

Geología e hidrogeología de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago (Los Monegros, provincias de Zaragoza y Huesca)

J.M. SALVANY (*), M.A. GARCÍA VERA (**), Y J. SAMPER (***)

(*) Dept. Enginyeria del Terreny i Cartogràfica, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona.

(**) Pº de la Constitución 37, 3º, 50001 Zaragoza.

(***) E.T.S. Enxeñeiros de Camiños, Canais e Portos,
Universidade da Coruña, 15192 A Coruña.

RESUMEN

La zona endorreica de Bujaraloz-Sástago constituye un relieve tabular, compuesto por depósitos detríticos, yesíferos y carbonatados, correspondientes al Oligoceno superior y Mioceno inferior. Se han distinguido seis unidades litológicas superpuestas. De base a techo son: 1) Unidad Detrítica Basal, 2) Unidad Carbonatada Inferior, 3) Unidad Detrítica Intermedia, 4) Unidad Yesífera Intermedia, 5) Unidad Detrítica Superior, y 6) Unidad Yesífera Superior.

Todos estos materiales presentan muy baja permeabilidad y contienen aguas subterráneas con elevada salinidad. En el área estudiada se pueden distinguir dos diferentes acuíferos superficiales: 1) Acuífero inferior, constituido por la Unidad Yesífera Intermedia; 2) Acuífero Superior, constituido por la Unidad Yesífera Superior. Ambos acuíferos quedan separados por la Unidad Detrítica Superior que actúa como nivel semiconfinante. El Acuífero Inferior es un acuífero libre en la mitad meridional de la zona endorreica. El flujo se dirige principalmente hacia las depresiones y lagunas que caracterizan la zona endorreica, donde tiene lugar su descarga. En la mitad septentrional constituye un acuífero confinado bajo las unidades Detrítica Superior y Yesífera Superior. El Acuífero Superior constituye un acuífero libre en toda su extensión. Su componente principal del flujo se dirige desde el SO hacia el NE, con descarga en las lagunas y barrancos próximos a Bujaraloz.

Palabras clave: Geología aplicada. Hidrogeología. Litoestratigrafía, Cuenca del Ebro. Monegros. Zona endorreica. Lagunas salinas.

ABSTRACT

The closed-basin area of Bujaraloz-Sástago has a tabular relief and lies on upper-Oligocene and lower-Miocene detritic, gypsiferous and carbonatic deposits. The area contains a large number of small salt lakes which in most cases are related to groundwater discharge. Six distinct stratigraphic units can be distinguished in the sequence: 1) Basal Detrital Unit, 2) Lower Carbonatic Unit, 3) Middle Detrital Unit, 4) Middle Gypsiferous Unit, 5) Upper Detrital Unit, and 6) Upper Gypsiferous Unit.

All these materials have a low permeability and contain high salinity groundwaters. In the area of study, two shallow aquifers can be distinguished. The Lower Aquifer is located on the limestone-gypsum sequence of the Middle Gypsiferous Unit. At the southern part of the study area, this aquifer is a water table aquifer in which groundwater discharge takes place mostly at the salt lakes. At the northern limit, it is confined by the Upper Detrital Unit which separates the Bottom Aquifer from an upper water table aquifer located on the Upper Gypsiferous Unit. In this Upper Aquifer groundwater flows from southwest to northeast and discharges at the lakes and creeks close to Bujaraloz.

Key words: Applied geology. Hydrogeology. Lithostratigraphy. Ebro Basin. Monegros. Closed-basin. Salt lakes.

INTRODUCCIÓN

El Plan de Riego de Monegros-II contempla la progresiva puesta en regadío de 66000 ha en veintidós sec-

tores diferentes. Tres de ellos (sectores VIII, IX y XII) se encuentran en la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago (Figs. 1 y 2), delimitada al este por el barranco de Valcuerna, al oeste por la divisoria de aguas superficiales de los montes de Retuerta, al sur por el escarpe que se dirige hacia el río Ebro, y por el norte con Val Cardosa (carretera N-II).

Esta zona endorreica se caracteriza por la presencia de un sustrato soluble (materiales carbonatados y evaporíticos) en el que abundan toda una serie de pequeñas y medianas depresiones, algunas de las cuales se inundan temporalmente y constituyen el complejo lagunar salino de Bujaraloz-Sástago (Balsa *et al.*, 1991).

A pesar del beneficio socioeconómico que se espera obtener del Plan de Riegos, en la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago el regadío puede comportar algunos efectos adversos: 1) La salinización de los suelos, como resultado de la escasa profundidad del nivel freático y el ascenso de niveles por los efluentes de riego; 2) La pérdida de superficie cultivable, como resultado del incremento de la descarga subterránea en las lagunas y el consiguiente aumento de la superficie ocupada por las mismas; 3) Aumento de la salinidad del río Ebro, como resultado del drenaje natural y artificial de aguas salinas.

Por otro lado, en la actualidad se está valorando la posibilidad de declarar el conjunto de lagunas como un espacio natural protegido. Esta catalogación podría ser incompatible con el plan de regadío pues la expansión y dilución del complejo lagunar inducida por el regadío su-

pondría una notable alteración del equilibrio ecológico de la zona.

El presente artículo presenta los resultados de un detallado estudio sobre las características geológicas e hidrogeológicas de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago, realizado con la finalidad de evaluar los diferentes efectos adversos del Plan de Regadío a los que nos hemos referido. Se describen esencialmente las características litoestratigráficas de los materiales terciarios que forman la zona endorreica y los acuíferos superficiales asociados a los primeros 100 m de profundidad, cuya dinámica está directamente relacionada con el desarrollo de las lagunas. Las conclusiones sobre los efectos adversos del Plan de Regadío no se incluyen en el presente artículo aunque sí se exponen en los trabajos de García Vera (1994) y García Vera y Samper (1994).

GEOLOGÍA

Marco geológico regional y antecedentes

La zona endorreica de Bujaraloz-Sástago se localiza en el sector central o aragonés de la Cuenca Terciaria del Ebro (Riba *et al.*, 1983). Presenta un relieve tabular, formado por depósitos detríticos y lacustres correspondientes al tránsito Oligoceno-Mioceno. Los depósitos detríticos son facies aluviales distales, procedentes de la Cordillera Ibérica o Pirineo según los casos. Forman tramos lutíticos de característico color rojizo, con intercalaciones de capas de arenisca y limolita. Los depósitos lacustres están compuestos de yeso y caliza. Corresponden a facies marginales de lagos evaporíticos y carbonatados cuyos depocentros se localizaron fuera del área estudiada. Parte de estos depósitos terciarios están recubiertos por sedimentos cuaternarios coluviales, aluviales y eólicos, que rellenan principalmente los fondos de los valles y barrancos periféricos a la zona endorreica, así como los fondos de las depresiones y lagunas de la zona endorreica.

El primer estudio geológico destacable del sector central de la Cuenca Terciaria del Ebro fue realizado por Quirantes (1978). Trata sobre la estratigrafía de las formaciones terciarias, con importantes referencias a la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago. Posteriormente, Cabrera (1983) revisa y modifica algunas unidades y establece una detallada interpretación sedimentológica para los materiales terciarios (principalmente oligocenos). Más reciente-

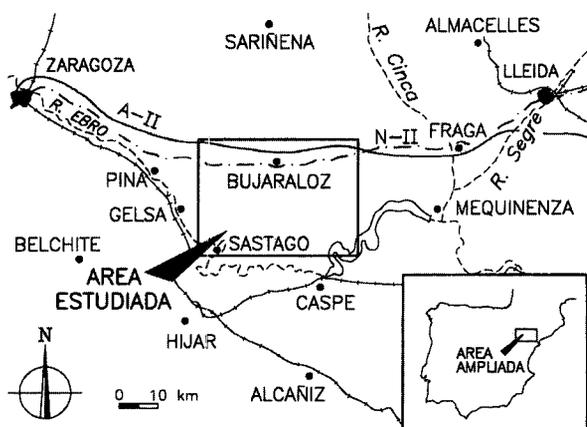


Figura 1.- Situación geográfica del área estudiada.

Figure 1.- Geographic location of the studied area.

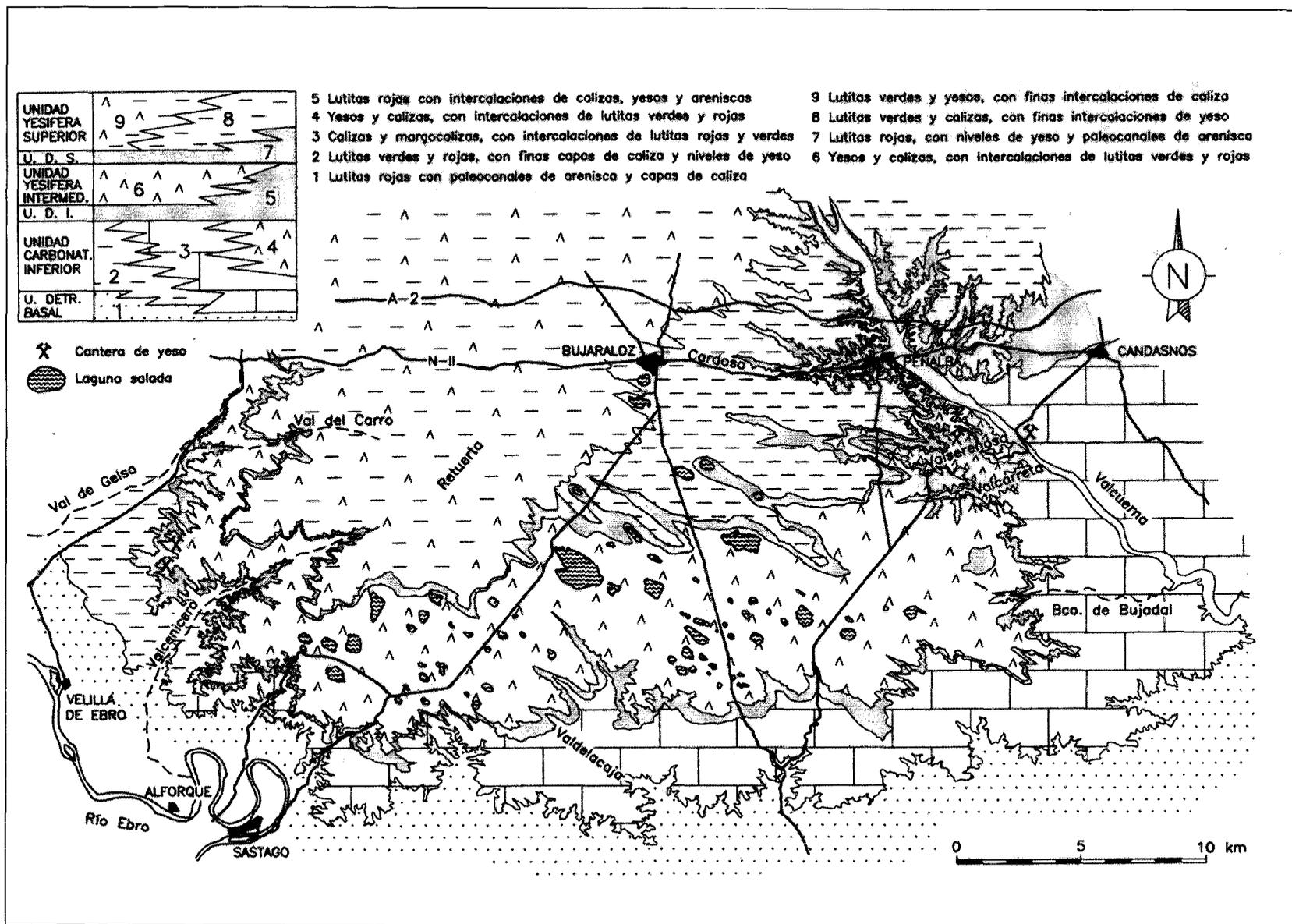


Figura 2.- Mapa litológico de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago.

