

Caracterización de formaciones de baja permeabilidad mediante ensayos hidráulicos: aplicación a dos sondeos de reconocimiento situados respectivamente al Sur y Este de las cortas mineras de Aznalcóllar y Los Frailes en la mina de Boliden-Apirsa, S.L. (Aznalcóllar, Sevilla)

M. Mejías Moreno⁽¹⁾, J. A. López Geta⁽¹⁾, D. Segura Pachón⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España.
E-mail: m.mejias@igme.es

(2) Boliden-Apirsa, S.L., Carretera de Gerena, s/n., 41870 Aznalcóllar, Sevilla, España.

RESUMEN

La rotura del muro de contención de la balsa de decantación de estériles de la explotación minera de Boliden-Apirsa, S.L. en Aznalcóllar (Sevilla), ocurrida en la madrugada del día 25 de abril de 1998, ocasionó el vertido al río Guadiamar de más de 6 hm³ de lodos y aguas ácidas con una alta concentración de metales en disolución. La explotación minera contaba en ese momento con dos cortas, la de Aznalcóllar, inactiva desde diciembre de 1996, y Los Frailes, en explotación.

Tras el accidente, la corta de Aznalcóllar se ha utilizado para almacenar los lodos y suelos contaminados recogidos durante las labores de limpieza establecidas en los cauces de los ríos Agrío y Guadiamar, así como para el vertido de estériles, fangos de depuradora y agua procedente de las labores de explotación en la corta de Los Frailes.

La presencia de materiales paleozoicos circundantes a las cortas, que puedan actuar como barrera geológica natural al paso de flujo de agua, impidiendo el posible transporte de contaminantes hacia las formaciones más permeables, obliga a prestar una especial consideración a su caracterización hidrogeológica. Las formaciones más permeables están constituidas por conglomerados, arenas y calizas, correspondientes al Mioceno transgresivo de base, discordantes sobre el paleozoico, y constituyen la Unidad Hidrogeológica 05.49 (Niebla-Posadas).

Se presenta un breve resumen de la geología de los materiales paleozoicos, la descripción de los sondeos de reconocimiento ensayados, la metodología de caracterización hidráulica y el análisis e interpretación de los ensayos realizados, de los que se han obtenido los valores de conductividad hidráulica que, para el sondeo FRF-243, oscilan entre $9,7 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ y $1,01 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$, mientras que para el sondeo FRF-244 se sitúan entre $1,38 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ y $5,03 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, excepto para la sección de ensayo comprendida entre 88 y 125 m de profundidad que tiene un valor más bajo de conductividad hidráulica.

Palabras clave: Aznalcóllar, baja permeabilidad, caracterización hidráulica, contaminación minera, Paleozoico

Characterization of low permeability rocks by hydraulic tests: application in two investigation boreholes located respectively to South and East of the Aznalcóllar and Los Frailes open pits in the Boliden-Apirsa, S.L. mine (Aznalcóllar, Sevilla)

ABSTRACT

The failure of the Aznalcóllar mine settling pond of the mining exploitation of Boliden-Apirsa, S.L. in Aznalcóllar (Seville), happened in the early hours of April 25th 1998, caused the spillage, to the Guadiamar river, of more than 6 hm³ of sludge and acid water with a high concentration of dissolved heavy metals. The mining exploitation had in that moment two open pits: Aznalcóllar, inactive since December of 1996 and Los Frailes, in exploitation.

After the accident, the Aznalcóllar open pit has been used to store the mud and polluted soils collected during the established works of cleaning in the Agrío and Guadiamar rivers, as well as spilling place of mining rock waste, mining mud and mine water from the works of exploitation in Los Frailes open pit.

The presence of paleozoic materials surrounding to the open pits, that can act as natural geologic barrier to the flow of water, avoiding

the possible transport of pollutants toward the permeable formations, it forces to lend a special consideration to the hydrogeological characterisation. These permeable levels are constituted by conglomerates, sands and limestones, corresponding to the transgressive Miocene, discordant on the Paleozoic, and they constitute the Hydrogeological Unit 05.49 (Niebla-Posadas).

