

**CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA SALINIZACIÓN
EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA
ENDORREICA DE LA LAGUNA DE PÉTROLA
(PÉTROLA, ALBACETE)**

por

Juan José GÓMEZ-ALDAY*

Santiago CASTAÑO FERNÁNDEZ*

David SANZ MARTÍNEZ*

* Grupo de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional (IDR). Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Campus Universitario, s/n. 02071 Albacete.
E-mail: JuanJose.Gomez@uclm.es

RESUMEN

En este trabajo se describen las unidades sedimentarias presentes en la cuenca endorreica, con énfasis en la caracterización de los niveles ARMO (Arcillas Ricas en Materia Orgánica). Estos niveles, cuando no están alterados, constituyen un acuitardo con abundante materia orgánica y sulfuros donde se producen reacciones químicas que provocan la salinización de las aguas subterráneas presentes en el subsuelo de la cuenca endorreica.

A partir de la realización de cortes hidrogeológicos, se ha obtenido un diagrama de la estructura geológica que presentan los diferentes depósitos sedimentarios diferenciados y se ha comparado la posición del nivel ARMO respecto a la superficie piezométrica del acuífero cretácico. Este análisis comparativo define el escenario probable donde se pueden dar las condiciones necesarias que favorezcan la alteración de sulfuros y la formación de aguas subterráneas salinas. Asimismo se lleva a cabo una primera valoración sobre la antigüedad de los procesos que dan lugar al depósito de evaporitas en la Laguna de Pétrola.

Palabras clave: Laguna de Pétrola, salinización, sulfatos, nivel ARMO.

ABSTRACT

The sedimentary units outcropping in the endorreic basin have been described with a special emphasis in the ARMO (Organic Rich Clays) level characterization. When the ARMO levels are not altered, they constitute an aquitard with abundant organic matter and disseminated sulphides. The geochemical reactions that are taking place in this level lead to the groundwater salinization.

A geological diagram of the sedimentary differentiated units has been obtained by means of the interpretation of hidrogeological cross-sections. The position of the ARMO levels has been compared to the piezometric level position in the cretaceous aquifer. This analysis defines the probable scenario where the sulphide alteration may occur and form saline groundwaters. Further, it is carried out an initial estimation of the antiquity of the processes which bear to the formation of saline deposits in the Pétrola Lake.

Keywords: Pétrola lake, salinization, sulphates, ARMO level.

0. INTRODUCCIÓN

El área sobre el que se ha desarrollado el estudio se sitúa en el SE de la Península Ibérica, dentro de la provincia de Albacete. Hidrológicamente pertenece a la Cuenca del Segura y se circunscribe dentro del denominado Sector Salino de Pétrola-Corral Rubio-La Higuera (DGOH-C.H.S, 1997; Donate y cols. 2001). La zona de estudio comprende la cuenca endorreica de la Laguna de Pétrola, de unos 43 km² de extensión, y es uno de los mejores ejemplos de humedal salobre en Castilla-La Mancha. De hecho, está incluida dentro de los “*Espacios protegidos de Castilla-La Mancha*” (Decreto 1005/1991, de 23 de Julio), está propuesta como “*lugar de interés comunitario*” (Directiva Hábitats 92/43/CEE) y cumple los criterios necesarios para su inclusión dentro de la “*Convención de Humedales RAMSAR*” (SEO/BirdLife, 2001). Dentro de este marco jurídico, el Decreto 102/2005 de 13 de septiembre de 2005 aprueba el Plan de Ordenación de Recursos Naturales de la Laguna de Pétrola y la declara Reserva Natural.

La singularidad geológica que permite la existencia de hábitats extremos en esta laguna se debe, entre otros factores, a la salinidad de sus aguas subterráneas, cuya concentración en sulfato puede superar los 900 mg/l. Esta estrecha asociación justifica la investigación acerca de los procesos que conducen a la elevada concentración de sales (cloruradas-sulfatado-magnésicas) en el agua subterránea de la cuenca.

El origen del sulfato presente en el agua subterránea que alimenta a la laguna se ha estudiado mediante técnicas isotópicas (Gómez-Alday y cols. 2004). Los datos isotópicos del oxígeno y azufre presentes en la molécula del sulfato disuelto descartan un aporte por disolución de evaporitas del Keuper e indican una procedencia asociada con procesos de alteración de sulfuros (p.e. pirita). Estos procesos están relacionados con la presencia en el subsuelo de niveles lutíticos ricos en materia orgánica y sulfuros (niveles ARMO) de edad Cretácico inferior. En los lugares de la cuenca donde estas capas se encuentren sometidas a las pequeñas oscilaciones estacionales del nivel piezométrico se puede producir la oxidación de pirita.

Para obtener datos adicionales que corroboraran esta hipótesis, se han descrito las unidades sedimentarias que componen la cuenca, con énfasis en la caracterización de la geometría y estructura de los niveles ARMO. A partir de la caracterización de los materiales geológicos, se ha obtenido un primer diagrama detallado de la estructura geológica de la cuenca que permite comparar la posición de los niveles ARMO respecto a la superficie piezométrica del acuífero cretácico. Los estudios previos que abordan la geología de la cuenca se adecuan a objetivos de investigación diferentes

que no requieren el detalle de este trabajo. No obstante, permiten obtener una primera descripción de la geología del SE de la provincia de Albacete e identificar los paquetes sedimentarios más representativos (ver p.e. Arias y cols. 1979, Arias y Doubinger, 1980, IGME, 1980, 1981a,b, 1984). La dificultad a la hora de determinar la geometría y disposición de los niveles de interés estriba en que el Cretácico inferior presenta variaciones notables en sus espesores y en sus facies en este sector del Prebético externo. Este hecho, se hace aún más evidente cuando en una misma zona se encuentran unidades terrígenas de diferentes edades en contacto mecánico, como ocurre en el caso de la Cuenca endorreica de la Laguna de Pétrola.

1. METODOLOGÍA

Para la realización de este estudio se ha llevado a cabo una campaña de reconocimiento de campo asistida por la interpretación de fotografías aéreas. La mayor parte de los datos recopilados poseen una referencia espacial y temporal asociada que permite su integración y tratamiento en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Como sistema gestor de las bases de datos alfanuméricos se ha empleado Microsoft Access y Software SIG, ArcGIS de ESRI.

2. GEOLOGÍA DE LA CUENCA ENDORREICA

La Laguna de Pétrola se sitúa la N de la localidad que lleva su mismo nombre y a unos 30 km al SO de la ciudad de Albacete (Figura 1). La lámina de agua en época de aguas altas ocupa una extensión de unos 2,62 km² (Romero-Díaz y cols. 1988) y queda encerrada en una cuenca endorreica con una superficie próxima a los 43 km². El área de estudio está constituida casi en su totalidad por una cobertera mesozoica fracturada y deformada por suaves pliegues (Figura 1). La mayoría de las estructuras tienen una dirección general NO-SE, de clara orientación bética, motivo por el cual la cuenca se enmarca dentro del dominio estructural Prebético externo.