Figure 2.- Lithologic map of the Bujaraloz-Sástago closed-basin.

mente, Ramírez (1991) y Costa *et al.* (1991) realizan los mapas geológicos a escala 1:50.000, respectivamente de Gelsa y Bujaraloz (proyecto MAGNA), y Luzón (1994) describe la estratigrafía de los materiales del tránsito Oligoceno-Mioceno entre la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago y el valle del río Cinca. La figura 3 representa un intento de correlación de las unidades estratigráficas establecidas por estos autores en la zona endorreica.

Las características estructurales han sido estudiadas por Quirantes (1978), Mingarro *et al.* (1981) y Arlegui *et al.* (1994). Las características sedimentológicas de las lagunas saladas se abordan en Pueyo (1978-79), Mingarro *et al.* (1981) y Pueyo e Inglés (1987a, 1987b).

Principales litofacies terciarias

Los materiales terciarios que componen la zona estudiada presentan las siguientes características litológicas:

Yeso

Es siempre secundario alabastrino, procedente del reemplazamiento de anhidrita (hidratación por aguas meteóricas). Esta anhidrita llega a reconocerse sólo en profundidad, por debajo de algunas decenas de metros de la superficie (35 m en la parte occidental del área de estudio según los sondeos de ADARO, 1975).

En su mayor parte, el yeso se presenta con facies nodular, formando capas o bien en forma de nódulos dispersos entre las otras litologías. El tamaño de los nódulos es muy variable, desde unos pocos centímetros hasta más de 1 m (yeso meganodular). La forma de los nódulos tiende a ser subsférica, pero también son frecuentes los agregados nodulares de elongación vertical y los niveles enterolíticos. La matriz internodular es lutítica o carbonatada. La roca encajante muestra con frecuencia estructuras de deformación debida al crecimiento nodular.

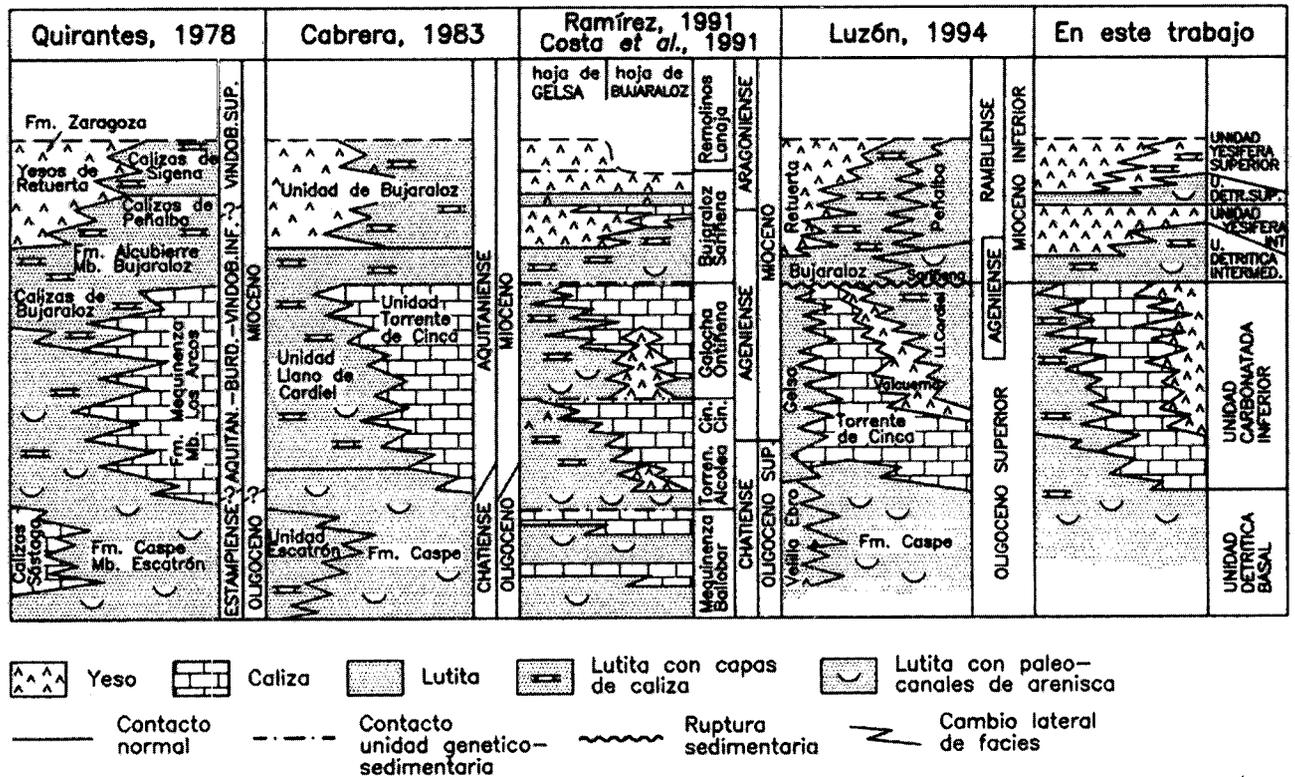


Figura 3.- Intento de correlación de las unidades estratigráficas definidas por diferentes autores en la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago y las unidades establecidas en el presente estudio.

Figure 3.- Correlation attempt between the stratigraphic units established by different authors in the Bujaraloz-Sástago closed-basin and the units defined in this study.

En algunos afloramientos el yeso se presenta también en forma de capas tabulares masivas, de textura micronodular y característico color verdoso, normalmente de espesor métrico. En ocasiones, estas capas muestran estructuras de estratificación cruzada de pequeña y mediana escala que revela el origen detrítico de este yeso.

De forma subordinada, el yeso también se presenta con facies lenticular formando agregados en roseta entre lutitas. Las lenticulas son de tamaño centimétrico.

Caliza y margocaliza

Forman capas tabulares de color beige que individualmente pueden tener un espesor desde 5 cm hasta 1 m. Estas capas pueden estar aisladas entre lutitas y yesos, o bien superpuestas formando tramos de hasta varias decenas de metros de espesor. Su composición es calcítica, aunque en algunos niveles pueden estar parcialmente dolomitizadas.

Básicamente presentan dos tipos de facies: masiva y bioturbada. Ambas facies suelen estar asociadas en una misma capa formando pequeños ciclos carbonatados con un término inferior masivo y otro superior bioturbado. La bioturbación se presenta en forma de tubos subverticales, de 4-6 mm de diámetro.

Al microscopio las diferentes facies se muestran como mudstones o wackestones, con restos de ostrácodos, characeas y gasterópodos como principales bioclastos. Los gasterópodos pueden llegar a formar pequeños niveles lumaquéllicos, de hasta 15 cm de espesor.

Con frecuencia, las capas de caliza contienen nódulos diagenéticos de sílex, de color negro o marrón oscuro. Estos nódulos tienen formas arriñonadas y tamaños del orden de 10 a 40 cm. Se presentan aislados entre sí, formando horizontes paralelos a la estratificación de la caliza.

Lutita

Constituye volumétricamente el material más abundante del área estudiada. Su rasgo más distintivo es el color: roja o naranja en relación con los principales tramos detríticos y gris o verde cuando se trata del material encajante entre los yesos y calizas.

El análisis por difracción de rayos-X de 7 muestras de lutita (roca total) correspondientes a los sondeos 404, 410, 413 y 505 revela la presencia de clorita y montmorillonita como minerales de las arcillas más abundantes,

acompañados de yeso, cuarzo y calcita (García Vera, 1994). De forma ocasional también se han detectado indicios de anhidrita y halita.

Estratigrafía

Desde el río Ebro hasta los montes de Retuerta, los materiales terciarios de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago forman una serie tabular de 250 m de espesor. De base a techo pueden distinguirse las siguientes unidades litológicas:

Unidad Detrítica Basal

Constituye una unidad compuesta principalmente por lutitas rojas y paleocanales de arenisca de hasta 10 m de espesor. De forma subordinada contiene también capas de caliza y yeso. El espesor aflorante de esta unidad aumenta progresivamente de este a oeste, con valores de 40 m en la desembocadura del torrente de Valcuerna en el Ebro, y de 90 m en Sástago. Equivale a los niveles superiores de la Fm. Caspe de Quirantes (1978). No se ha realizado un estudio de detalle de esta unidad.

Unidad Carbonatada Inferior

Constituye una unidad de composición heterogénea, aunque predominantemente carbonatada, que se superpone gradualmente a las facies detríticas de la Unidad Detrítica Basal. Aflora a lo largo de todo el escarpe meridional de la zona endorreica, desde Valcuerna hasta el valle de Gelsa.

En la parte baja de Valcuerna esta unidad constituye una monótona sucesión de calizas y margocalizas de 150 m de espesor, con algunos niveles subordinados de lutitas y yeso (serie de Valsevilla, Fig. 4). En la parte superior de la serie destaca un tramo lutítico mayor, de color rojo, de 10 m de espesor y de gran continuidad en todo el margen oriental de Valcuerna. Este tramo lutítico puede corresponderse con otros de similar posición estratigráfica en las series de Valserenosa y Mas de la Yesera (Fig. 4). La equivalencia es sólo probable pues no hay continuidad de afloramiento entre las series.

Hacia el noroeste se manifiesta un mayor desarrollo de las capas de yeso, que llegando a ser dominantes sobre las calizas y margocalizas en los barrancos de Valserenosa y Valcarreta (serie de Valserenosa, Fig. 4). En estos barrancos las capas de yeso son de facies nodular y masiva-micronodular, dominando una u otra según los lugares y niveles de la serie. El techo de este tramo yesí-

