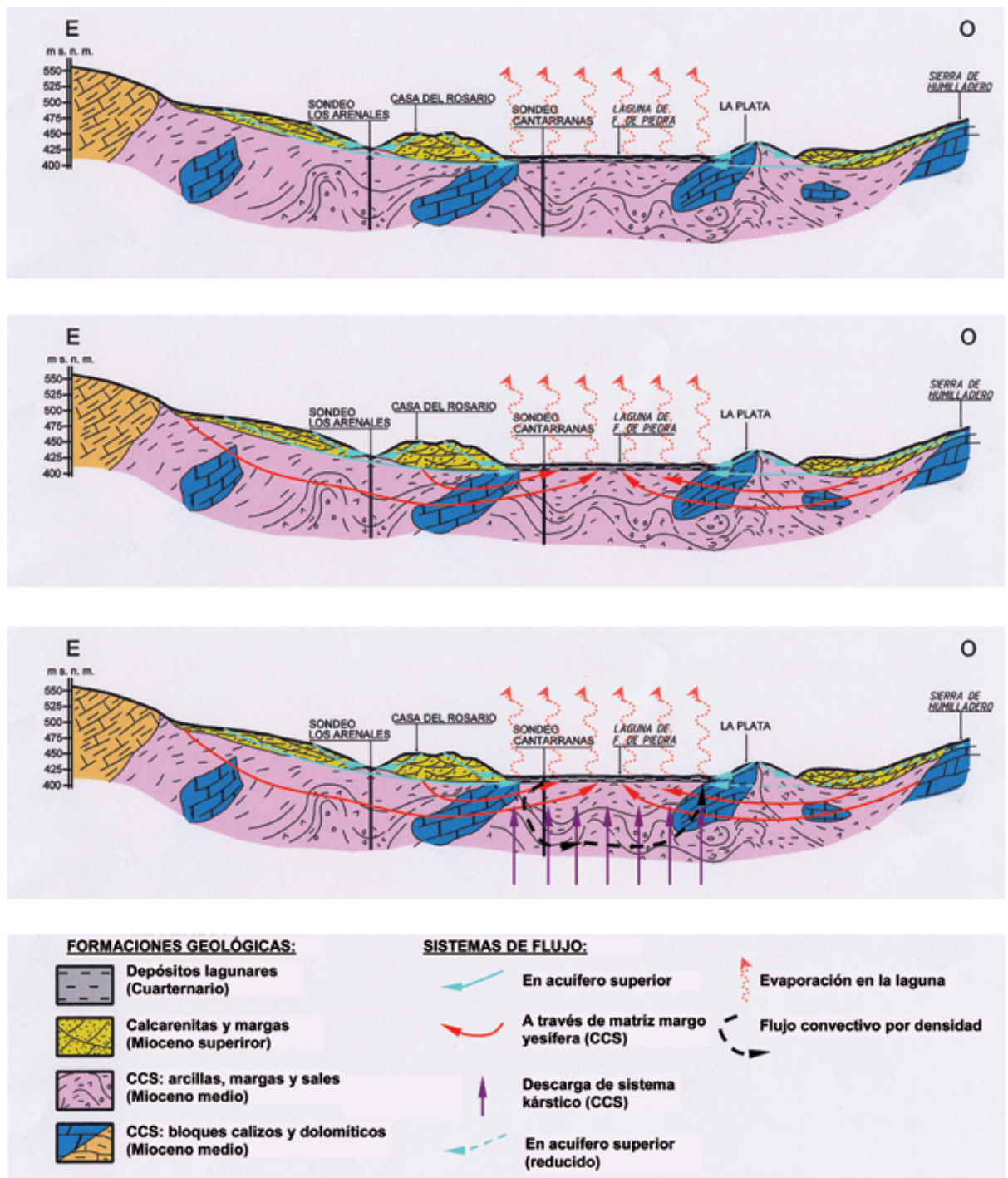


Figura 13. Modelos conceptuales del sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra y modelos genéticos-evolutivos de sus salmueras. a. Sistema de flujo: acuífero superior (miocuaternario). Génesis salmuera: proceso evaporativo. b. Sistema de flujo: acuífero superior (miocuaternario)+ matriz margo yesífera (CCS). Génesis salmuera: proceso evaporativo + evolución hidrogeoquímica. c. Sistema de flujo: acuífero superior (miocuaternario)+ matriz margo yesífera (CCS) + sistema kárstico (CCS) Génesis salmuera: proceso evaporativo + evolución hidrogeoquímica + factor litológico