Si bien en la zona de estudio están presentes materiales del Cuaternario y Terciario continental (Plioceno), la descripción de las unidades litoestratigráficas se ha centrado sobre los materiales mesozoicos y terciarios miocenos dada su mayor representación. Se han diferenciado nueve unidades litoestratigráficas (U01-U09) sobre la base de sus propiedades litológicas, o la combinación de sus propiedades litológicas y relaciones estrati-

gráficas (Figura 2). Estas unidades se depositaron entre el Jurásico superior (Kimmeridgiense) y el Mioceno (IGME, 1980, 1981a, b, 1984) y alcanzan una potencia total próxima a los 130 m (Figura 2). Los materiales mejor representados pertenecen al periodo Cretácico y, en concreto, con los términos terrígenos y, en menor medida dolomíticos, del Cretácico inferior.

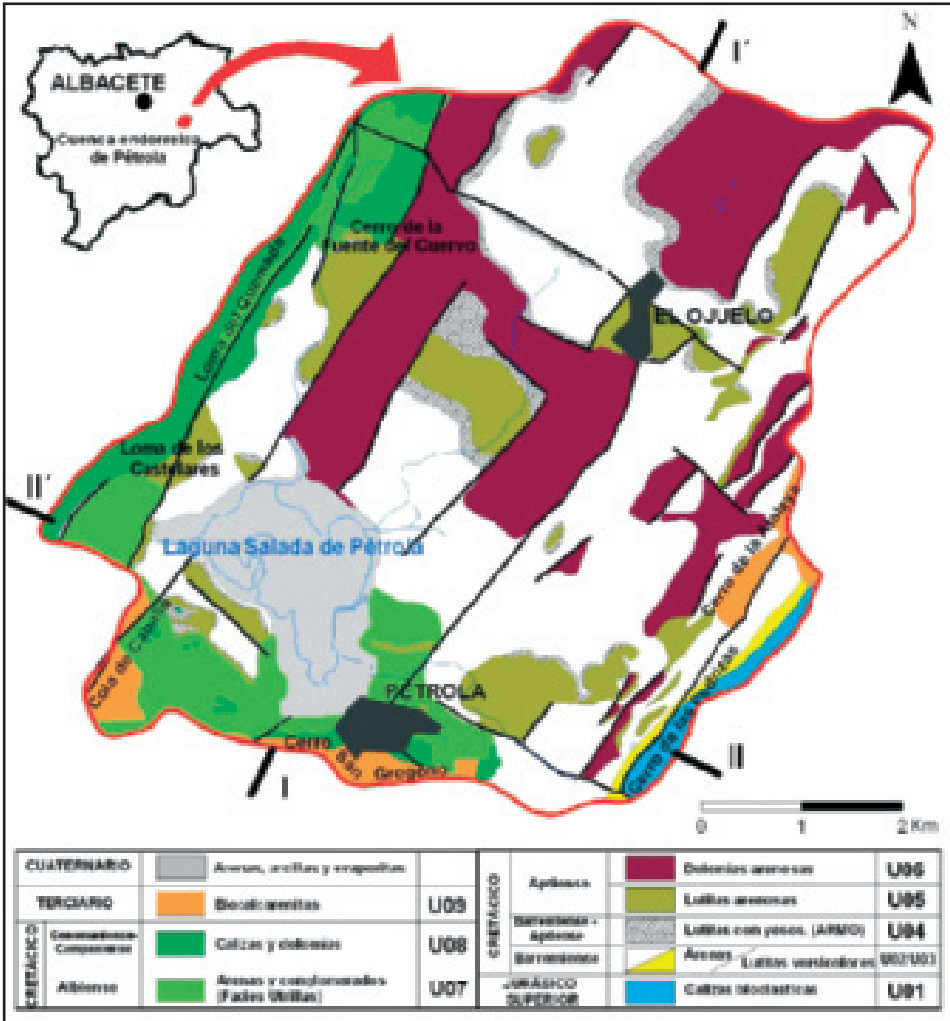


Figura 1. Localización y mapa geológico simplificado del área de estudio. I-I' y II-II' cortes hidrogeológicos (ver Figura 4).

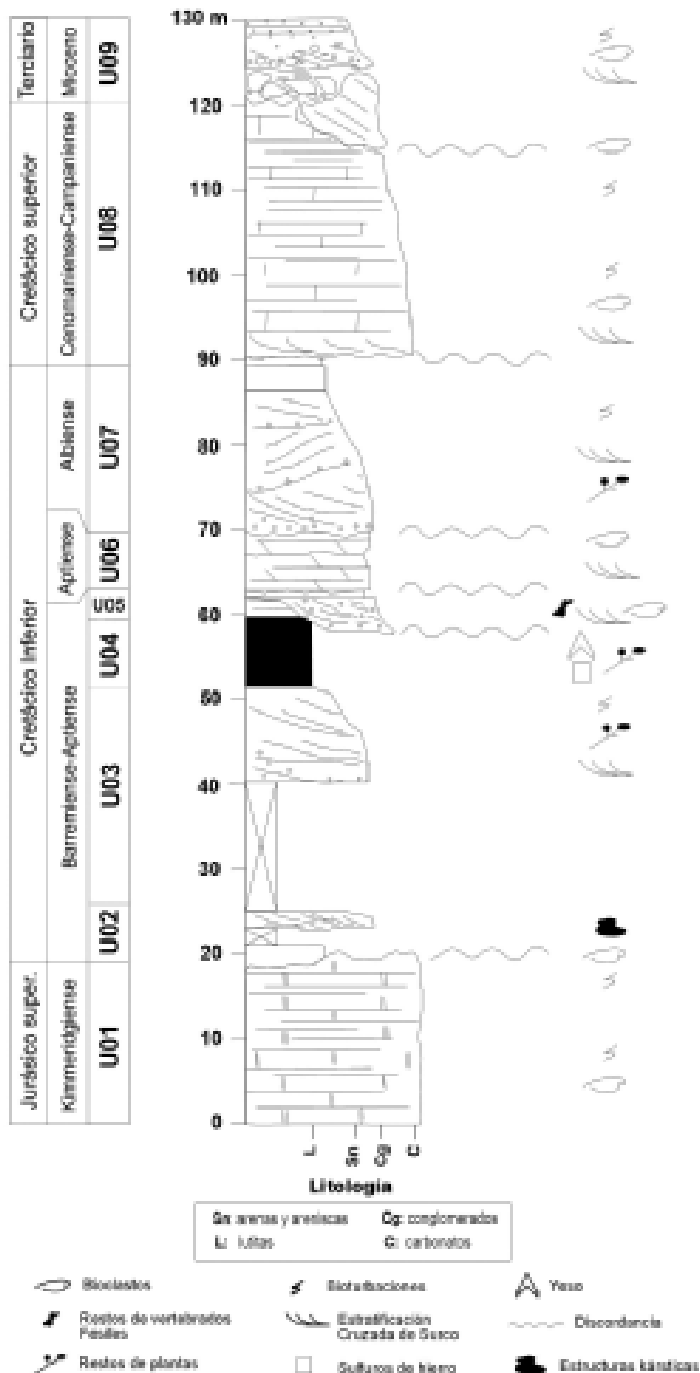


Figura 2. Serie estratigráfica de detalle de los materiales presentes en la Cuenca Endorreica de la Laguna de Pétrola. La existencia de numerosas rupturas en la sedimentación se traducen en importantes cambios laterales en las unidades identificadas.