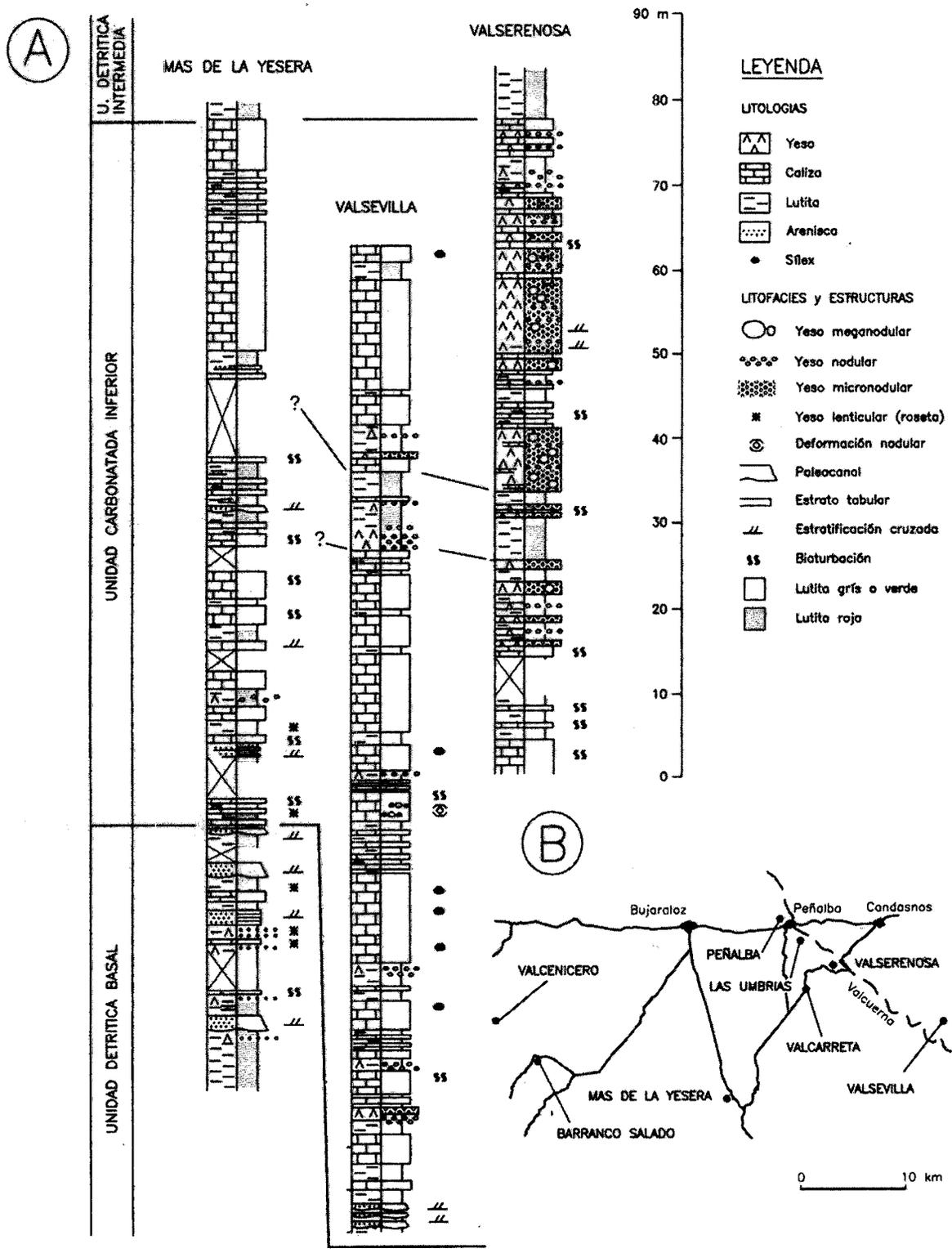


Figura 4.- Columnas litoestratigráficas correspondientes a la Unidad Carbonatada Inferior (A) y mapa de situación de las columnas (B)

Figure 4.- Lithostratigraphic columns of the Lower Carbonatic Unit.

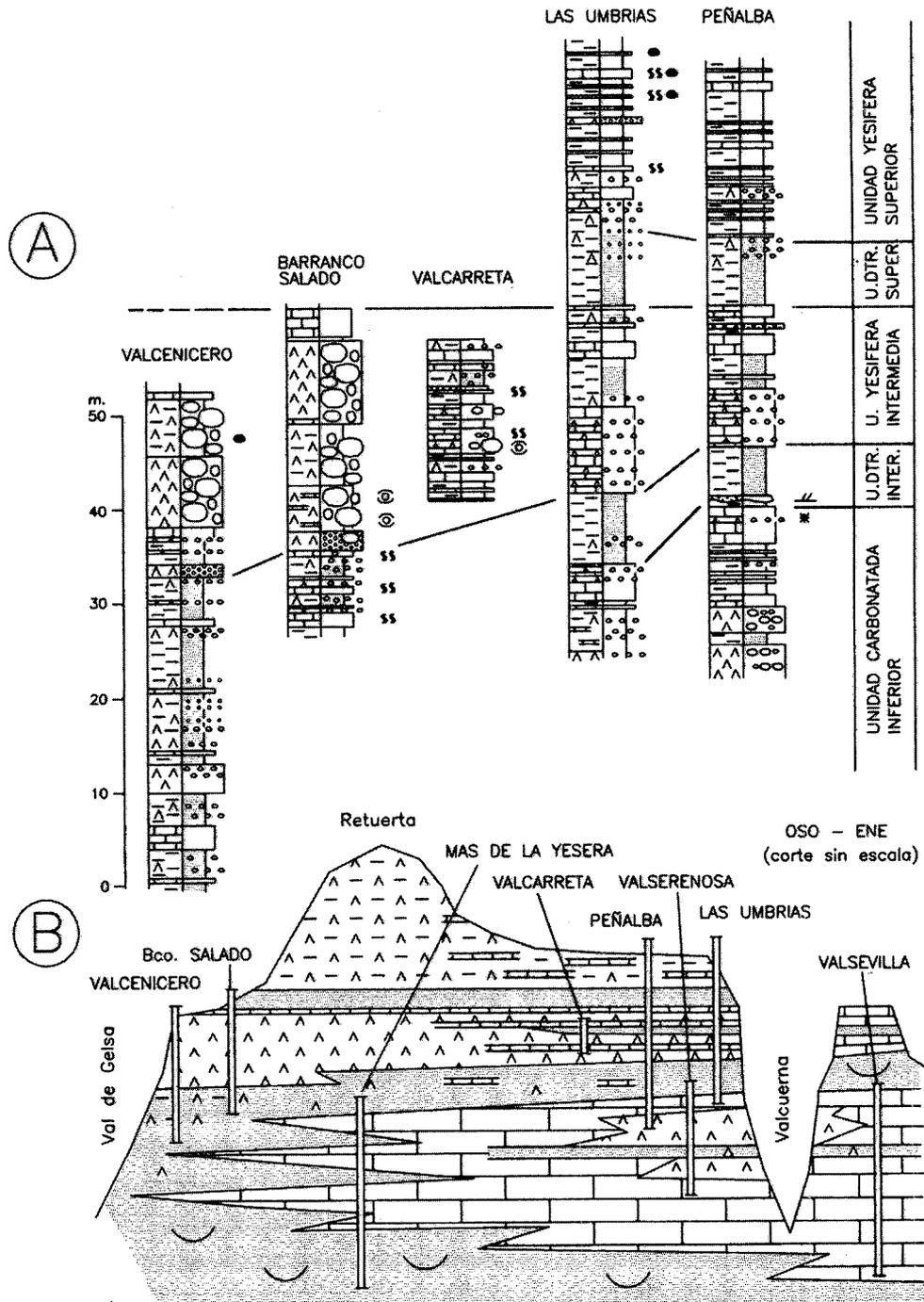


Figura 5.- Columnas lioestratigráficas correspondientes a las unidades Detrítica Intermedia, Yesífera Intermedia, Detrítica Superior y Yesífera Superior (A) y panel de correlación de las columnas (B).

Figure 5.- Lithostratigraphic columns of the Intermediate Detrital Unit, Intermediate Gypsiferous Unit, Upper Detrital Unit and Upper Gypsiferous Unit (A) and correlation framework for the columns.

fero aflora también en los alrededores de Peñalba (serie de Peñalba, Fig. 5)

Desde Valcuerna hacia el oeste, las capas de caliza pierden espesor e intercalan progresivamente niveles lutíticos rojos y grises. En la parte más occidental (valles de Gelsa y Valcencero) la serie llega a ser predominantemente lutítica, con capas subordinadas de caliza y margocaliza. En esta zona resulta difícil establecer los límites inferior y superior de la unidad, debido al carácter también predominantemente lutítico de las unidades sub y suprayacentes.

La Unidad Carbonatada Inferior equivale (Fig. 3) en su parte oriental al Mb. Los Arcos (Fm. Mequinzenza) de Quirantes (1978), y en su parte occidental al techo del Mb. Escatrón (Fm. Caspe) y base del Mb. Bujaraloz (Fm. Alcubierre), del mismo autor. Se corresponde también con las unidades Calizas de Torrente de Cinca y Lutitas y Calizas del Llano de Cardiel, de Cabrera (1983), así como a las unidades Torrente de Cinca-Alcolea de Cinca y Galocha-Ontiñena, de Ramírez (1991) y Costa *et al.* (1991). El tramo detrítico intermedio que se individualiza en Valcuerna creemos que puede ser equivalente al tramo detrítico basal de la unidad Galocha-Ontiñena. Equivale también a las unidades Calizas de Torrente de Cinca, Yesos y Calizas de Valcuerna, Lutitas y Calizas del Llano de Cardiel y Lutitas de Gelsa, de Luzón (1994).

Los datos paleontológicos aportados por estos diferentes autores permiten atribuir la Unidad Carbonatada Inferior al techo del Oligoceno superior y parte basal del Mioceno inferior. Quirantes (1978), Cabrera (1983), Ramírez (1991) y Costa *et al.* (1991) sitúan el tránsito Oligoceno-Mioceno en los niveles inferiores de la unidad. Luzón (1994) sitúa este tránsito en el techo de la misma. Las unidades que describimos más adelante corresponden en conjunto al Mioceno inferior.

Unidad Detrítica Intermedia

Constituye un tramo lutítico rojo bien definido por encima de la Unidad Carbonatada Inferior. Aflora a lo largo de todo el escarpe meridional de la zona endorreica, donde forma un continuo escalón topográfico causado por su menor resistencia a la erosión que las calizas y yesos que la delimitan respectivamente a base y techo.

Las lutitas contienen capas de arenisca, caliza y yeso, de desarrollo variable según las zonas. El espesor total es relativamente constante, de 15 a 20 m. El contacto con la

Unidad Carbonatada Inferior es muy neto. Por el contrario, el tránsito con la unidad yesífera suprayacente es gradual, especialmente en la parte occidental de la zona estudiada.

Quirantes (1978) se refiere a esta unidad como "nivel detrítico de Peñalba" dentro del Mb. Bujaraloz, aunque no le atribuye mayor importancia que la de una intercalación detrítica local dentro de este miembro. Equivale también a los niveles altos de la Unidad Llano de Cardiel de Cabrera (1983), al nivel basal de la Unidad Bujaraloz-Sariñena de Ramírez (1991) y Costa *et al.* (1991), así como a la base de la Unidad Bujaraloz de Luzón (1994).

Unidad Yesífera Intermedia

Aflora en la mitad meridional de la zona endorreica. Sobre ella se emplazan la mayor parte de las depresiones y lagunas características de esta zona (Fig. 2). En la parte occidental, los yesos, en facies nodular y meganodular, son la litología casi exclusiva, con un espesor de 40 m (series de Valcencero y Barranco Salado, Fig. 5). Hacia el este y noreste la unidad pierde espesor. En esta misma dirección entre el yeso se intercalan progresivamente capas de caliza, que llegan a ser dominantes sobre el yeso en la zona de Peñalba, así como de lutita (series de Valcarreta, Umbrías y Peñalba, Fig. 5). Estas alternancias de yeso, caliza y lutita se observan especialmente bien en los sondeos hidrogeológicos que atraviesan la unidad en la mitad oriental de la zona endorreica (Fig. 6). Los niveles lutíticos son de espesor decimétrico. De entre éstos destaca, tanto en los sondeos como en los perfiles estratigráficos de campo, uno de mayor, de color rojizo y de hasta 3 m de espesor, que en la zona de Peñalba claramente permite separar un tramo carbonatado-yesífero superior de otro inferior.

Quirantes (1978) incluye las facies yesíferas más puras de la parte occidental de la zona endorreica en la unidad Yesos de Retuerta (Fm. Zaragoza). Las facies yesífero-carbonatadas de la parte oriental las incluye en el Mb. Bujaraloz (Fm. Alcubierre). Este mismo criterio es seguido por Luzón (1994). En su conjunto, la Unidad Yesífera Intermedia queda incluida en la Unidad Bujaraloz de Cabrera (1983) y en la Unidad Bujaraloz-Sariñena de Ramírez (1991) y Costa *et al.* (1991).