It is shown a summary of the geology of the paleozoic materials, the description of investigation boreholes, the methodology of hydraulic characterisation and the analysis and interpretation of the test carried out. They are obtained the values of the hydraulic conductivity that, for the borehole FRF-243, fluctuate between $9,7 \cdot 10^{10} \text{ m s}^{-1}$ and $1,01 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$. In the case of the borehole FRF-244 the hydraulic conductivity interval fluctuates between $1,38 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$ and $5,03 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$, except the test section between 88 and 125 m of depth that presents a lower hydraulic conductivity value.

Key words: Aznalcóllar, hydraulic characterisation, low permeability, Paleozoic, pollution mining

Introducción y motivación de los trabajos desarrollados

La rotura accidental y deslizamiento de parte del muro de contención de la balsa de decantación de estériles mineros de la explotación minera de sulfuros polimetálicos de Boliden-Apirsa, S.L. en Aznalcóllar (Sevilla) produjo el vertido de aproximadamente 6 hm³ de aguas ácidas y lodos al río Agrio y desde éste al río Guadiamar, afectando a 62 km de cauce desde la balsa hasta el límite Norte del Parque Nacional de Doñana (Arenas *et al.*, 2001).

Cuando se produjo el accidente la explotación minera contaba con dos cortas, Aznalcóllar y Los Frailes. La primera se encontraba inactiva desde el año 1996, habiéndose iniciado su actividad en 1975, se excavó hasta una profundidad de 275 m respecto del nivel inicial del terreno, y se estaba comenzando, por su parte Este, el relleno con estériles procedentes de las labores de preparación de la segunda corta. La corta Los Frailes comenzó a excavar en 1996, teniendo previsto una profundidad máxima de 300-350 m respecto del nivel del suelo al finalizar la explotación (Golder Associates-Aurensa, 1998).

Tras el accidente, la corta Aznalcóllar se ha utilizado para almacenar los lodos y suelos contaminados recogidos durante las labores de limpieza establecidas en los cauces de los ríos Agrio y Guadiamar, así como para lugar de vertido de estériles, fangos de depuradora y agua procedente de las labores de explotación en la corta Los Frailes.

La retirada de los lodos se realizó por tramos y fue llevada a cabo por Boliden-Apirsa, S.L., la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y la Consejería de Agricultura y Pesca (CAP) de la Junta de Andalucía. Comenzó a primeros de mayo de 1998 y pudo darse por concluida el 31 de diciembre de 1998; posteriormente se consideró necesario realizar una segunda fase de limpieza en la zona afectada para eliminar la contaminación remanente. El volumen de lodos y suelos contaminados en la primera fase fue de unos 7 hm³ y en la segunda de 0,82 hm³ (Arenas *et al.*, 2001).

El material retirado fue vertido en la corta Aznalcóllar, donde ya se encontraba una importante acumulación de estériles.

Una vez paliadas las incertidumbres generadas por el accidente, la continuidad de la actividad minera precisaba ubicar los estériles mineros en un depósito que cubriera los siguientes objetivos: almacenamiento que evite el paso de agua al medio hídrico circundante, cercanía a las instalaciones mineras que permita que la actividad extractiva fuese económicamente rentable, y capacidad de almacenamiento suficiente durante la vida útil de la mina (Navarro *et al.*, 2001).

Por tanto, actualmente la corta de Aznalcóllar almacena los lodos y suelos contaminados procedentes de las labores de limpieza realizadas tras el accidente minero, estériles, lodos del concentrador, fangos de depuradora y agua procedente de la escorrentía de las escombreras circundantes.

Los materiales paleozoicos sobre los que se sitúan las cortas se encuentran en contacto con otras formaciones más permeables que constituyen la Unidad Hidrogeológica 05.49, Niebla-Posadas (IGME, 2000). Esta Unidad está formada, en sus niveles permeables, por conglomerados, arenas y calizas correspondientes al Mioceno transgresivo de base. Su potencia varía entre 10 y 20 m, hasta acuñarse o desaparecer lateralmente y en profundidad hacia el Sur, con pendientes suaves del 2 al 6% (Borja *et al.*, 2001). A techo del acuífero se sitúa concordante la formación denominada Margas Azules, que da un marcado carácter confinado a buena parte del acuífero.