Figure 13. Conceptual model of Fuente de Piedra lake hydrogeological system and genetic brines models. a. Flow system: upper aquifer (Mio-Quaternary). Brine origin: evapoconcentration effects. b. Flow system: upper aquifer (Mio-Quaternary)+ clay-gypsiferous matrix CCS. Brine origin: evapoconcentration effects + Hydrogeochemistry evolution. c. Flow system: upper aquifer (Mio-Quaternary)+ clay-gypsiferous matrix CCS + karstic system CCS. Brine origin: evapoconcentration effects + Hydrogeochemistry evolution + lithologic factor affecting

ca sin atravesarla, mientras que en el sur los flujos circulantes atraviesan el Trías sin cargarse de sales. Esta particular distribución de las evaporitas triásicas la justifican en "subsidiencias tectónicas que gobernarían el proceso de de sedimentación evaporíticas". Desde el año 2004 se han estudiado los más profundos depocentros del sistema mediante sondeos, conductividad eléctrica, geofísica, hidroquímica e isótopos, sin constatar esa hipótesis.

El hallazgo mediante geofísica y sondeos de cuerpos de salmueras cercanos a la divisoria de aguas y alejados de la laguna (Ruiz *et al*, 2006), los análisis hidroquímicos e isotópicos (Heredia *et al*, 2007) y piezométricos (IGME, 2009) han permitido identificar en la cuenca salmueras profundas procedentes del sistema kárstico del CCS que descargan en la laguna. Este nuevo modelo conceptual del sistema hidrogeológico de la laguna "incorpora" el sistema regional profundo del CCS, de tipo kárstico (Fig. 13.c), que tiene en la laguna uno de los puntos de descarga de sus flujos hipersalinos. Así, al vincular esta hipótesis conceptual un sistema de flujo regional al sistema de la laguna, este se inserta en un dominio regional con lo que, estrictamente, pierde su endorreísmo. Para esta conceptualización, en el modelo genético-evolutivo de la salmuera intervienen el enriquecimiento evaporativo, la evolución hidrogeoquímica y un factor litológico: la disolución.

Por otro lado, el sistema presenta desde los últimos 15 años la particularidad que la mayor parte de la descarga del acuífero miocuaternario a la laguna se produce en su costa oeste y suroeste. Este aporte sectorizado de agua dulce a la laguna, agua con escaso tiempo de residencia, explicaría el gradiente decreciente en sentido noreste-suroeste que se observa en la salinidad y en la evaporación de salmuera de la laguna, tanto somera como profunda (Figs. 7 y 8). La descarga sectorizada del acuífero superior conjuntamente con la descarga por vías preferentes de los flujos hipersalinos del sistema kárstico del CCS generaría en el ámbito de la laguna una circulación convectiva de flujo por gradiente de densidad (Fig. 13.c). Esta circulación predominaría sobre la circulación clásica por convección/difusión de flujos salinos producidos por el proceso evaporativo en la laguna (Langbein, 1961; Duffy & Al Hassan, 1988; Fan *et al*; 1997).

Conclusiones

Principales rasgos del Sistema Hidrogeológico

El sistema hidrogeológico está conformado por tres sistemas de flujo, estratificado según su densidad. El

sistema presenta una variabilidad extrema en la salinidad de sus aguas, variando los TSD desde los 0,319 g/L, en las aguas del acuífero carbonatado de las sierras, hasta los 332 g/L, en cuerpos de salmuera. Por otro lado, la gran variabilidad espacial de la salinidad contrasta con una marcada estabilidad temporal, así la posición de la interface salmuera/agua dulce prácticamente no ha variado en las últimas dos décadas. Se han identificado dos tipos de salmueras:

- Una es resultado de la circulación del agua subterránea a través de materiales evaporíticos karstificados asociados al Complejo Caótico Subbético. Esta salmuera se observa en dos entornos diferentes muy definidos. Uno asociado con el flujo inferior del acuífero profundo kárstico desarrollado sobre los niveles masivos de yesos y sales, que en la cuenca de Fuente de Piedra se sitúa a unos 50 m por debajo de la laguna, y que parece indicar la presencia de un flujo kárstico regional profundo. El otro entorno esta definido por cuerpos de salmueras, de pequeñas dimensiones, que se encuentran diseminados por los niveles arcillo-yesíferos superiores del CCS.
- La otra salmuera se sitúa en el entorno de la laguna, a escasos metros de profundidad. Esta se origina por procesos de concentración evaporativa, provocando que las aguas de distinta salinidad que alcanzan esta zona de descarga evolucionen hasta salmueras muy concentradas. Debe observarse, que en la laguna descargan las aguas del acuífero mio-cuaternario con una salinidad moderada (TSD de 1-5g/L), las aguas más evolucionadas hidroquímicamente que discurren por los materiales margo-yesíferos del Complejo Caótico Subbético que poseen una salinidad notable (TSD \approx 30 g/L) y, eventualmente, la salmuera de origen profundo con una carga en sales mucho mayor (TSD > 200 g/L).