Unidad Detrítica Superior

Constituye un continuo nivel guía lutítico rojo, de 5-6 m de espesor, que se reconoce igualmente bien en los perfiles de campo como en los sondeos (Figs. 5 y 6). Las lu-

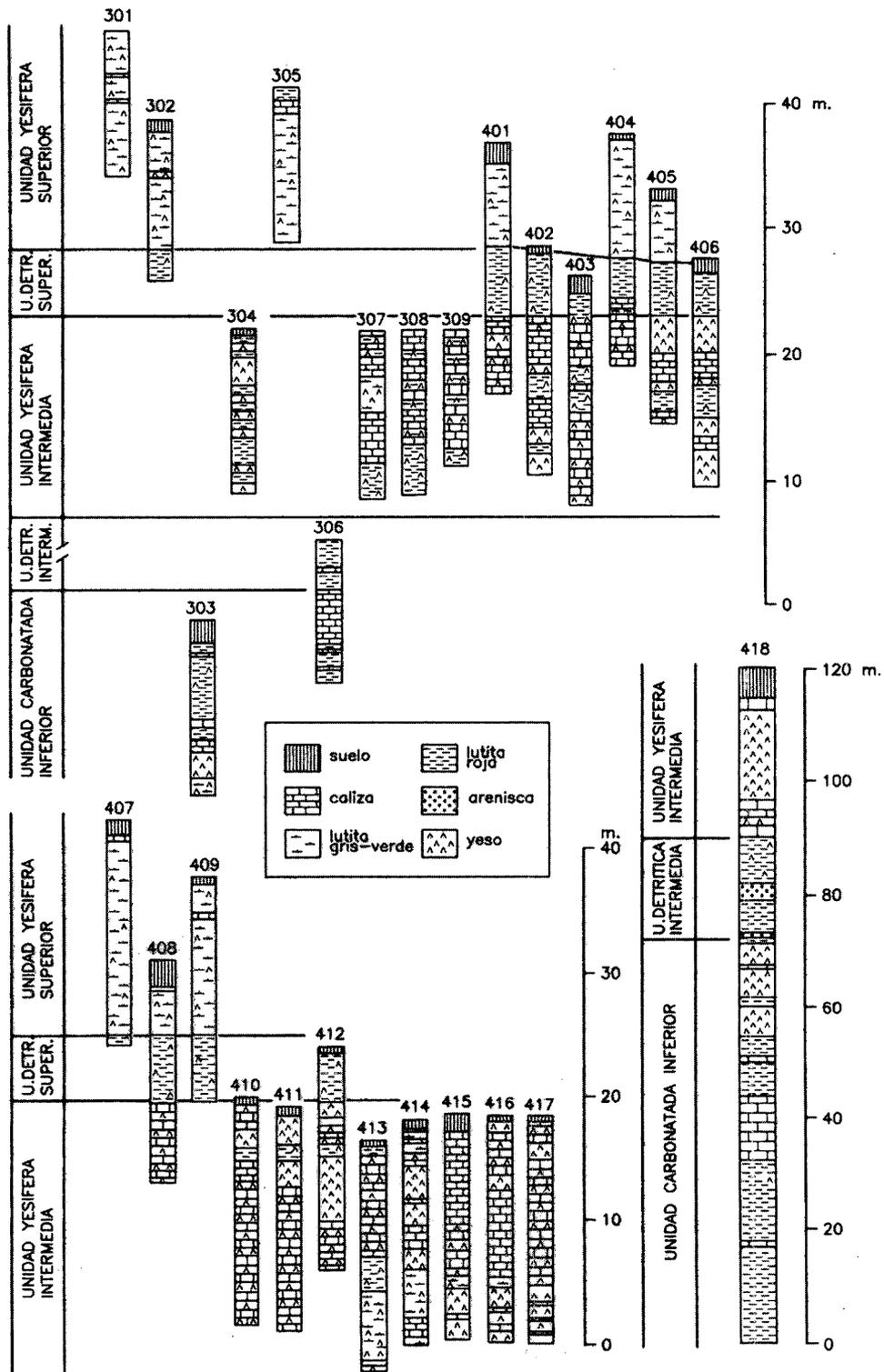


Figura 6.- Panel de correlación estratigráfica de los sondeos hidrogeológicos (ver figura 7 para la situación).

Figure 6.- Stratigraphic correlation of the hydrogeologic boreholes (see figure 7 for location).

titas son muy puras, aunque pueden presentar finos niveles de yeso nodular. El contacto con la Unidad Yesífera Intermedia subyacente es muy neto. Por el contrario, pasa gradualmente a la unidad suprayacente a través de un tramo lutítico versicolor que hacia techo incluye progresivamente capas de caliza y yeso propias de esta otra unidad.

En la zona de Candanos, fuera ya de nuestra zona de estudio, la desaparición de la Unidad Yesífera Intermedia hace que las unidades detríticas Intermedia y Superior se superpongan directamente formando un único tramo detrítico sin que se puedan diferenciar ambas unidades.

La Unidad Detrítica Superior ha sido distinguida también por Ramírez (1991) y Costa *et al.* (1991), que la consideran como un nivel dentro de la Unidad Bujaraloz-Sariñena.

Unidad Yesífera Superior

Aflora en la mitad septentrional de la zona endorreica y se extiende hacia el norte con características muy uniformes hasta el pie de los relieves montañosos de Sta. Quiteria (fuera del área de estudio). La principal diferencia con la Unidad Yesífera Intermedia es su alto contenido en lutitas, siempre de color gris o verde, y el carácter exclusivamente nodular de los yesos (no se reconocen facies meganodulares). Su espesor total es del orden de 100 m, aunque en ningún caso se presenta un corte completo de esta unidad. Su afloramiento más representativo lo constituyen los montes de Retuerta.

Pueden distinguirse dos facies relacionadas lateralmente: 1) Al este de Bujaraloz, la lutita es verde y está asociada principalmente a capas de caliza y margocaliza, con niveles de yeso nodular subordinados. Las capas de caliza pueden alcanzar potencias de hasta 3 m, aunque los espesores más corrientes oscilan entre 30 y 80 cm. 2) Hacia el oeste la lutita es grisácea y contiene abundantes niveles de yeso nodular y micronodular. Entre estas facies yesíferas las capas de caliza son prácticamente inexistentes.

La Unidad Yesífera Superior equivale (Fig. 3) a las Calizas de Sigena (Mb. Castejón, Fm. Alcubierre) y su equivalente lateral en los Yesos de Retuerta, de Quirantes (1978). Probablemente comprende también la parte superior de las Calizas de Peñalba (Mb. Bujaraloz), aunque la falta de precisión del límite entre estas calizas y las de Sigena impide asegurar esta equivalencia. Equivale también a la parte superior de la Unidad Bujaraloz de Cabrera (1983) y la parte superior de la Unidad Bujaraloz-Sariñena y la base de la Unidad Remolinos-Lanaja

de Costa *et al.* (1991) y Ramírez (1991), así como a los niveles medios y altos de las unidades Retuerta, Bujaraloz y Peñalba de Luzón (1994).

Estructura

El conjunto de materiales terciarios de la zona endorreica presenta una disposición tabular ligeramente inclinada hacia el noroeste. Las capas raramente superan 1 o 2 grados de inclinación, a excepción de algunos buzamientos mayores, de carácter local, relacionados principalmente con fenómenos de colapso por disolución. Esta inclinación no es uniforme en toda la zona endorreica y es el resultado de la superposición de dos efectos estructurales diferentes: por un lado, del suave buzamiento regional de la serie oligo-miocena hacia el oeste que se manifiesta desde el valle del Cinca hasta la zona central aragonesa. Por otro lado, del mayor buzamiento de todo el escarpe meridional de la zona endorreica hacia el norte y noroeste, probablemente debido a un efecto de *valley rebound* producido por la erosión del río Ebro.

En nuestros trabajos de fotointerpretación y cartografía geológica no hemos identificado las "deformaciones de orden menor" (pliegues) que describe Quirantes (1978, figura 36) en diferentes puntos de la zona endorreica.

Otro aspecto estructural destacable es la presencia de numerosas diaclasas y pequeñas fallas con una orientación principal NO-SE. A escala de afloramiento estas fracturas se observan muy verticales y afectan por igual a las diferentes litologías. Cuando atraviesan yesos y calizas estas fracturas suelen mostrar indicios claros de disolución, mientras que en las lutitas suelen estar selladas por crecimientos de yeso fibroso precipitado de las aguas de percolación. Las fallas observadas son siempre normales y de pequeño salto (inferior a 50 cm). Un estudio detallado sobre esta fracturación ha sido expuesto por Arlegui *et al.* (1994).

HIDROGEOLOGÍA

Antecedentes

La investigación hidrogeológica de la zona endorreica ha venido determinada fundamentalmente por su declaración como zona de interés agrícola en 1986. Anteriormente, Cuchí (1978) realiza un primer inventario y recopilación de datos. Desde 1986 hasta la actualidad, los

trabajos referentes a la hidrogeología de la zona son muy numerosos, siendo los principales los siguientes: IRYDA (1986), Berga *et al.* (1987), IPE (1989), Sánchez y Garrido (1989), Sánchez *et al.* (1989), Samper (1989), IRYDA (1989), Martínez *et al.* (1990), García Vera *et al.* (1991), García Vera (1992), Samper *et al.* (1992), Samper y García Vera (1993), Samper *et al.* (1993), Berga (1993), García Vera (1994), García Vera *et al.* (1994), García Vera y Samper (1994, 1995).

Uno de los posibles esquemas de funcionamiento hidrogeológico es el que postula que todos los materiales constituyen un único medio de baja permeabilidad y de gran espesor (Sánchez y Garrido, 1989). Aunque conceptualmente parece atractivo, este esquema no se ha contrastado con datos de campo y, por lo tanto, su idoneidad es cuestionable. Los datos que se aportan en este artículo muestran que este modelo puede ser extremadamente simple en tanto que en la zona de las lagunas se pueden distinguir diferentes unidades hidrogeológicas. Presentan un modelo numérico para la simulación del flujo entre la Sierra de Alcubierre al norte y el río Ebro al sur que atraviesa las principales lagunas de Bujaraloz-Sástago. Según estos autores, el aporte de agua a las lagunas se debe a la descarga de aguas de corto recorrido (zona endorreica) y de flujos más regionales (Sierra de Alcubierre) en un acuitardo de 700 m de potencia.

En IRYDA (1989) se considera la hipótesis de un acuífero multicapa superficial y colgado, denominado "acuífero epicárstico colgado", con salidas y drenaje por evaporación en lagunas o circulación preferencial subte-

rránea a través de niveles yesíferos subyacentes, situado entre las cotas 365 y 300 m. Por último, Berga (1993) considera un "sistema de múltiples niveles saturados de bajo espesor, que se encuentra en las litologías más permeables del terreno (calizas, yesos y margas)".

Los tres estudios antes citados proponen modelos que se sustentan en una geología basada fundamentalmente en los trabajos de Quirantes (1978) y Cabrera (1983).

Datos existentes

En la zona endorreica se diferencian cinco tipos de puntos de agua: 1) 43 pozos excavados a mano, con un diámetro mayor de 1 m y una profundidad inferior a 10 m; 2) 24 piezómetros entre 12 y 18 m de profundidad (Figs. 6 y 7). Se distribuyen principalmente por las hoyas de Benamud, Pozo Agustín y Valdelafuente; 3) Sondeo profundo (sondeo 418 en Figs. 6 y 7), con 120 m de profundidad. Este sondeo es especialmente importante por ser el único en toda la zona endorreica que aporta datos hidrogeológicos profundos; 4) 13 piezómetros cortos de menos de 2 m de profundidad situados en los fondos de depresión, y 5) Complejo lagunar. Se han inventariado un total de 99 depresiones (Balsa *et al.*, 1991).

La profundidad media del nivel piezométrico basada en los 2829 datos tomados desde 1986 hasta 1994 (IRYDA, 1989; Berga, 1993; García Vera, 1994) es de 4.49 m, con una desviación tipo de 2.68 m. La salinidad de las aguas superficiales y subterráneas presenta un rango de variación muy elevado, oscilando entre 1 y 240 g/l. Esta variación se produce espacialmente, dependiendo de la mayor o menor proximidad a los fondos de depresión.