En régimen natural el acuífero era confinado al sur de los afloramientos, con un potencial hidráulico, en líneas generales, mayor que el de los materiales paleozoicos (Golder Associates-Aurensa, 1998). El aprovechamiento del acuífero, tanto como fuente permanente de agua o como recurso de emergencia, ha producido importantes descensos piezométricos que podrían provocar significativas modificaciones en la relación entre los potenciales hidráulicos de las distintas formaciones y la posible contaminación a partir de la infiltración de agua almacenada en las cortas

y las escombreras a los materiales paleozoicos (figura 1). Dependerá básicamente del comportamiento hidrodinámico de las rocas paleozoicas. La existencia de un nivel de pizarras negras, consideradas de baja permeabilidad, con continuidad geológica, y situado al sur de ambas cortas, al mantener el nivel piezométrico más alto que las formaciones situadas al norte y sur de las mismas, podría actuar como barrera geológica que impida el flujo de agua desde las cortas hacia el entorno.

El Paleozoico en el entorno de las cortas mineras

La mina de Aznalcóllar está situada en el extremo oriental de la Faja Pirítica Ibérica, sobre formaciones

predominantemente paleozoicas, fuertemente deformadas.

A grandes rasgos estos materiales paleozoicos estarían constituidos (IGME, 1982) por una secuencia preorogénica denominada grupo Filítico Cuarcítico (Grupo PQ) de edad Fameniense, con alternancia de pizarras e intercalaciones de areniscas, y más minoritariamente de cuarcitas y calizas, sobre el que se apoyan dos secuencias sinorogénicas, denominadas Complejo Vulcano-Sedimentario (CVS) de edad Viseense medio, y una serie turbidítica, denominada Grupo Culm, de edad Viseense medio-Superior; esta última no tiene representación en la zona de Aznalcóllar.

Estas megasecuencias han sufrido una importante deformación durante la Orogenia Hercínica, y proba-