JURÁSICO

Unidad 1 (U01). Jurásico superior. Kimmeridgiense

La U01, de edad Jurásico superior (Kimmeridgiense), aflora en el límite oriental de la zona de estudio (Cerro de las Pedrizas) y se compone de unos 137 m de carbonatos (Figura 2). De muro a techo se reconoce una alternancia de margas y margo-calizas, que pasan a calizas packstone a grainstone de grano fino, de color blanco amarillento hacia techo. Estas calizas presentan abundantes oolitos-pisolitos y se encuentran estratificadas en bancos de orden decimétrico (10-60 cm). A lo largo de toda la serie se aprecia una intensa bioturbación. La presencia de bioclastos se hace más acusada a techo donde se pueden observar bivalvos en posición de vida y abundantes gasterópodos. Esta unidad presenta procesos de karstificación con brechificación, que dan lugar a la pérdida de las estructuras primarias de la roca. La porosidad que exhibe se debe a la presencia de una importante fracturación. La dirección de la estratificación es N40 y el buzamiento de las capas puede alcanzar 70N.

CRETÁCICO

Los sedimentos cretácicos dominan los materiales geológicos presentes en la zona de estudio (Figura 1). En concreto, los sedimentos del Cretácico inferior (Barremiense-Albiense) ocupan la mayor parte de la superficie de la cuenca y, debido al bajo buzamiento que presentan sus estratos, dan lugar a suaves lomas. Los materiales del Cretácico superior (Cenomaniense-Campaniense) configuran los relieves más importantes en el sector occidental y meridional de la cuenca endorreica.

Cretácico inferior

Como se ha señalado, está bien representado en la zona de estudio aunque los puntos de observación donde se pueda apreciar una serie completa son escasos. El techo está limitado por los carbonatos amarillentos del Cenomaniense (U08). El espesor de los materiales del Cretácico inferior puede alcanzar unos 60 m.

Unidad 2 (U02). Barremiense

No se ha podido establecer la serie completa con detalle en la zona de estudio, aunque los diferentes trabajos que abordan la geología de la región coinciden en señalar que, por encima del Jurásico, se deposita de manera discordante una secuencia terrígena que recuerda a las “Facies Weald” (IGME, 1984). En la zona de estudio, por encima de la U01, se observa un nivel (<1 m) de calizas packstone a grainstone con oncolitos, intensamente bioturbadas (Figura 2). En la misma posición afloran depósitos lutíticos de tonalidades blancas a amarillentas, e incluso rosáceas, con alguna intercalación de lechos de areniscas que representan laminación cruzada de surco. La potencia observable es de unos 2 m.

Unidad 3 (U03). Barremiense-Aptiense inferior?

En los afloramientos reconocidos, se identifican 9 m de arenas y arenas conglomeráticas siliciclásticas blancas e incluso rojizas con cantos centimétricos de cuarzo. Se organizan en “sets” de espesor decimétrico donde es posible apreciar estratificación cruzada de surco (Figura 2). Hacia techo las arenas conglomeráticas adquieren tonalidades ocreas e incluso rojizas y finalizan con una costra ferruginosa de varios decímetros de espesor. En la U03 es frecuente encontrar restos vegetales silicificados y bioturbaciones con óxidos de hierro. Aunque no se ha podido establecer la potencia real de todo el conjunto es probable que, a juzgar por los datos bibliográficos, pueda alcanzar 15-25 m (IGME, 1981a). La escasa cementación que presenta esta unidad permite la existencia de una importante porosidad intergranular.

Unidad 4 (U04). Niveles ARMO. Barremiense-Aptiense inferior?

La U04 se compone de 7-8 m de lutitas a lutitas arenosas (Figura 2). Aunque estos depósitos sedimentarios se describen con detalle en el apartado correspondiente, las tonalidades que presentan varían entre gris oscuro (incluso negro) a rojizo. Esta unidad puede albergar un abundante contenido orgánico (restos vegetales carbonizados). En cuanto a su composición mineral, es destacable la presencia de sulfuros (pirita) y yeso disperso secundario. Independientemente de la cantidad de materia orgánica conservada, en adelante se denominará nivel ARMO. Las características litológicas de estos niveles, les convierten en un acuitardo de gran importancia en los procesos geoquímicos de la cuenca. En las proximidades del Cerro de la Pedriza se ha establecido una potencia aproximada para la serie que comprende los depósitos de la U02 a la U04 de unos 40 m.

Unidad 5 (U05). Barremiense- Aptiense inferior?

Por encima de la U04, de manera discordante, se depositan de 3 a 6 m de lutitas arenosas, con cantos silíceos dispersos (Figura 2, 5G). En los tramos basales, arenosos, es posible apreciar estratificación cruzada de surco. En estos materiales se encuentran restos de vertebrados y fragmentos ferruginizados de restos de vegetales. Aunque no se ha diferenciado como otra unidad adicional, sobre este paquete se pueden encontrar depósitos canaliformes constituidos por conglomerados y areniscas silíceas blancas con estratificación cruzada de surco. Este paquete puede alcanzar 1-2 m de espesor. La naturaleza de los materiales lutíticos, impide la existencia de una porosidad primaria granular. Sin embargo, el agua subterránea puede circular a través de las fracturas que presentan.

Unidad 6 (U06). Aptiense

Sobre la U04 y la U05 se depositan discordantemente carbonatados compuestos por doloesparitas bioclásticas de grano grueso, con granos de cuarzo dispersos, de color gris oscuro a ocre, estratificadas en paquetes tabulares de 0,30-0,60 m de espesor (Figura 2). La fauna fósil más destacable está compuesta por bivalvos del grupo de los ostreidos. En algunos afloramientos, se reconocen depósitos de calizas con *Rudistas* (*Toucasias*). En conjunto la potencia de la unidad puede oscilar entre los 3-7 m. La permeabilidad que exhiben estos materiales está relacionada con el desarrollo de una importante porosidad secundaria entre los cristales de dolomita y con la existencia de fracturas.