Modelo conceptual del Sistema Hidrogeológico

El modelo conceptual del sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra se puede esquematizar en los ambientes hidrogeológicos siguientes:

- Un sistema superficial conformado por materiales del Mioceno superior, sedimentos cuaternarios y bloques de calizas y dolomías jurásicas. Su extensión coincidiría con la cuenca de aguas superficiales, aproximadamente. Se recargaría por infiltración de la precipitación y los retornos de los regadíos. La descarga de este sistema sería a través de los bombeos y, de forma discontinua, espacial y temporalmente, a la laguna.

- Un sistema de flujo intermedio subyacente a éste, que circularía a través de los materiales poco permeables de la matriz margo-yesífera del CCS y de bloques de calizas y dolomías. Su recarga procede del sistema superficial y se produce en los depocentros. Existe la posibilidad de que también reciba aportes del sistema karstificado subyacente, dado que este se encuentra en carga. Su descarga es hacia la laguna.
- Un sistema kárstico profundo que se desarrollaría en el Complejo Caótico Subbético. Su extensión, muy probablemente, es regional. Su descarga debe realizarse en un marco regional y además, probablemente, a través de la laguna.

La modelación numérica de este sistema deberá abordar un doble desafío. Por un lado, los problemas estrictamente numéricos que implica representar un sistema con una variabilidad de densidad de flujo tan extrema, con salmueras que casi alcanzan valores de saturación en salita (360 g/L). Y por otro, tratar adecuadamente en términos de estructura de modelo las incertidumbres asociadas al carácter regional del sistema kárstico profundo.

Agradecimientos

El equipo de investigadores en Fuente de Piedra quiere agradecer a Manuel Rendón, Director Conservador de la RN de la Laguna de Fuente de Piedra, y a todo su personal por su apoyo. A Antonio Martínez y Fernando Ruiz del IGME, por su dedicación en el trabajo de campo. A Luis Araguás compañero que supo orientar en los primeros años de trabajo y amigo.

Referencias

Almécija Ruiz, C. 1997. *Estudio hidrogeológico e hidroquímico de los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, 518 pp.

Calaforra, JM 1998. Kartsología de yesos-Gypsum Karstology. *Monografías Ciencia y Tecnología*, vol 3. Eds. Universidad de Almería-Instituto de Estudios Almerienses, 384 pp.

Calaforra, JM., Pulido-Bosch, A. y López-Chicano, M. 2002. Gypsum karst in the Betic Cordillera (South Spain). *Carbonates and Evaporites*, 17 (2):134-141.

Cruz San Julián, J. 1974. *Estudio Geológico del sector Cañete la Real-Teba-Osuna*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 413 pp.

Custodio, E. y Llamas, R. (1982). *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega. II Tomos, 2º ed. Barcelona.

Duffy, C. and Al-Hassan S. 1988. Groundwater circulation in a closed desert basin: Topographic scaling and climatic forcing. *Water Resources Research*, 24, pp. 1675-1688.

Durán, J.J. y Molino, J.A. (1986). Karst en yesos del Triás de Antequera (Cordilleras Béticas). *Karstologia Memoires 1*. Association Francaice de Karstologie, p. 37-46.

Fan, Y., Duffy, C. and Oliver, D. 1997. Density driven groundwater flow in a closed basin: Field investigations and numerical experiments. *Journal of Hydrology*, 196, pp.: 139-184.

García-Cortés, A., Mansilla, H., y Quintero, I. 1991. Puesta de manifiesto de la Unidad Olistostromica del Mioceno Medio en el sector oriental de las Cordilleras Béticas. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 102-4, 524-535.

Heredia, J., Araguás, L., Ruiz, J.M^a. 2004 a. Use of environmental tracers to characterize a complex hydrogeological system under variable density conditions: case of the subsurface brine of Fuente de Piedra (SW Spain). *18 SWIM*, Spain. (Ed.Custodio, Manzano and Araguás) IGME.

Heredia, J., Araguás, L., Ruiz, J.M^a. 2004 b. Definición del modelo conceptual de flujo del sistema hidrogeológico de densidad variable en la laguna de Fuente de Piedra, sur de España. *XXXIII Congress of International Association of Hydrology and VI ALHSUD*. Zacatecas, México.

Heredia, J.; Ruiz J. M., García de Domingo, A. 2007 Estrategias para la caracterización del sistema hidrogeológico con densidad variable de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga) *Taller de Grupos de Investigación-Gestión hídrica de los humedales andaluces*. Baeza, Spain.