La realización de perfiles de conductividad eléctrica en profundidad (con un conductivímetro-sonda INSTRAN) refleja que en algunos piezómetros existe un aumento brusco de la salinidad en profundidad (Fig. 8). En general, las aguas del tramo superior son coherentes con la evolución química que se presenta en las aguas subterráneas de la zona (aguas sulfatado cálcicas que conforme se van aproximando a las zonas más deprimidas aumentan su salinidad y su carácter clorurado y magnésico sódico). La composición química de las aguas del tramo inferior es mucho más heterogénea tanto en salinidad como en contenido iónico, el tritio es nulo en la mayoría de los casos y el oxígeno-18 y deuterio no indican signos de evaporación importante. Para más detalles sobre las características químicas e isotópicas de las aguas subterráneas de Los Monegros y su relación con el flujo pue-

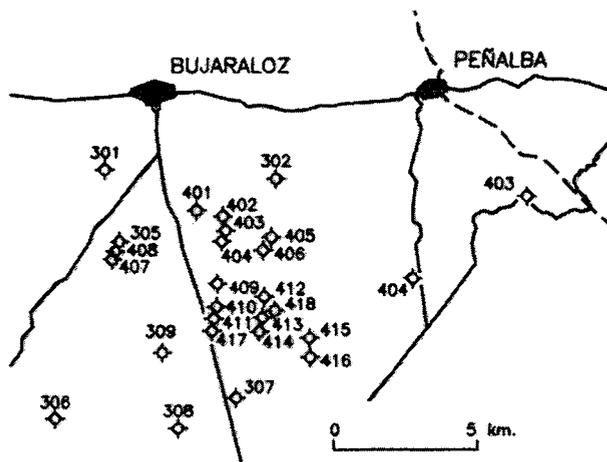


Figura 7.- Mapa de situación de los sondeos hidrogeológicos de la figura 6.

Figure 7.- Location map of the boreholes in figure 6.

de consultarse Samper *et al.* (1993), García Vera (1994) y García Vera y Samper (1995).

Parámetros hidrodinámicos

La permeabilidad se conoce a partir de ensayos de bombeo y de tipo *slug* (IRYDA, 1989; García Vera, 1992; y García Vera, 1994). La permeabilidad oscila entre 10-6 y 10 m/d. Los piezómetros situados a menor cota (fondos de depresión) tienen mayor permeabilidad que los situados a mayor cota (zonas de interfluvio). La correlación entre la permeabilidad y la cota del punto (Fig. 9) resulta incluso más evidente si se ignoran los valores obtenidos con los ensayos *slug* que, en este caso ofrecían menor fiabilidad. La correlación indicada en esta figura sería coherente con la hipótesis de génesis de las depresiones expuestas en Quirantes (1965), Mingarro *et al.* (1981) e IRYDA (1989), según la cual las hoyas se han generado por circulación preferente a través de diaclasas, disolución y posterior colapso. Este colapso puede justificar la mayor permeabilidad observada en los fondos de depresión.

A la variación espacial de la permeabilidad, se añade la variación en la vertical. Este hecho se pone de manifiesto con los ensayos de bombeo con medida de la salinidad del agua bombeada y control de la recuperación del registro de conductividad eléctrica. El caudal aportado por el tramo superior (menos salino) oscila entre el 75 y el 95 % del total bombeado, indicando que su permeabilidad es notablemente mayor que la del nivel inferior.

La elevada oscilación de las permeabilidades medidas es más propia de medios fracturados que de medios porosos. Las lutitas y margas son materiales de baja permeabilidad que cuando se presentan en niveles de potencia importante pueden provocar semiconfinamientos. Las observaciones petrográficas de las calizas indican que presentan una porosidad móldica escasamente interconectada. Los afloramientos de calizas suelen presentar un diaclasado bastante denso, indicando que el flujo ha de discurrir preferentemente a través de estas grietas y fracturas.

Los yesos son bastante puros y compactos. No existen estimaciones de su porosidad aunque es de esperar que sea bastante baja. Los yesos se presentan en nódulos rodeados por una matriz lutítica con un elevado contenido en cristales de yeso. El flujo subterráneo a través de los nódulos de yeso debe producirse a través de: 1) el espacio internodular por medio de la disolución de los yesos contenidos en las lutitas; y 2) de las diaclasas.

Funcionamiento hidrodinámico

El estudio detallado de los registros de conductividad eléctrica en profundidad pone de manifiesto la existencia de tramos inferiores con aguas más salinas, de diferente composición química e isotópica y de menor permeabilidad que los tramos superiores. En la figura 10 se han representado cinco cortes hidrogeológicos de detalle, junto con la cota a la que se producen las variaciones de conductividad eléctrica en profundidad. La variación de salinidad se relaciona directamente con la Unidad Detrítica Superior definida en este trabajo y que también ha sido descrita en otros trabajos anteriores (Ramírez, 1991 y Costa *et al.*, 1991). Esta correlación apunta claramente que la causa de estas variaciones responden a un factor litológico. Otras causas tales como la mezcla con aguas de lluvia en el tramo superior o la estratificación por densidades no presentarían esta correlación y, además, difícilmente presentarían variaciones de salinidad en profundidad tan bruscas y diferencias químicas e isotópicas entre los tramos superior e inferior de cada sondeo como las observadas. De esta manera, parece claro que la Unidad Detrítica Superior juega un papel hidrogeológico semi-confinante. Según este esquema, la elevada salinidad, la menor permeabilidad y las diferencias químicas e isotópicas de las aguas del tramo inferior se deben a que son aguas con un mayor tiempo de residencia en el terreno debido al efecto del confinamiento. La explicación de estas variaciones en profundidad de las aguas subterráneas difícilmente pueden explicarse con un modelo que considere un único medio homogéneo de baja permeabilidad.

La variación de conductividad eléctrica en el piezómetro 410 se relaciona con un nivel lutítico de escasa potencia (0.5 m) situado en el interior de la Unidad Yesífera Intermedia y que, por tanto, no está en relación con la Unidad Detrítica Superior. Posiblemente esta variación de salinidad sea un reflejo de un proceso de semiconfinamiento local de las aguas subterráneas. Esta evidencia da idea de que estos pequeños niveles semiconfinantes pueden provocar alteraciones locales del flujo a pequeña escala, aunque a mayor escala no modifiquen el esquema general de flujo. Dadas las características litológicas de las unidades descritas en la zona endorreica, es más probable que este tipo de semiconfinamientos se presenten en el sector oriental de la Unidad Yesífera Intermedia, donde están principalmente desarrolladas estas intercalaciones lutíticas. En algunos hidrogramas de nivel piezométrico se presenta un retraso en la recarga al acuífero que puede estar relacionado con estos pequeños niveles lutíticos, que en la zona no saturada generan acuíferos colgados.

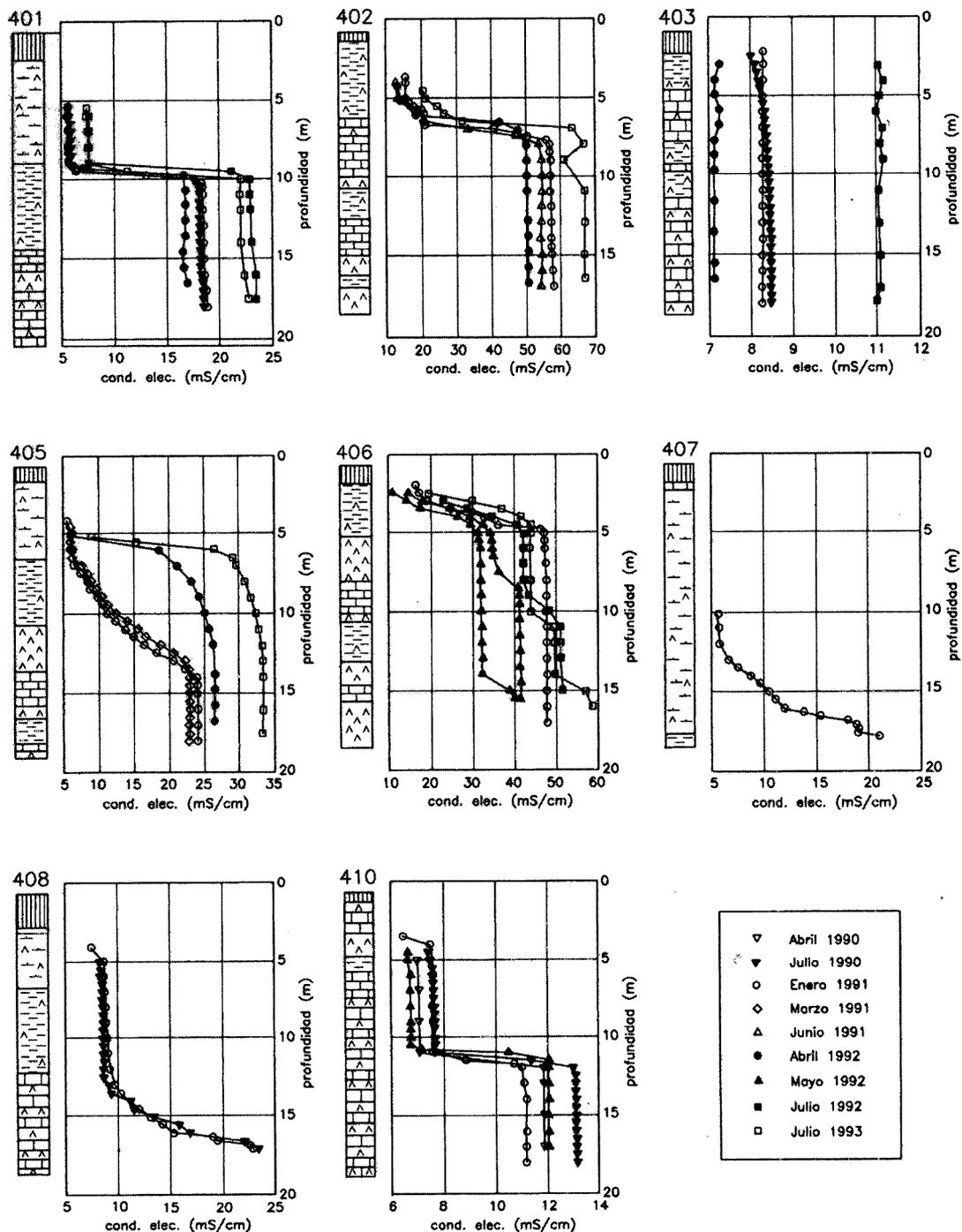


Figura 8.- Registros de conductividad eléctrica representativos en los piezómetros del entorno de la hoya de Benamud y Pozo Agustín (ver figura 7 para la situación de los sondeos y la figura 6 para su correlación).

Figure 8.- Representative electric conductivity records obtained from the hoya de Benamud and Pozo Agustín boreholes (see figure 6 for boreholes location and figure 7 for correlation).

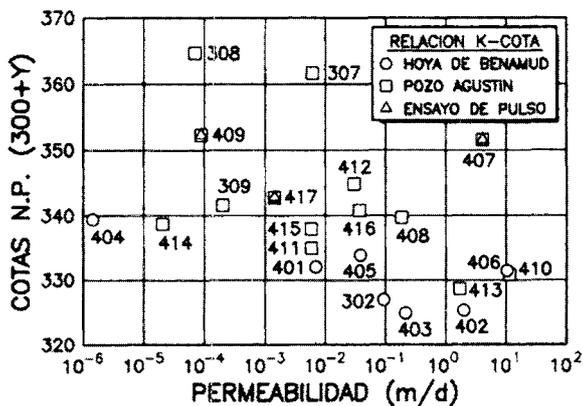


Figura 9.- Relación entre la permeabilidad y la cota del nivel piezométrico.