Unidad 7 (U07). Albiense. “Facies Utrillas”

Esta unidad, que estratigráficamente es equivalente a la denominada “Facies Utrillas”, aflora ampliamente en la zona meridional del área de estudio y se ha reconocido en la cantera al O de la localidad de Pétrola (Figura 2). La serie comienza con arenas y conglomerados siliciclásticos, de tonos blancos a amarillentos, ocres y rojizos, donde destacan granos de feldespato potásico que pueden alcanzar varios milímetros de tamaño. Estos depósitos, que se apoyan discordantemente sobre los materiales infrayacentes, se organizan en depósitos de morfología tabular o canaliforme con base y techo marcadamente erosivos. También es frecuente observar la presencia de cantos blandos y restos vegetales ferruginizados o silicificados. En la zona de estudio se han medido espesores del orden de 17 m.

El techo de la serie corresponde con una capa de lutitas versicolores donde abundan las costras de naturaleza ferruginosa y las rizocreaciones. Las costras están formadas por arenas y conglomerados silíceos cementados por óxidos de hierro. El paso del Cretácico inferior al Cretácico superior es discordante y se produce a través de 1 m de margas verdes (Formación Margas de Chera) que constituyen un nivel guía regional. La escasa cementación que presentan estos depósitos terrígenos posibilita la existencia de una porosidad intergranular. Esta propiedad hidráulica facilita el almacenamiento y conducción de agua subterránea a través de la unidad.

Cretácico superior

Los afloramientos de las unidades del Cretácico superior se localizan en los cerros que bordean la cuenca endorreica (Cerro de la Fuente del Cuervo, Loma del Quemado y Loma de los Castellares, Cerro de San Gregorio). Desde un punto de vista litológico, la secuencia cretácica se puede dividir en dos paquetes carbonatados. No obstante, para simplificar la estructura geológica, en este estudio se han agrupado los materiales carbonatados en una sola unidad litoestratigráfica.

Unidad 8 (U08). Cenomaniense-Campaniense

La U08, comienza con una serie bastante homogénea de calizas dolomíticas amarillentas (incluso rosáceas) con intercalaciones margosas que puede alcanzar los 53 m de potencia (Figura 2). Se trata de rocas carbonatadas de tipo grainstone, de grano fino a medio, e incluso mudstone-wackestone donde se reconocen fragmentos de bivalvos. Estos carbonatos se depositaron discordantes sobre los materiales del Cretácico inferior y comienzan con un tramo de unos 3 m de espesor de calizas de tipo grainstone con estratificación cruzada de surco. A continuación, se deposita una serie de unos 30 m de espesor formada por calizas dolomitizadas estratificadas en bancos de orden decimétrico a métrico (10-60 cm). Por encima, se reconoce un conjunto de calizas de tipo mudstone-wackestone blancas con *Lacazina* cuya potencia puede rondar los 20 m de espesor. La porosidad que presenta esta unidad se debe a los procesos de fracturación y karstificación que ha sufrido. La dirección de la estratificación es variable y el buzamiento de las capas oscila entre 20E y 30E.

Aunque no es el objetivo de este apartado, merece la pena destacar que esta unidad litológica se presenta en ocasiones como grandes bloques aislados que descansan, de forma caótica, sobre la “Facies Utrillas”. La dis-

posición caótica de los bloques sugiere que su origen pudo estar ligado a procesos de erosión y transporte gravitacional de grandes bloques de calizas, en una paleocosta rocosa.

TERCIARIO

Neógeno

Este sistema está constituido por sedimentos detríticos y carbonatados discordantes sobre las unidades precedentes. Junto con los carbonatos del Cretácico superior configuran los cerros más elevados en la cuenca endorreica (Cerro de la Atalaya, Cola de Caballo, Cerro de S. Gregorio).

Unidad 9 (U09). Mioceno

El Mioceno en la zona de estudio aparece en disposición prácticamente horizontal, discordante sobre el Cretácico, y puede alcanzar los 9 m de potencia (Figura 2). La secuencia comienza con conglomerados de 20-25 cm de diámetro de naturaleza calcárea embebidos en arcillas arenosas rojizas, en su parte inferior, y de conglomerados y calcarenitas amarillentas en su parte superior.

En el cerro “Cola de caballo” se reconoce una serie que comienza con bloques de calizas del Cretácico superior y grainstone de grano grueso de color amarillento y cantos rodados siliciclásticos. Por encima se identifican de 2,5 m de calcarenitas de aspecto masivo, con abundantes restos de bivalvos. La porosidad que exhibe esta unidad se debe principalmente a la existencia de fracturas.

La zona de estudio posee una estructura compleja, aunque se discernen los grandes elementos estructurales de directriz NE-SO (Figura 1). Tomando como referencia el techo de la secuencia jurásica, las unidades sedimentarias descritas en la cuenca se hundieron progresivamente hacia el O mediante la existencia de fracturas de dirección N40 (Figura 3). Estas fracturas, además, delimitan la cuenca endorreica por el E y el O, ya que producen las zonas topográficamente más elevadas. Asimismo, las unidades se encuentran a profundidades mayores hacia la zona meridional de la cuenca, debido a que por el N y el S, la cuenca está flanqueada por sendas fallas de dirección próxima a N120. Este conjunto de fracturas limitan una fosa tectónica en forma de paralelogramo, alargada en dirección NE-SO, donde la laguna ocupa la zona más deprimida (Figura 1).

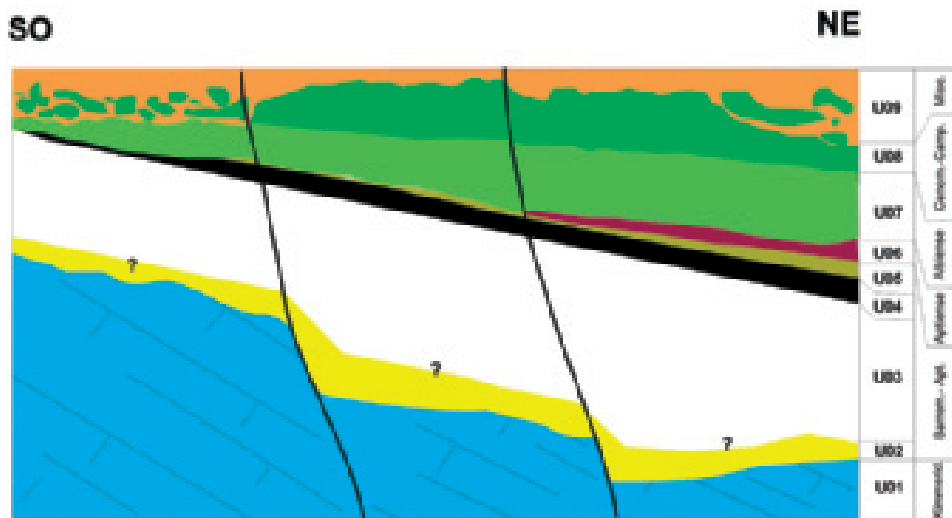


Figura 3. Relaciones estratigráficas entre las unidades diferenciadas en la zona de estudio. Esquema sin escala.