Heredia, J, Ruiz J. M., García de Domingo, A.; Rubio, F., Ibarra P. (2007). Empleo de técnicas geofísicas en la caracterización de la cuenca endorreica de Fuente de Piedra, Málaga (España). *V Congreso argentino de hidrogeología. III Seminario Hispano-Latinoamericano de hidrología subterránea-Taller de Geofísica*. Paraná Argentina.

Ibarra P, Rubio, F., Heredia, J., Ruiz J. M., G. de Domingo, A (2008) Geofísica combinada para modelización hidrogeológica en Fuente de Piedra. *6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Tomar, Portugal.

Kohfahl, C., Rodríguez, M., Fenk, C., Menz, C., Pekdeger, A., Benavente, J., Hubberten, H., Meyer, H., Knappe, A. and López Geta, J.A. 2008. Characterising flow regime and interrelation between surface water and groundwater in a salt lake basin by means of stable isotopes, hydrogeochemical and hydraulic data. *Journal of Hydrology*, 351(1-2): 170-187

IGME 1984. *Estudio hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra*. 4 tomos, 20 planos.

IGME 1985. *Estudio geoelectrico en la laguna de Fuente de Piedra*. IGME. Inédito.

ITGE 1998. *Hidrogeología de la reserva natural de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*. Ed. ITGE. 80 pp.

IGME 2009. *Caracterización hidrogeológica y modelación numérica de un sistema de flujo con densidad variable: Sistema Hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*. Parte I: Caracterización hidrogeológica y modelo conceptual. IGME, inédito. Madrid. 170pp.

Langbeim, W. B. 1961. Salinity and hydrology of closed lakes: A study of the long-term balance between input

- and loss of salts in closed lakes. *USGS Professional paper*, 412 pp.
- Linares, L. 1990. *Hidrogeología de la Laguna de Fuente de Piedra (Málaga)*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 343 pp.
- Linares, L., Andreo B., Carrasco, F., Fernández, G. y Vadillo, I. 2001. La escorrentía superficial en la cuenca de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga) durante un año húmedo (1997-1998). *VII Simposio de Hidrogeología y Recursos Hídricos*. Murcia.
- Mc Cutcheon, S., Martin, J. and Barnwell, T. (1992). Chapter 11: Water Quality. *Handbook of Hydrology*. Part 2. (Ed. Maidment). Mc Graw-Hill Ed., pp.11.3-11.8.
- Pérez-López, A. y Pérez-Valera, F. 2003. El diapirismo como factor principal de la resedimentación de las rocas del Triásico durante el Terciario en las Zonas Externas de la Cordillera Bética. *Geotemas*, 5, pp. 189-193.
- Rodríguez, M. 2002. *Contribución Hidrogeológica y Limnológica a la caracterización ambiental de zonas húmedas de Andalucía oriental*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 194 p.
- Rodríguez, M. Benavente, J. and Moral, F. 2006. High density groundwater flow, major-ion Chemistry and field experiments in a closed basin: Fuente de Piedra playa lake (Spain). *American Journal of Environmental Sciences*, 1(2): 164-171.
- Risacher, F., Alonso H., Salazar C. 1998. *Geoquímica de Cuencas Cerradas, I, II y III Regiones*. Informe DGA-UCN-ORSTOM. Santiago de Chile, Chile. 84 pp.
- Ruiz J. M^a, Rubio FM, Ibarra P, García de Domingo A, Heredia J y Araguas L. 2006. Contribución de la tomografía eléctrica en la caracterización del sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga). *Las aguas subterráneas en los países mediterráneos*. Publicaciones del IGME. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N^o 17: 353-357. Madrid.
- Ruiz, J. M., Heredia, J. y G. de Domingo, A. 2007. Characterization of subsurface brines in Fuente de Piedra lake hydrogeological system (Málaga, Spain) using hydrogeochemical and geophysical techniques. *IAH 2007. XXXV Congress-Groundwater and Ecosystems*. Lisbon, Portugal.
- Sanz de Galdeano, C. y Vera, J.A. 1992. Stratigraphic record and paleogeographical context of the neogene basins in the Betic Cordillera, Spain. *Basin Research*, 4, pp. 21-36
- UNESCO 1984. *La escala de salinidades prácticas de 1978 y la ecuación internacional de estado del agua del mar de 1980*. Documentos técnicos de la UNESCO sobre el mar 36. Paris. 25 pp.
- Vera, J.A. y Martín Algarra, A. 2004. Cordillera Bética. In: Vera, J.M. (Ed). *Geología de España*, IGME-Sociedad Geológica de España, Madrid, pp. 345-464.

Recibido: enero 2009

Revisado: mayo 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: octubre 2009