Figure 9.- Relationship between permeability and altitude of the piezometric level

A partir de la interpretación de las variaciones de salinidad en profundidad se pueden diferenciar dos unidades más permeables a nivel de plataforma endorreica (Figs. 11 y 13). Considerando la baja permeabilidad media de estos materiales, en sentido estricto deberían ser considerados como acuitardos. No obstante, dado el interés creciente por los medios de baja permeabilidad, así como la mayor permeabilidad relativa de estos niveles con respecto a las unidades que los limitan nos ha llevado a definirlos como dos diferentes acuíferos: Acuífero Superior y Acuífero Inferior.

El Acuífero Superior coincide con la Unidad Yesífera Superior. Los límites este, oeste y sur de este acuífero coinciden con la intersección de la base de la unidad con la superficie topográfica. El límite norte está marcado por una serie de vales situados al norte de Bujaraloz entre los que destacan por su mayor longitud Val Cardosa, que se dirige desde Bujaraloz hasta Peñalba, y Val de Gelsa. Su potencia máxima se presenta en el Alto de la Retuerta (65 m).

El Acuífero Inferior coincide con la la Unidad Yesífera Intermedia. La potencia disminuye en dirección noroeste, llegando a presentar en Peñalba 10 m de potencia, y en el sector oeste 40 m. Sus límites este, sur y oeste coinciden con la intersección de la topografía con la base del acuífero. Hacia el norte el acuífero está semiconfinado por la Unidad Detrítica Superior.

El Acuífero Inferior está caracterizado por numerosos pozos y sondeos situados en su parte más superficial. Para definir la base de este acuífero se cuenta únicamente con la información aportada por el sondeo profundo (418).

En este sondeo la salinidad aumenta bruscamente cuando atraviesa la Unidad Detrítica Intermedia. Es de esperar que esta unidad detrítica juegue un papel semiconfinante constituyendo el límite inferior del Acuífero Inferior.

La Unidad Carbonatada Inferior aflora en superficie en el inicio del escarpe de la plataforma en el sector sur y este. En principio, esta unidad podría considerarse como un tercer acuífero, más o menos complejo dado el importante desarrollo de niveles detríticos que incluye. Si bien la escasez de puntos de agua (4 pozos y 4 piezómetros) no permite conocer su funcionamiento hidrogeológico, es posible que éste sea similar al de los acuíferos situados a su techo. Es decir, donde aflora son esperables niveles próximos a la superficie del terreno, y semiconfinamiento debajo de la plataforma endorreica, con materiales poco permeables y aguas muy salinas (como lo pone de manifiesto los datos del sondeo profundo). La única evidencia visible de descarga subterránea a arroyos en la zona endorreica se produce en el arroyo de Valcuerna, en el que se ha estimado una descarga de 5.4 l/s/km (García Vera *et al.*, 1991). Considerando una recarga media anual de 20 mm/año, la descarga subterránea producida en el arroyo de la Valcuerna se puede justificar por la recarga producida exclusivamente en la Unidad Carbonatada Inferior.

La componente principal del flujo en el Acuífero Superior (Fig. 11a) se dirige desde el sudoeste hacia el noroeste. Se puede interpretar como alto piezométrico principal (zonas de recarga) el alto de la Retuerta. El acuífero descarga en las lagunas de la Salineta, Saladar y Salobral (próximas a Bujaraloz) y en los principales barrancos que surcan el acuífero (Valserenosa y Cardosa). Aunque no existen evidencias piezométricas claras, la hoya de Benamud podría funcionar también como zona de descarga.

En el Acuífero Inferior (Fig. 11b) las zonas de recarga están asociadas a una serie de elevaciones situadas en el sector sur. Todos estos altos se alinean en dirección este-oeste separando las líneas de flujo: unas en dirección norte, hacia las lagunas; y otras en dirección sur. En el entorno de las principales lagunas (la Playa y Pozo Agustín) se ve claramente que el flujo subterráneo converge hacia los fondos de las depresiones.

La información piezométrica en el Acuífero Inferior semiconfinado es escasa y de poca calidad, ya que los piezómetros no dan niveles piezométricos puntuales. Por este motivo no es posible trazar las isopiezas en esta zona. No obstante, sí que se han detectado diferentes nive-

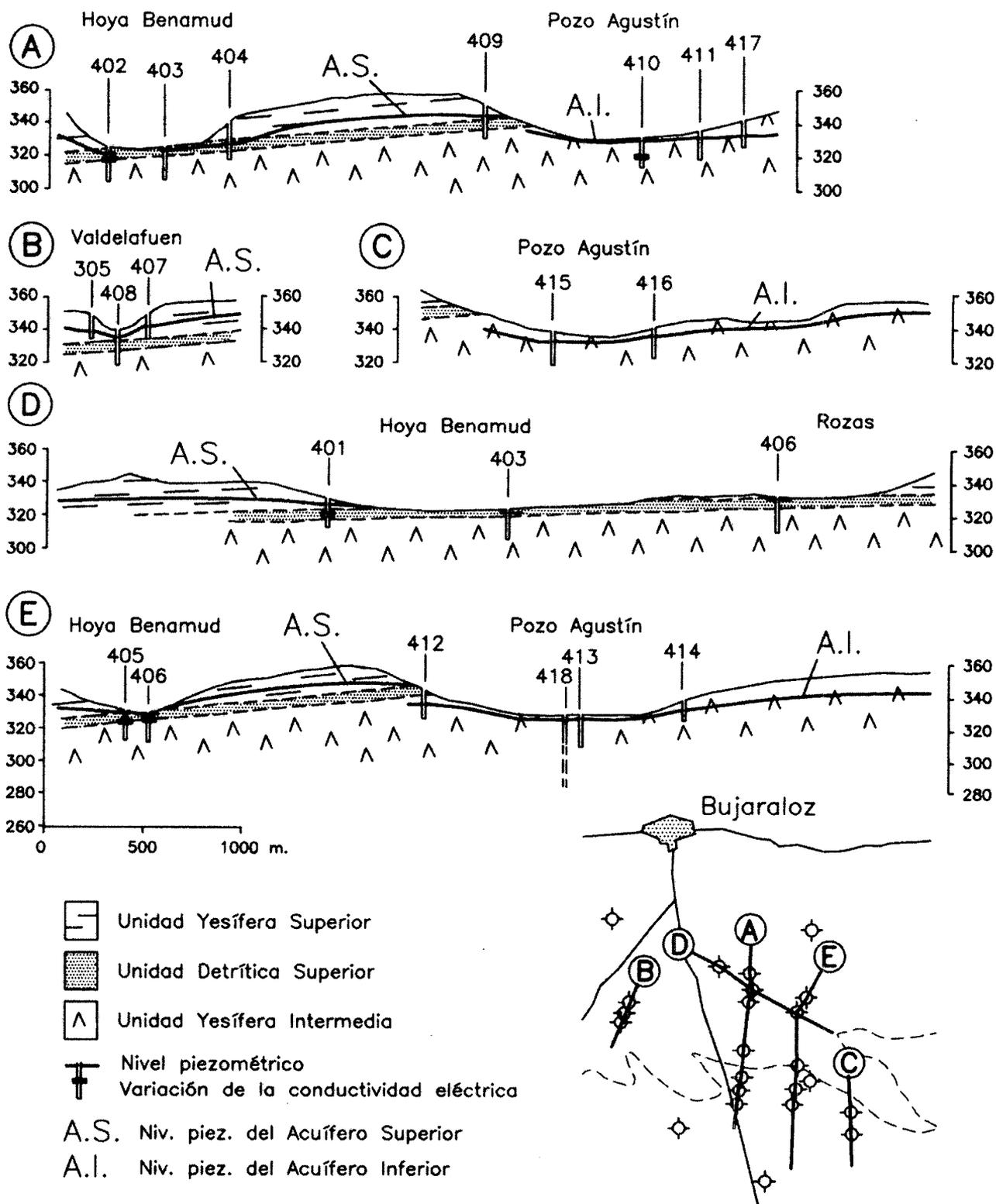


Figura 10.- Perfiles hidrogeológicos en la hoya de Benamud y Pozo Agustín. Topografía obtenida de los mapas E 1:10.000.

Figure 10.- Hydrogeologic cross sections in the hoya de Benamud and Pozo Agustín. Topography obtained from 1:10.000 map.

les piezométricos en ambos acuíferos mediante la medida de flujos ascendentes desde el Acuífero Inferior al Superior en un ensayo de trazador en el piezómetro 403 situado en el fondo de la depresión de Benamud (García Vera, 1994). Este ensayo es una prueba más de que la heterogeneidad a lo largo de la vertical es tal que descarta que la plataforma se comporte como un único acuífero.

El efecto de las variaciones de densidad puede ser importante en la dinámica del flujo. La corrección de los niveles piezométricos medidos por su equivalente de agua dulce (considerando la densidad del agua de cada piezómetro) no altera sustancialmente el esquema de flujo, aunque el gradiente real sea algo menor que el estimado a partir de los mapas de isopiezas de la figura 11. No obstante, el efecto de la concentración por evaporación del agua en los fondos de depresión puede provocar la existencia de una interfaz salina similar a la observada en los acuíferos costeros pero a menor escala. Según este esquema (Fig. 12) el agua subterránea es descargada en la orla exterior de las lagunas. En el fondo de la cubeta este agua es evaporada, dejando una salmuera que debido a su elevada densidad desciende muy lentamente hacia el fondo del acuífero. El equilibrio entre el flujo procedente de la zona de recarga y el lento descenso de la salmuera provoca la formación de la interfaz salina. Esta interfaz puede justificar la existencia de aguas muy salinas por evaporación en puntos de agua próximos a algunas lagunas saladas. La discusión y análisis teórico de este tipo de efectos en las lagunas de Los Monegros ha sido analizada en Samper y García Vera (1993) y en otras zonas endorreicas de Estados Unidos por Duffy y Al-Hassan (1988).

El flujo unitario o velocidad de Darcy considerando una permeabilidad media de 0.01 m/día y el gradiente observado en los mapas de isopiezas de los Acuíferos Superior e Inferior adopta valores en torno a 0.05 m/año. Este valor es coherente con los resultados obtenidos del ensayo de inyección de agua dulce y de la interpretación de los registros de conductividad eléctrica realizados en el sondeo profundo (García Vera, 1994).

El esquema de flujo queda representado en los perfiles hidrogeológicos de la figura 13. El Acuífero Superior y el Acuífero Inferior en el sector sur de la plataforma funcionan como acuíferos libres. El funcionamiento hidrogeológico es en ambos casos muy similar. La recarga se debe a la precipitación. La precipitación media anual es 360 mm. La magnitud de la recarga es muy variable y depende fundamentalmente del espesor del suelo. Esta recarga puede oscilar entre 2 mm/año (1 m de suelo) y 75 mm/año (0.3 m de suelo). Se ha adoptado un valor me-

dio de 20 mm/año considerando el espesor de suelo medio existente en la plataforma.

Las salidas de agua al sistema se producen por los siguientes mecanismos: 1) Evaporación cerca de los fondos de depresión (en franja capilar) y directamente en las lagunas. Los depósitos salinos existentes en el fondo de las depresiones son de escaso espesor y, por tanto, hay que pensar en algún fenómeno evacuador de sales tales como: 1,A) Acción eólica. Existen numerosas evidencias de campo, aunque no existen estudios detallados sobre la importancia de este mecanismo; 1,B) Transporte de sales hacia el fondo del acuífero debido a la existencia de flujos de densidad variable; 2) Hacia los límites exteriores de ambos acuíferos. Actualmente no existen manifestaciones visibles en superficie de descargas en estas zonas (manantiales, rezumes, etc.) aunque los lugareños los han observado en periodos menos secos que los registrados desde 1988. Ello lleva a pensar que, dadas las características semiáridas de la zona, esta descarga es lo suficientemente reducida como para que pueda ser evaporada sin ser advertida y únicamente en periodos de lluvia intensa da lugar a manantiales efímeros; 3) Descarga de agua subterránea en el fondo de algunos barrancos o vales que atraviesan los bordes de la plataforma. La inexistencia de manantiales indica que el agua descargada discurre a través de los depósitos cuaternarios de fondo de val.