En cuanto a la distribución de los materiales geológicos, en el borde occidental y meridional de la estructura aflora la U06 (Cretácico superior) y en el oriental la U01 (Jurásico superior). La zona septentrional, está dominada por afloramientos de la U03, U04, U05 y U06 depositadas entre el Barremiense y el Aptiense. En la parte meridional de la cuenca, afloran los depósitos terrígenos de la U07 (Albiense), los carbonatos de la U08 (Cretácico superior) y el terciario en facies marinas (U09) (Figura 1).

La distribución compleja de las asociaciones de facies de los diferentes sistemas sedimentarios del Cretácico inferior, en general medios de transición, reflejan una tectónica sinsedimentaria y cambios eustáticos que se asocian con el desarrollo de frecuentes rupturas sedimentarias (Figura 3). Sobre el paleorelieve que conforman los materiales erosionados del Jurásico superior marino (U01), se depositan discordantemente los sedimentos continentales barremienses (U02 a U05). La transgresión marina del Aptiense (U06) favorece el depósito de carbonatos en discordancia sobre los sedimentos infrayacentes. Los depósitos fluviales terrígenos de la “Facies Utrillas” (U07), se apoyan discordantemente sobre los materiales infrayacentes. Asimismo, los carbonatos de la U08 (Cenomaniense - Campaniense), yacen discordantes sobre los terrígenos y carbonatos del Cretácico inferior. Del mismo modo, los depósitos terciarios (U09) se depositan discordantemente sobre los materiales mesozoicos de la cuenca (Figura 3).

Las rupturas más importantes se producen entre el paso Jurásico-Cretácico, relacionada con la etapa de deformación Neocimérica, y Cretácico-Terciario, conducida por la Orogenia Alpina.

La existencia de contactos discordantes, implica que los espesores de las unidades sedimentarias cambien lateralmente, e incluso, algunas puedan desaparecer por erosión. Las unidades U03 a U06, se acuñan hacia el sector occidental de la cuenca. Los materiales carbonatados de la U06, no se reconocen en la zona meridional de la cuenca, donde la U07 se deposita directamente sobre la U05. Este hecho, indica que la actividad tectónica sin-sedimentaria estaba operando en esta parte del “Golfo de Albacete” (Vilas y cols. 1982) durante el Cretácico inferior, influyendo notablemente en la distribución de las unidades sedimentarias identificadas.

3. LOS NIVELES ARMO

Estratigráficamente, considerando los cambios laterales de facies y variaciones de espesor detectados en los materiales que conforman la cuenca, el muro de los niveles ARMO (U04) se puede corresponder con la costra ferruginosa que forma el techo de la U03. El techo corresponde con las lutitas arenosas que conforman la U05 y/o las dolomías sacaroideas de la U06 (Figura 3, 5C).

Las lutitas que presentan los niveles ARMO, afloran ampliamente en la zona de estudio (Figura 1). En el sector septentrional de la cuenca endorreica estos niveles aparecen en posición subhorizontal, asociados a los suaves relieves que forman los depósitos de la U04 y U05 (Figura 1). En el borde oriental y en el occidental de la cuenca endorreica afloran formando bandas alargadas coincidentes con la dirección de fracturación N40. Al S de la laguna los niveles ARMO aparecen siguiendo la dirección de fracturación aproximada N120 (Figura 1).

Los niveles ARMO pueden presentar variaciones laterales de potencia motivadas fundamentalmente por la discordancia angular existente entre los materiales de la U05 y la U06, aunque los espesores medidos rondan los 7 m (Figura 3). La posición en profundidad de los niveles lutíticos sólo se ha podido establecer de forma indirecta, salvo en aquellos casos donde aflore el muro de la U05 y/o U06. En estos casos, se pueden encontrar a un mínimo de 8 m y a un máximo de aproximadamente 15 m de profundidad. La cartografía geológica indica que se localizan a mayor profundidad a medida que nos acercamos a los límites meridionales y occidentales de la cuenca.

Los niveles afloran con distintas características petrológicas en la zona de estudio. En los sectores septentrional, occidental y meridional de la cuenca es frecuente encontrar los niveles ARMO como lutitas de colores grisáceos (incluso negro). Cuando los niveles se presentan en superficie con coloraciones grises oscuros a negras aparece yeso de forma dispersa como agregados cristalinos fibrosos de hasta 5 cm de longitud o en forma de rosetas cuyos cristales individuales presentan dimensiones de hasta 5 cm de diámetro mayor. En la zona de estudio, no se han encontrado niveles interstratificados de yesos secundarios que posean continuidad lateral. Asociadas a estos yesos se halla también presentes mineralizaciones de óxidos de hierro y restos fósiles vegetales carbonizados. En los sectores septentrional y oriental, también es posible encontrar los mismos niveles con tonos grises claros a rojizos. En estos casos la presencia de yesos y el tamaño de los cristales disminuyen, y los restos vegetales carbonizados están ausentes.

Las características petrológicas de los niveles ARMO en el subsuelo de la cuenca se han podido determinar gracias a la muestra recogida en el pozo surgente de “Los Yesares”. La muestra extraída del fondo de la construcción a 31 m de profundidad corresponde con lutitas-arenosas negras ricas en materia orgánica. El tratamiento específico llevado a cabo para la extracción de azufre en forma reducida de la muestra indica una alta presencia de sulfuros (C. Recio com. pers.).

Probablemente, los cambios mineralógicos y petrológicos detectados en los niveles ARMO son indicativos de diferentes grados de alteración supergénica. Los niveles menos alterados por la diagénesis superficial post-sedimentaria corresponden con los localizados en el subsuelo de la cuenca, que presentan un alto contenido en materia orgánica y sulfuros y exhiben un color negro. Por el contrario, los niveles más afectados por la meteorización se relacionan con los paquetes lutíticos con ausencia de materia orgánica y yeso disperso. En estos casos, los sulfuros se han podido oxidar completamente en contacto con las aguas meteóricas y el oxígeno atmosférico, y la materia orgánica ha desaparecido por lixiviación.

¿Cuándo tuvieron lugar los procesos de alteración superficial de los niveles ARMO?. Aunque se necesitan datos adicionales, es probable, que la etapa más importante, tuviera lugar durante el Plioceno (5,33-1,81 m.a.). En esta Época, los materiales mesozoicos quedan exhumados y se erosionan tras los movimientos tectónicos que afectaron a la región durante la Orogenia Alpina. No obstante, tampoco se descarta la posibilidad de una primera fase de alteración intracretácica, asociada a la exposición subaérea de los niveles durante el Aptiense (125-112 m.a.).

4. SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA Y FLUJO SUBTERRÁNEO

La Laguna Salada de Pétrola se ha estudiado desde un punto de vista hidrológico por Romero-Díaz y cols. (1988). Según estos autores, el acuífero principal, que ocupa una extensión de 50 km², está compuesto por los terrígenos de la “Facies Utrillas”. El muro impermeable del acuífero está formado por la denominada “Facies Weald” (Barremiense). Los límites del acuífero, están delimitados por las fallas del borde meridional, oriental y occidental y por los afloramientos de las arcillas de la “Facies Weald” al N de la cuenca.

Según los resultados obtenidos en este estudio, la cuenca endorreica de la laguna está formada por la superposición de dos acuíferos que, de muro a techo, son: a) acuífero del Jurásico superior, semiconfinado, y, b) el acuífero del Cretácico medio-inferior, sobre el que yace la laguna. El acuífero jurásico está constituido por calizas oolíticas fracturadas con potencias de hasta 130 m cuyo muro impermeable lo forman las margas del Kimmeridgiense inferior. El acuífero cretácico, libre, está presente en la mayoría de la zona de estudio excepto en el límite E, donde afloran los materiales jurásicos. Está formado en su mayor parte por unidades terrígenas y carbonatadas cuyo espesor puede superar los 60 m, con edades comprendidas entre el Barremiense (U02 a U06 y el Albiense (“Facies Utrillas”, U07). La permeabilidad de estos materiales es baja (1-10 m/día), sin embargo presentan una alta capacidad de almacenamiento (5-10%). El muro semimpermeable puede estar constituido por los materiales cretácicos de la U02 (Figura 4).

La superficie piezométrica para el año 1972, indica un flujo subterráneo centrípeto, hacia la laguna, con un eje de drenaje de dirección NE-SO (Rodríguez-Estrella, 2001) que coincide con la dirección del eje mayor del paralelogramo. En este acuífero, la superficie freática se halla a escasos metros de profundidad (Romero-Díaz y cols. 1988; Rodríguez-Estrella, 2001).

Observaciones recientes confirman este modelo de flujo subterráneo centrípeto (Gómez-Alday y cols. 2004). Con los valores piezométricos obtenidos en 30 puntos de agua se ha elaborado el mapa de isopiezas del acuífero cretácico para el año 2003 (Figura 5). Las isolíneas, representadas con una equidistancia de 5 m, muestran correctamente la morfología de la superficie freática, la cual discurre paralela a la topografía de la cuenca. Los gradientes hidráulicos varían entre 0,01 y 0,02 % siendo más pronunciados en los bordes E y O de la cuenca, y más laxos en las proximidades de la laguna.

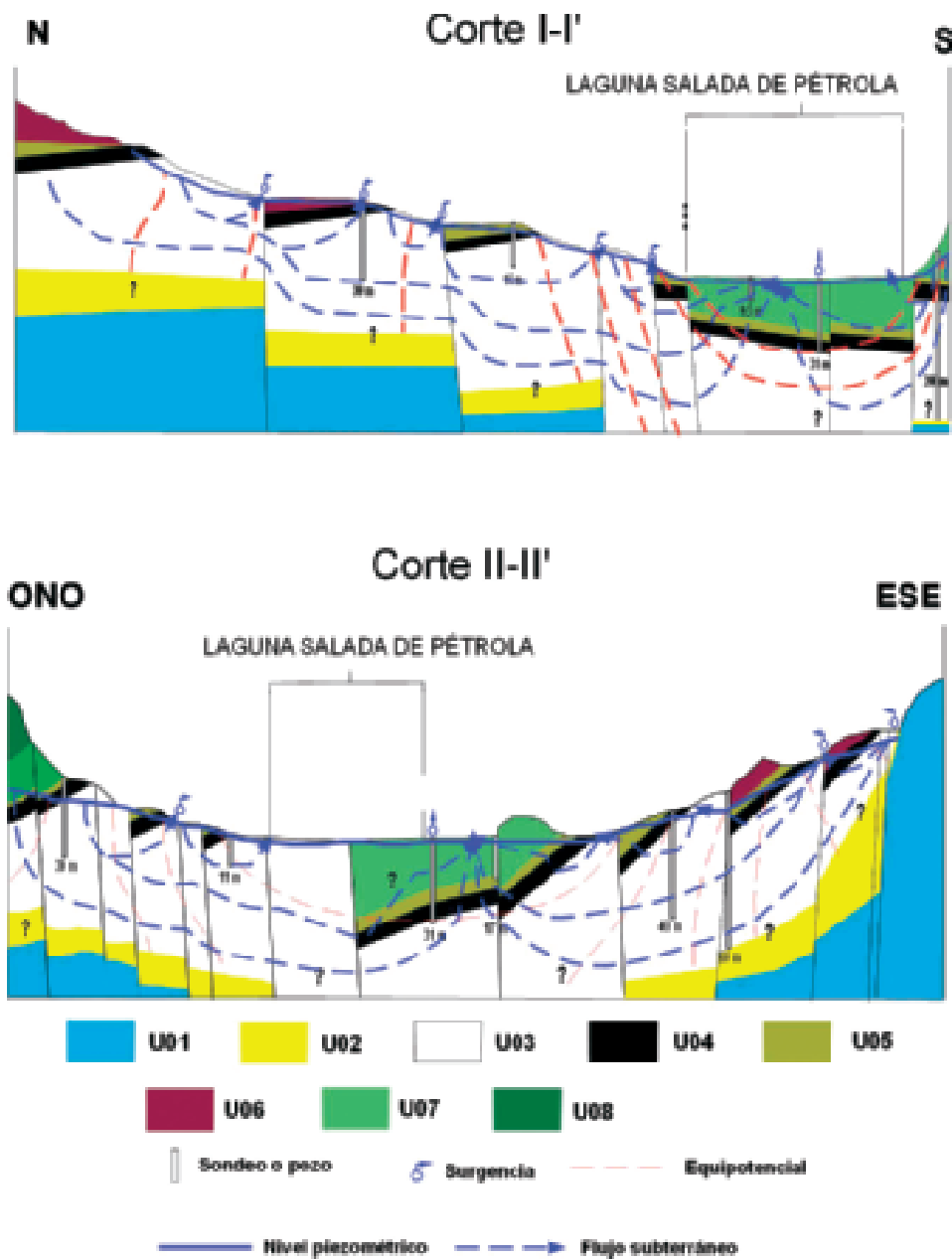


Figura 4. Cortes hidrogeológicos, I-I' y II-II'. U01: Unidad 1. Jurásico superior (Kimmeridgiense), U02: Unidad 2. Barremiense, U03: Unidad 3. Barremiense-Aptiense inferior?, U04: Unidad 4. Niveles ARMO. Barremiense-Aptiense inferior?, U05: Unidad 5. Barremiense- Aptiense inferior?, U06: Unidad 6. Aptiense, U07: Unidad 7. Albiense. “Facies Utrillas”, U08: Unidad 8. Cenomaniense-Campaniense. Esquemas sin escala.