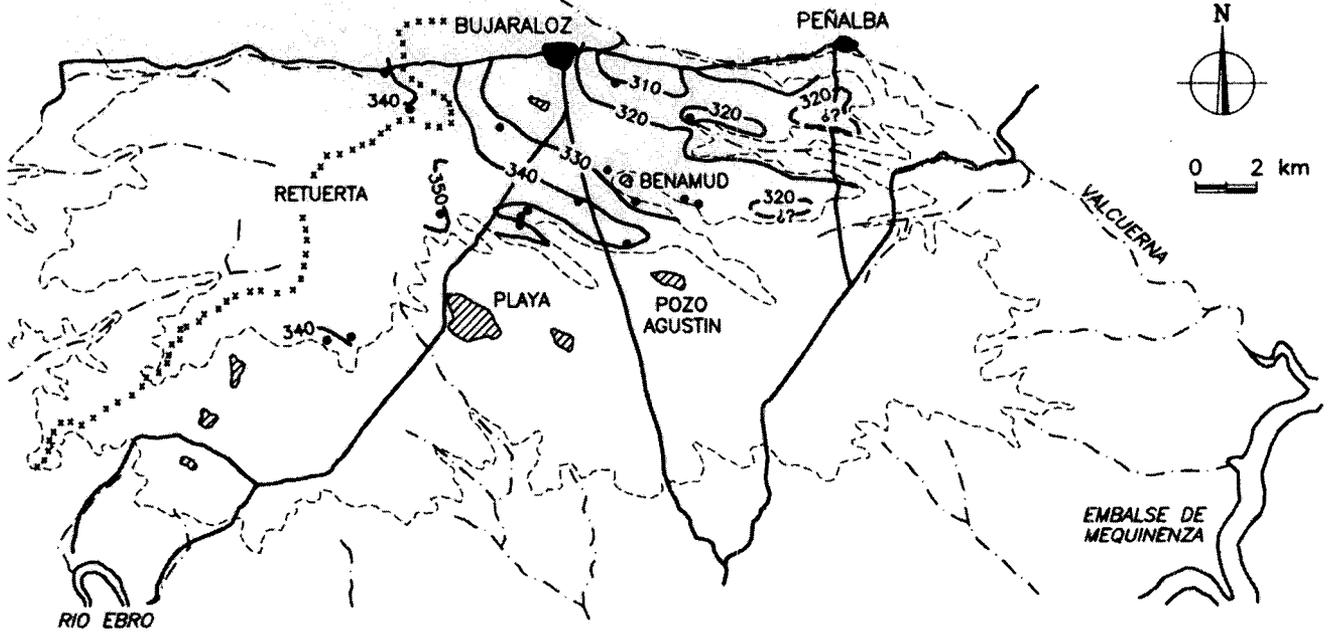
La interpretación de la evolución hidrogeológica junto a la geología ha permitido plantear un modelo de funcionamiento hidrogeológico sustentado en un elevado volumen de datos y que plantea un sistema de dos acuíferos separados por un nivel semiconfinado. Este modelo ha sido contrastado con un modelo numérico (García Vera, 1994) que ha reproducido de forma excelente los niveles piezométricos medidos en los puntos de agua con un esquema coherente de permeabilidades. Este hecho indica que el flujo subterráneo en la zona puede, a pesar de funcionar como un medio fracturado, ser tratado como un medio poroso equivalente.

CONCLUSIONES

Conclusiones sobre la geología

El sustrato terciario de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago está compues por depósitos detríticos, yesíferos y carbonatados, con un espesor total aflorante de 250 m. Los yesos y carbonatos se localizan en tres unidades litoestratigráficas: Unidad Carbonatada Inferior, Unidad Yesífera Intermedia y Unidad Yesífera Superior.

ISOPIEZAS ACUIFERO SUPERIOR



ISOPIEZAS ACUIFERO INFERIOR

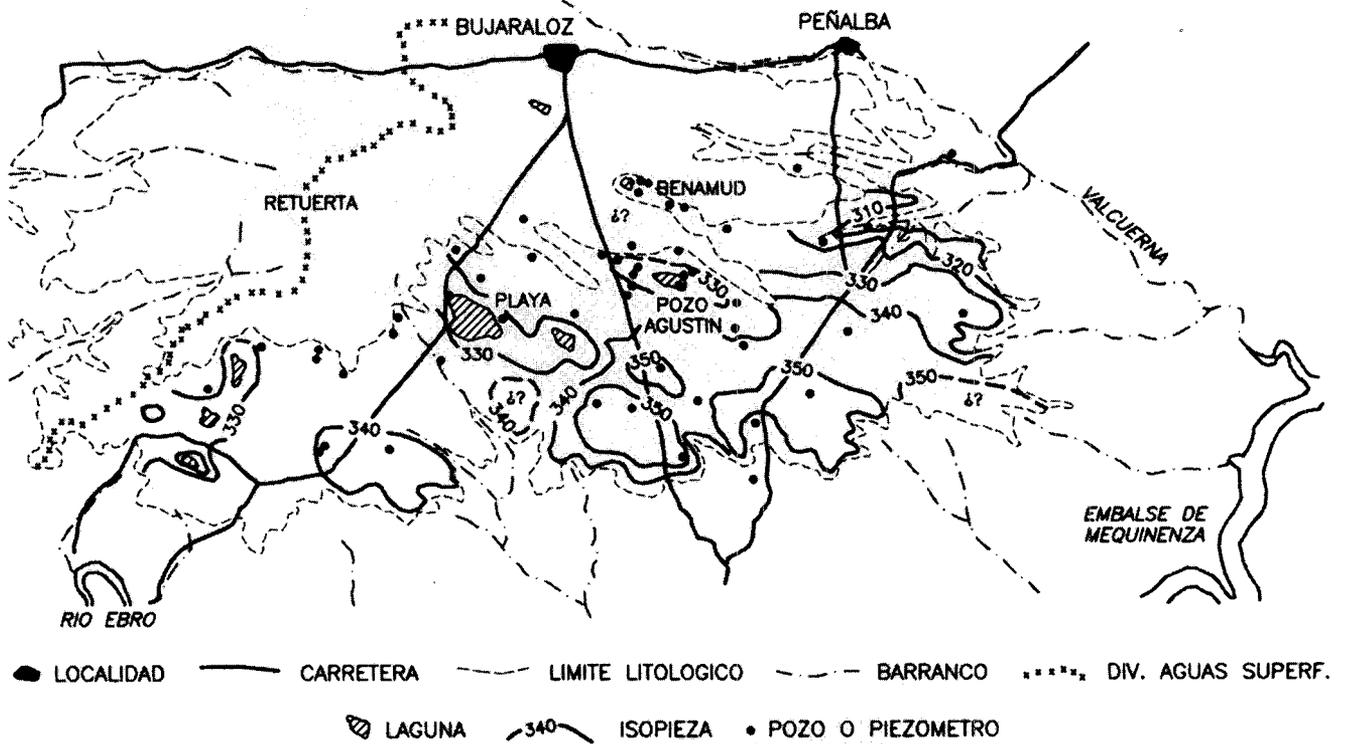


Figura 11.- Mapa de isopiezías (en m) de los acuíferos Superior (A) e Inferior (B) (datos de diciembre de 1992).

Figure 11.- Water table map of the Upper (A) and Lower (B) aquifers.

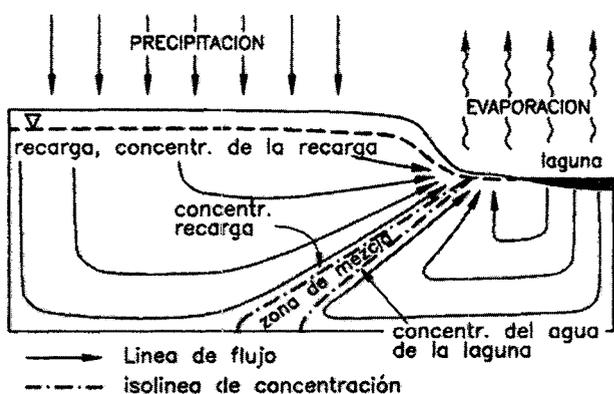


Figura 12.- Posible esquema de funcionamiento del flujo subterráneo con existencia de cuñas salinas en el entorno de las lagunas saladas (según Samper y García Vera, 1993).

Figure 12.- Possible schematic groundwater flow pattern with existence of saline water plumes around the saline lakes (after Samper and García Vera, 1993).

Cada una de estas unidades presenta importantes cambios laterales de facies y de espesor. Estas unidades yesífero-carbonatadas están separadas por otras de detríticas, de espesor y carácter litológico más uniformes, en las que la litología dominante es la lutita roja: Unidad Detrítica Basal, Unidad Detrítica Intermedia y Unidad Detrítica Superior. Dentro de las unidades yesíferas y carbonatadas se reconocen también otros niveles detríticos aunque siempre de menor espesor y extensión local dentro de la zona endorreica.

El endorreísmo de la zona está principalmente condicionado por la estructura tabular de los materiales terciarios, ligeramente basculada hacia el NO y limitada por los relieves montañosos de Retuerta y Sta. Quiteria respectivamente al oeste y norte, así como por el carácter soluble de los yesos y calizas de las unidades yesíferas Intermedia y Superior.

Conclusiones sobre la hidrogeología

La adquisición de nuevos datos hidrogeológicos junto con la realización de una cartografía geológica de detalle de la zona endorreica ha permitido desarrollar un nuevo modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico. En este modelo se definen dos acuíferos.

El Acuífero Superior coincide con la Unidad Yesífera Superior y determina el funcionamiento hidrogeológico

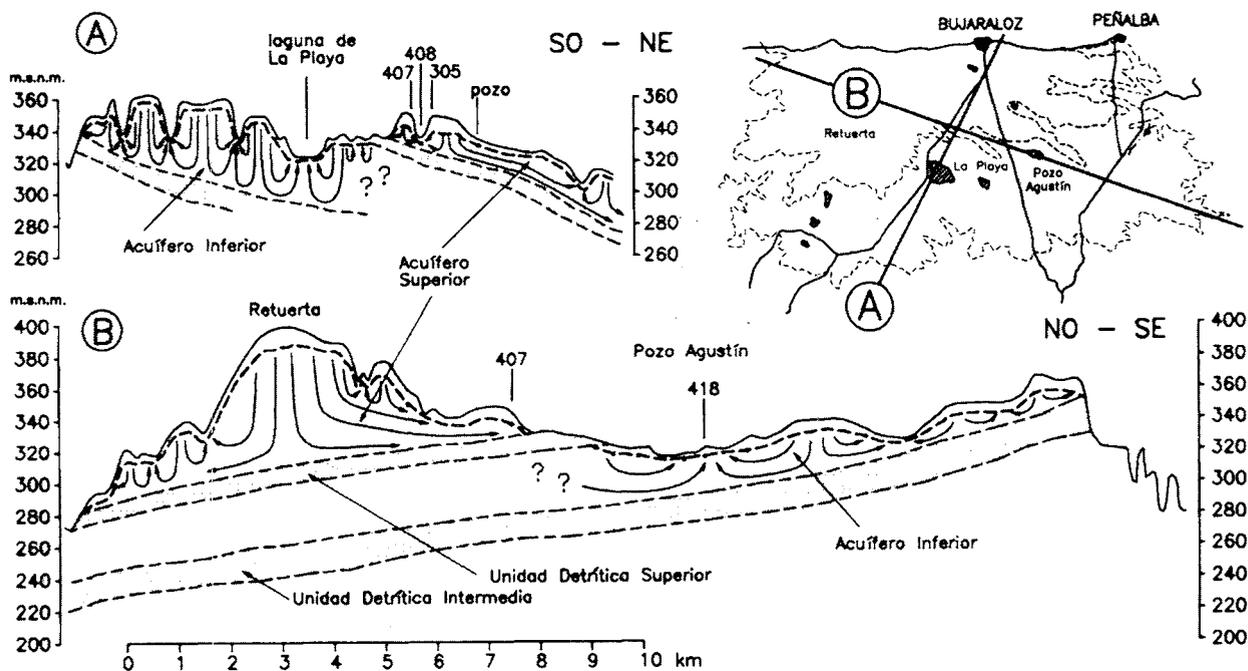


Figura 13.- Cortes hidrogeológicos de los acuíferos Superior e Inferior.