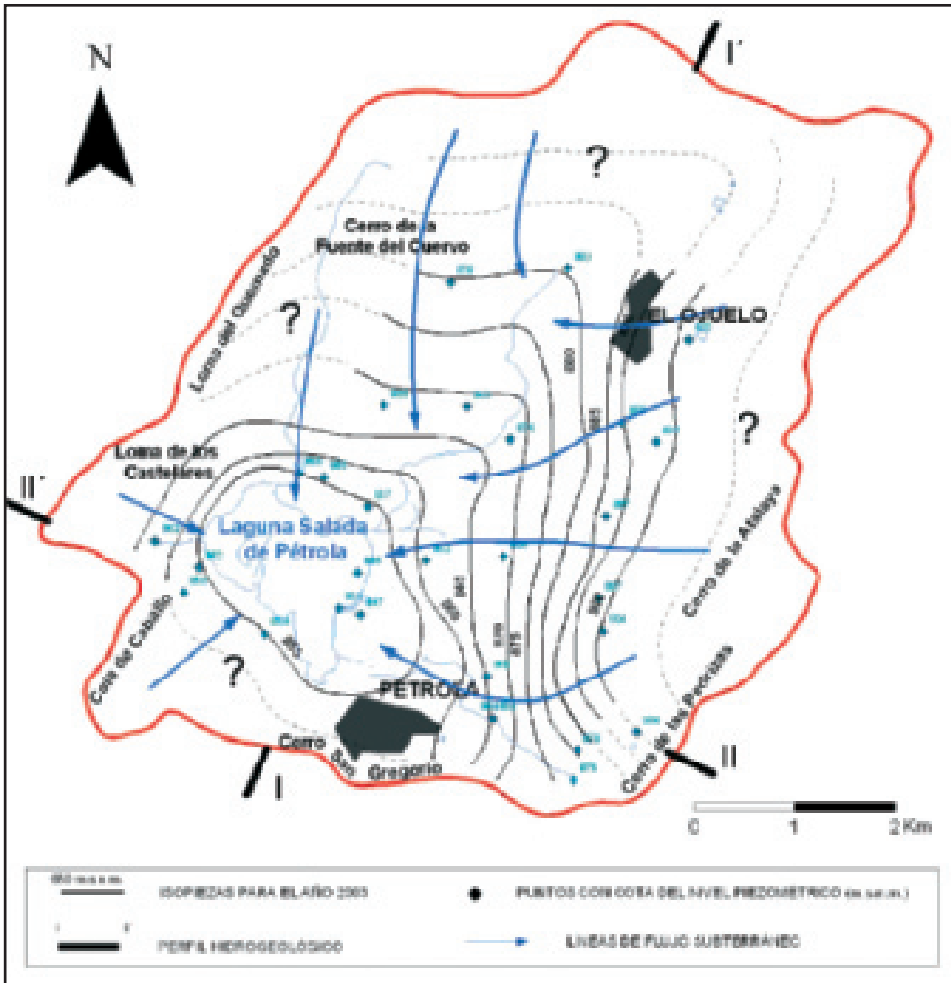


Figura 5. Mapa de isopiezas del acuífero cretácico para el año 2003 de la Cuenca endorreica de la Laguna Salada de Pétrola.

5. MATERIALES GEOLÓGICOS Y SALINIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En ausencia de otros mecanismos, se admite que la composición química de las aguas subterráneas está directamente relacionada con la litología de las unidades presentes en la cuenca y con el tiempo de permanencia de las aguas en sus poros (Custodio y Llamas, 1983). En este sentido, el estudio realizado por De la Peña y Marfil (1986), que aborda la sedimentación salina actual en la Laguna Salada de Pétrola, apunta a la disolución de evaporitas presentes en la “Facies Keuper” (Triásico superior) como proceso responsable del aporte de sulfato a las aguas subterráneas. Las descripciones hidrogeológicas realizadas en la zona de estudio no profundizan sobre los procesos geológicos que confieren el carácter salino a las aguas subterráneas de la cuenca. No obstante, Donate y cols. (2001) señalan, dentro del estudio que realizan del Sector salino-endorreico de Pétrola-Corral Rubio-La Higuera, que la escasa permeabilidad de los materiales geológicos así como su contenido en determinados minerales solubles (yeso, pirita,...) pueden condicionar la composición química del agua subterránea de la cuenca.

Gómez-Alday y cols. (2004), estudiaron el origen del sulfato presente en el agua subterránea que alimenta a la laguna mediante técnicas isotópicas. Los datos isotópicos del oxígeno y azufre presentes en la molécula del sulfato disuelto, en muestras recolectadas en diferentes manantiales y en la propia laguna, descartan un aporte por disolución de evaporitas del Keuper e indican una fuente relacionada con procesos de oxidación de sulfuros (p.e. pirita) y reducción de sulfatos. Al parecer estos mecanismos están asociados con la presencia en el subsuelo de niveles arcillosos ricos en materia orgánica y sulfuros (niveles ARMO, U04) de edad Cretácico inferior (Barremiense-Aptiense?).

Si esta hipótesis es correcta, los valores $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ de las muestras de agua subterránea pueden ser resultado de la combinación de procesos de oxidación de sulfuros en las zonas de recarga del acuífero y reducción de sulfatos en las zonas de descarga en las lutitas arenosas de los niveles ARMO. Las pequeñas oscilaciones estacionales del nivel piezométrico pueden provocar la alteración de los niveles de lutitas debido a sucesivos estadios en los cuales pasen de condiciones saturadas a no saturadas. Por el contrario, en las zonas de descarga del acuífero, el nivel ARMO está permanentemente en condiciones saturadas, de manera que se pueden favorecer los procesos de reducción de sulfatos.

Los niveles ARMO constituyen un acuitardo responsable de la alta concentración de sulfato, entre otros iones, en las aguas subterráneas que

surgen en la Cuenca Endorreica de la Laguna Salada de Pétrola. Aunque es preciso un reconocimiento más detallado de la zona de estudio para establecer con exactitud la distribución de los niveles en la cuenca respecto a la posición de la superficie piezométrica, los resultados obtenidos permiten identificar zonas en las cuales se encuentran en condiciones saturadas y no saturadas dentro del sistema (Figura 4). En general, tomando como referencia la laguna, los niveles ARMO, se encuentran en condiciones no saturadas hacia los sectores N y E y SO, de la cuenca endorreica, donde se localizan en superficie o a pocos metros de profundidad en el subsuelo de la cuenca. Por el contrario, en el sector meridional, los mismos niveles se pueden hallar a profundidades cercanas a los 30 m, por debajo del nivel freático de la cuenca.

Los procesos de oxidación de los sulfuros contenidos en los niveles ARMO, debieron presentar una gran intensidad durante los primeros estadios del desarrollo de la cuenca endorreica. En estos momentos, interactuaron con las aguas meteóricas y el oxígeno atmosférico dando lugar a la oxidación generalizada de los niveles ARMO. Como productos de la oxidación de los sulfuros contenidos en estos niveles se formaron soluciones salinas que se acumularon finalmente en la laguna. La laguna, salida natural de las aguas subterráneas del acuífero cretácico, permitía la concentración de la solución salina de forma que, durante el estiaje, se producía la acumulación de sulfatos por evaporación directa de la salmuera.

En la actualidad, los materiales constituyentes de los niveles ARMO en la mayor parte del área que comprende la cuenca endorreica presentan coloraciones rojizas a grises claras que sugieren la ausencia de materia orgánica y sulfuros. Se desconoce la cantidad de sulfuros que pudieran quedar presentes en estos niveles alterados. No obstante, los análisis físico-químicos sugieren los mismos procesos están teniendo lugar actualmente, aunque quizás, dada la disponibilidad de sulfuros, con menor intensidad.

¿Puede justificar la distribución y características petrológicas actuales de los niveles ARMO la concentración o el volumen de sales cristalizadas en la laguna?. Aunque se requiere estudios adicionales que aborden la modelación hidrogeoquímica de la cuenca con detenimiento, parece poco probable que la concentración de sales en las surgencias naturales conduzca a la precipitación de evaporitas que anualmente tiene lugar en la laguna. La salinidad del pozo surgente, por el contrario, podría dar lugar a las acumulaciones de mineral actuales, pero es un proceso antrópico que explota directamente aguas subterráneas con una salinidad elevada. Si el aporte de sales desde las surgencias es insuficiente para justificar el volumen de evaporitas que se depositan actualmente, es probable que parte de los depósi-

tos salinos estén en continuo reciclado desde el momento en el cual se configuró la cuenca endorreica, cuando los materiales cretácicos comenzaron su denudación.

Para obtener datos sobre la periodicidad en la sedimentación salina, también puede resultar interesante conocer cuál es el espesor y los cambios litológicos que pudieran estar presentes en los depósitos que se encuentran rellenando la laguna. De esta manera, se podría detectar la posible existencia de varvas en la sedimentación que sugieran la alternancia de periodos secos y húmedos dentro del ciclo hidrológico-deposicional de la laguna. La ausencia de este tipo de depósitos periódicos indicaría que la tasa interanual de acumulación de minerales es despreciable y que los depósitos salinos participan de un ciclo de disolución y precipitación anual.

CONCLUSIONES

Se han definido nueve unidades sedimentarias afectadas por rupturas que complican el establecimiento de una serie estratigráfica completa. Los niveles ARMO (U04) se localizan sobre la unidad terrígena U03 y bajo las lutitas arenosas de la U05. Debido a la existencia de una ruptura sedimentaria en forma de discordancia erosiva, los niveles ARMO también puede aparecer a muro de las dolomías arenosas de la U06.

El flujo subterráneo se produce de forma centrípeta desde los bordes de la cuenca hacia la laguna, que constituye la salida natural del sistema. El nivel freático se encuentra a poca profundidad de forma que, unido con la disposición casi horizontal de los depósitos cretácicos, favorece la existencia de zonas saturadas y no saturadas, sometidas a las pequeñas oscilaciones del nivel freático. En los sectores meridionales los niveles acuitardo ARMO se encuentran por debajo del nivel piezométrico de la cuenca hidrológica y es probable que en estas zonas se puedan estar dando procesos de reducción de sulfatos. En el resto de la zona de estudio los niveles se pueden encontrar por encima de la zona saturada, lo cual favorece los procesos de oxidación de sulfuros.

Si bien se necesitan estudios adicionales enfocados a conocer mejor el comportamiento hidrogeológico del sistema, es probable que una parte importante de los depósitos de evaporitas que se acumulan actualmente, correspondan con una salmuera sucesivamente reciclada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado parcialmente por el Instituto de Estudios Albacetenses “Don Juan Manuel” de la Diputación de Albacete. En la versión digital se ha incluido texto.

REFERENCIAS

- Arias, C., Elizaga, E. y Vilas, L. (1979). Distribución de las facies del Cretácico inferior en el SE de la provincia de Albacete. Cuadernos de geología Ibérica. 5: 453-470
- Arias, C. y Doubinger, J. (1980). La limite Aptien-Albien Dans le Secteur du Mompichel (Albacete). Cretaceous Research. 1: 235-251.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). Hidrología Subterránea. 2ª edición. Ed. Omega. Barcelona, 2.350 pp.
- De la Peña, J.A. y Marfil, R. (1986). La sedimentación salina actual en las lagunas de La Mancha: una síntesis. Cuadernos de Geología Ibérica. 10: 235-270.
- DGOH-C.H.S. (1997). Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura. “Zonas de Protección Especial”. Tomo II. Dirección Gral. de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Min. Medio Ambiente. pp. 283-321.
- Donate, J.A., Montesinos, J.G., López, J.A. y Martínez, J.C. (2001). Estudio descriptivo del sector endorreico-salino de Pétrola, Corral Rubio y La Higuera (Albacete). II Jornadas sobre el Medio Natural Albacetense. Instituto de Estudios Albacetenses.
- Gómez-Alday, J.J., Castaño, S. y Sanz, D. (2004). Origen geológico de los contaminantes (sulfatos) presentes en las aguas subterráneas de la laguna de Pétrola. (Albacete, España). Resultados preliminares. Geogaceta. 35: 167-170
- IGME (1980). Memoria y Hoja Geológica nº 792 (Alpera): Mapa Geológico de España E. 1: 50.000. IGME, Madrid.
- IGME (1981a). Memoria y Hoja Geológica nº 791 (Chinchilla de Montearagón). Mapa Geológico de España E. 1: 50.000. IGME, Madrid.
- IGME (1981b). Memoria y Hoja Geológica nº 817 (Pozo Cañada). Mapa Geológico de España E. 1: 50.000. IGME, Madrid.
- IGME (1984). Memoria y Hoja Geológica nº 818 (Montealegre del Castillo). Mapa Geológico de España E. 1: 50.000. IGME, Madrid.
- Ordóñez, S., García del Cura, M.A. y Marfil, R. (1973). Sedimentación actual: la laguna de Pétrola (Albacete). Estudios Geológicos. 29: 367-377.

- Rodríguez-Estrella, T. (2001). Los humedales de la provincia de Albacete y las aguas subterráneas. II Jornadas sobre el Medio Natural Albacetense. Serie III. Congresos, Seminarios, Exposiciones y Homenajes. 7. Instituto de Estudios Albacetenses "Don Juan Manuel". Excma. Diputación de Albacete. 28 de noviembre al 1 de diciembre de 2001. 587-616.
- Romero Díaz, M.A.; Navarro Hervás, F.; López Bermúdez, F. y Rodríguez Estrella, T. (1988). La laguna de Pétrola: un modelo de circulación centrípeta subterránea (Albacete). Internat. Symp. On Hidrolog. Of wetlands in semiarid and arid regions. pp 151-154. Sevilla.
- Vilas, L., Mas, J.R., García, A., Arias, C., Alonso, A., Meléndez, N. y Rincón, R. (1982). Ibérica Suroccidental. En: El Cretácico de España, Univ. Complutense, Madrid. Pp. 457-508.