Figure 13.- Hydrogeologic cross sections of the Upper and Lower aquifers.

en la mitad septentrional de la zona endorreica. El acuífero es libre y el flujo se dirige desde el SO hacia el NE. La recarga se produce en las zonas elevadas y la descarga en las lagunas y barrancos próximos a Bujaraloz.

El Acuífero Inferior se desarrolla en la Unidad Yesífera Intermedia. En la mitad norte de la zona endorreica está semiconfinado por la Unidad Detrítica Inferior. En este sector el acuífero presenta una menor permeabilidad y una mayor salinidad de las aguas subterráneas que en el sector sur. En la parte meridional de la zona endorreica el acuífero es libre y el flujo se dirige fundamentalmente hacia las depresiones y lagunas situadas sobre esta zona.

La evaporación del agua subterránea en el entorno de los fondos de las depresiones provoca la formación de una salmuera que por efectos de densidad variable puede dar lugar al desarrollo de cuñas salinas semejantes a las de los acuíferos costeros, aunque de menor escala.

La media geométrica de la permeabilidad es 0.01 m/d, aunque con un rango de variabilidad muy elevado. Estas variaciones de permeabilidad son características de medios fracturados. Considerando las características litológicas de la zona cabe pensar que el agua subterránea discurre principalmente a través de las diaclasas y fracturas presentes en los yesos y calizas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por un proyecto CICYT (AGR89-0146-C02) coordinado entre el Servicio de Investigación Agraria (SIA) de la Diputación General de Aragón (R. Aragüés, investigador principal) y el Departament d'Enginyeria del Terreny (DIT) de la Universitat Politècnica de Catalunya (J. Samper, investigador principal). El segundo autor contó con una beca predoctoral del Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya. Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos los integrantes del grupo del SIA que colaboraron en el citado proyecto (R. Aragüés, L. Quílez, L. Naval, A. Coob, A. Berga y J.C. Faci), a las personas del DIT que aportaron sus sugerencias (E. Custodio y M. Manzano) y a C. Ayora del Institut Jaume Almera del CSIC de Barcelona. Los sondeos hidrogeológicos, esenciales para la definición de los aspectos tanto geológicos como hidrogeológicos, fueron realizados por TRAGSA y financiados por IRYDA. Los autores desean también agradecer a A. Robador, del ITGE, la posibilidad de haber podido disponer de los mapas geológicos de Gelsa y Bujaraloz aún sin editar, así como a Arantza Luzón, Angel González Rodríguez y José Angel Sánchez Navarro, del Departamento de Geología de la Universidad de Zaragoza, la revisión crítica del artículo.

BIBLIOGRAFÍA

ARLEGUI, C.E.; SIMÓN, J.L. y SORIANO, M.A., 1994: Un sistema regional de fracturas NW-SE en el centro de la Cuenca del Ebro. *Resúmenes del 2º Congreso del Grupo Español del Terciario*, Jaca: 39-42.

ADARO, 1975: *Estudio sectorial de yeso, zona Duero-Ebro*, 2 vols.: 1-357 (informe inédito).

BALSA, J.; GUERRERO, M.C.; PASCUAL, M.L. y MONTES, C., 1991: El núcleo endorreico de Bujaraloz-Sástago. *Empelte*, 7: 4-19.

BERGA, A., 1993: *Relaciones clima-agua-suelo-subsuelo en Monegros II*. Tesis Doctoral, Universidad de Lleida: 1-391.

BERGA, A.; ARAGÜES, R. y NAVAL, L., 1987: Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de la zona regable de Monegros II. *VII Conferencia Nacional sobre Hidrología General y Aplicada*, Zaragoza: 55-65.

CABRERA, L.I., 1983: *Estratigrafía y sedimentología de las formaciones lacustres del tránsito Oligoceno-Mioceno del SE de la Cuenca del Ebro*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona: 1-443.

COSTA, J.M., SOLÀ, J. y OLIVÉ, A., 1991: Mapa Geológico Nacional (MAGNA). Escala 1:50.000, nº 414, Bujaraloz. Serv. Publ. Ministerio de Industria, Madrid (en edición).

CUCHI, J.A., 1978: Aportaciones al conocimiento de los suelos salinos de Aragón. *Publ. Inst. Fernando el Católico CSIC*, Diput. Prov. Zaragoza:

DUFFY, C.J. y AL-HASSAN, S., 1988: Groundwater circulation in a closed basin topographic scaling and climatic forcing. *Water Resources Research*, 24 (10), 1675-1688.

GARCÍA VERA, M.A., 1992: *Hidrogeología de la zona endorreica del Sur de Bujaraloz*. Tesina del Master en Hidrología Subterránea, Universidad Politècnica de Cataluña: 1-101.

GARCÍA VERA, M.A., 1994: *Hidrogeología de zonas endorreicas en climas semiáridos: aplicación a Los Monegros (Zaragoza)*. Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de Cataluña: 1-347.

GARCÍA VERA, M.A.; SAMPER, J. y PONCELA, R., 1991: Estimación mediante balance de masas de la descarga subterránea en zonas salinas: Aplicación al Arroyo de La Valcuerna (Huesca). *Hidrogeología*, 7: 31-51.

GARCÍA VERA, M.A.; SAMPER, F.J.; CUSTODIO, E. y BAYÓ, A., 1994: Hidrogeología de la zona endorreica del sur de Bujaraloz. *Jornadas de las saladas de Los Monegros y del Bajo Aragón, Caspe*: 27-37.

GARCÍA VERA, M.A. y SAMPER, J., 1994: Aspectos hidrológicos y efectos medioambientales del regadío en la zona endorreica de los Monegros. *TIASA ed., Agua y Medio Ambiente*: 65-74.

GARCÍA VERA, M.A. y SAMPER, F., 1995: Análisis hidrogeoquímico de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago (Zaragoza). *VI Congreso de Geoquímica de España*: 7001-7010.

IPE, 1989: *Evaluación preliminar del Impacto Ambiental de los regadíos en el Polígono de Riegos Monegros II*. MOPU, Jaca, 2 Vols.: 1-600 (informe inédito)

IRYDA, 1986: *Estudio Previo Geohidrológico de la zona regable de Monegros II*: 1-21 (informe inédito).

IRYDA, 1989: *Estudio geohidrológico de los sectores VIII, IX y X de la zona regable de Monegros II (Zaragoza y Huesca)*. Madrid: 1-176 (informe inédito).

LUZÓN, A., 1994: *Los materiales del tránsito Oligoceno-Mioceno del sector centro-oriental de la Depresión del Ebro: análisis estratigráfico e interpretación evolutiva*. Tesis de licenciatura, Universidad de Zaragoza: 1-259

MARTÍNEZ, J., SANCHEZ, J.A., SAN ROMÁN, J. y DE MIGUEL, J., 1990: *Delimitación de zonas de interés ecológico-paisajístico en la zona regable de Bujaraloz: estudio de viabilidad hidrológica (informe inédito)*.

MÍNGARRO, F.; ORDÓÑEZ S.; LOPEZ DE AZCONA, M.C. y GARCÍA DEL CURA, M.A., 1981: Sedimentoquímica de las lagunas de los Monegros y su entorno geológico. *Boletín Geológico Minero*, 92-3: 171-195.

- PUEYO, J.J., 1978-79: La precipitación evaporítica actual en las lagunas saladas del área Bujaraloz-Sástago, Caspe, Alcañiz y Calanda. *Rev. del Inst. de Invest. Geológicas*, 33: 5-56.
- PUEYO, J.J. e INGLÉS, M., 1987a: Substrate mineralogy, pore brine composition, and diagenetic processes in the playa lakes of Los Monegros and Bajo Aragón, Spain. In: R. Rodríguez Clemente y Y. Tardy eds. *Geochemistry and mineral formation in the Earth surface*. CSIC, Granada: 351-372.
- PUEYO, J.J. e INGLÉS, M., 1987b: Magnesite formation in recent Playa Lakes, Los Monegros, Spain. In: J.D. Marshall ed. *Diagenesis of Sedimentology Sequences. Geological Society Special Publication*, 36: 119-122.
- QUIRANTES, J., 1965: Nota sobre las lagunas de Bujaraloz-Sástago, *Geographica*, 12: 30-34.
- QUIRANTES, J., 1978: Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros. *Publ. Inst. Fernando el Católico CSIC*, Diput. Prov. Zaragoza: 1-200.
- RIBA, O., REGUANT, S. y VILLENA, J., 1983: Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. In *Geología de España, Libro Jubilar J.M. Ríos*, t.2, Publ. IGME: 131-159.
- RAMÍREZ, J.I., 1991: Mapa Geológico Nacional (MAGNA). Escala 1:50.000, nº 413, Gelsa, Serv. Publ. Ministerio de Industria (en edición).
- SAMPER, F.J., 1989: *Análisis de impacto ambiental de la transformación en regadío de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago*. DGA, Zaragoza: 1-79 (informe inédito).
- SAMPER, J.; CUSTODIO, E.; BAYÓ, A., BADIELLA, A., PONCELA, R., MANZANO, M. y GARCÍA VERA, M.A., 1992: Estudio geohidrológico y análisis preliminar del impacto ambiental en los sectores VIII, IX y XI de la zona regable de Monegros II. *V Simposio de Hidrogeología, Alicante*: 215-228.
- SAMPER, J. y GARCÍA VERA, M.A., 1993: A groundwater salinity model for the closed-basin area of Los Monegros, Spain. In CIMNE ed., *Proceedings 12th Saltwater Intrusion Meeting*, Barcelona: 99-117.
- SAMPER, F.J.; CUSTODIO, E. y GARCÍA VERA, M.A., 1993: Preliminary isotopic study of groundwater salinity variations in the closed-basin semiarid area of Los Monegros, Spain. *Proceedings of Int. Symp. on Applications of Isotope Techniques in Studying Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere* (IAEA-SM-329/O), Viena: 213-230.
- SÁNCHEZ NAVARRO, J.A.; MARTÍNEZ GIL, F.J.; DE MIGUEL CABEZA, J.L. y SAN ROMÁN, J., 1989: Hidrogeoquímica de la zona endorreica de las lagunas de Monegros, provincia de Zaragoza y Huesca. *Bol. Geol. y Min.*, 100-5: 160-169.
- SÁNCHEZ NAVARRO, J.A. y GARRIDO SCHNEIDER, 1989: Impacto hidrológico e hidroquímico de los futuros regadíos de Monegros II en los sectores pertenecientes a la provincia de Huesca: una aportación de datos básicos. *Instituto de Estudios Altoaragoneses. Serie de Investigación Científica*, número 25.
- SÁNCHEZ NAVARRO, J.A.; F.J. MARTÍNEZ GIL, J.L.; DE MIGUEL CABEZA y SAN ROMÁN, J., 1989: Hidroquímica de la zona endorreica de las lagunas de Monegros, provincias de Zaragoza y Huesca, *Bol. Geol. y Min.*, 100-5: 876-885.