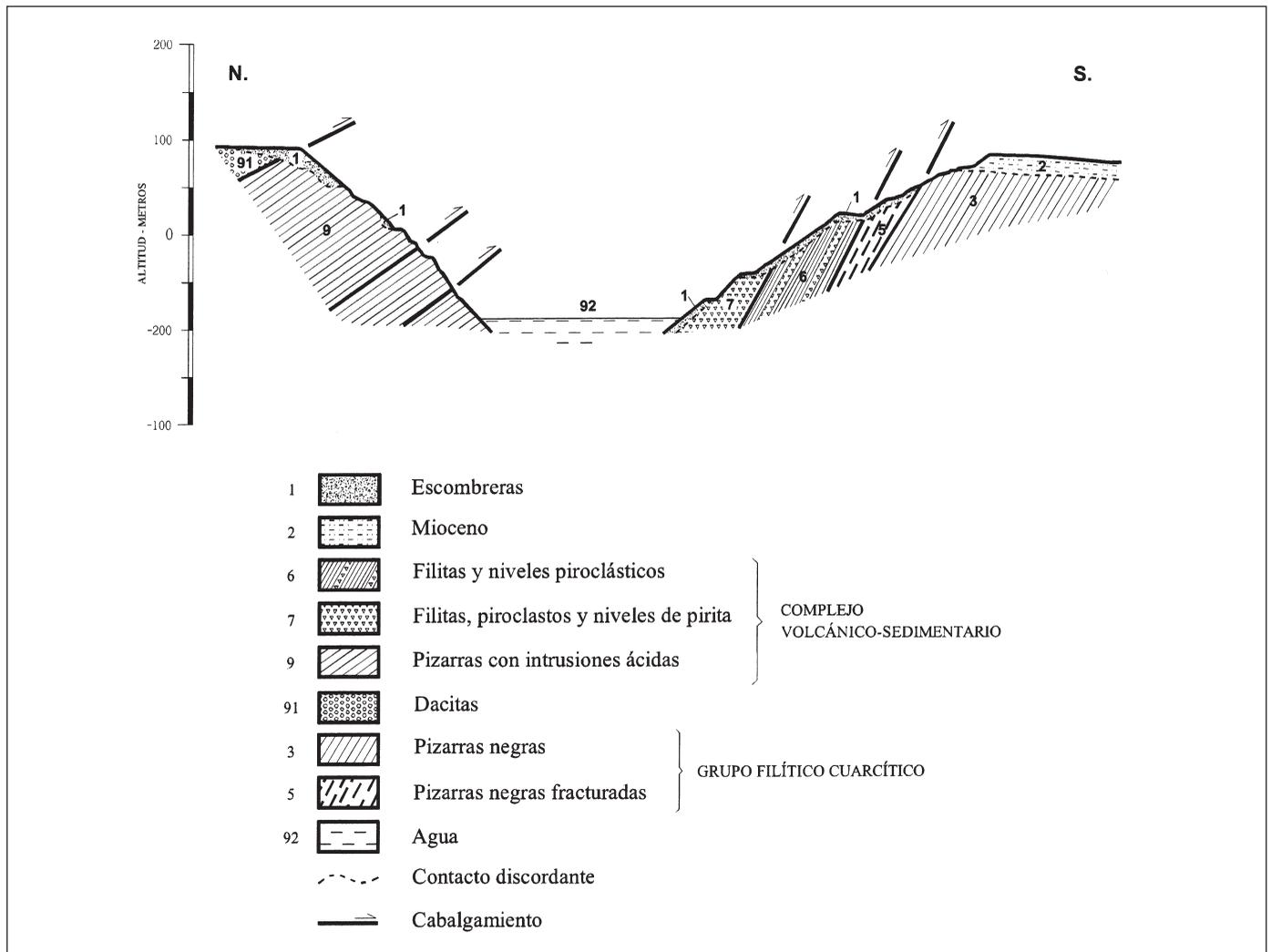


Fig. 1. Corte esquemático N-S en el entorno de la corta de Aznalcóllar (modificado de Boliden-Apirsa, 1997)
 Fig. 1. N-S cross section in the area of Aznalcóllar open pit (modified of Boliden-Apirsa, 1997)

blemente durante la Alpina, dando lugar a una complicada tectónica de pliegues y mantos con repeticiones tectónicas.

Encima del grupo PQ, y como tránsito al CVS, se depositó un nivel de pizarras negras que marca el techo del Devónico, con niveles poco potentes de piroclastos y de calizas. Su potencia es variable pero superior a los 300 m, y constituye la formación que podría ser considerada como barrera geológica natural entre las cortas y los materiales miocenos al sur de éstas.

Cabe resaltar que en las pizarras negras pueden observarse bandas de deformación en las que se reconoce la existencia de fallas inversas y/o cabalgamientos de alto ángulo de buzamiento (50° - 70°), con dirección N 100 - 110° E. Así mismo, se observan fallas normales de dirección NNW-SSE y buzamiento 70° que afecta a los materiales miocenos y producen una estructuración en bloques (horst y graben), al menos en el entorno de la corta.

El Complejo Volcano Sedimentario está constituido por una serie de formaciones de diferente litología entre las que figuran la piritita masiva, brechas riolíticas, riolitas masivas, pizarras negras y violáceas con intrusiones ácidas y rocas intrusivas (dacitas).

Características hidrogeológicas de los materiales paleozoicos

Los materiales paleozoicos descritos en la zona se han considerado en general como formaciones geológicas de baja permeabilidad. Sin embargo los estudios realizados recientemente ponen de manifiesto la existencia en estos materiales de discontinuidades que pueden actuar como zonas preferentes de flujo. Así, las riolitas y calizas existentes en la zona pueden llegar a considerarse como rocas entre poco permeables y algo permeables. Resulta de especial interés la obtención de los parámetros hidráulicos en la banda de pizarras negras al ser consideradas como barrera impermeable entre las cortas y los materiales miocenos al sur de las mismas.

La primera caracterización hidráulica de estos materiales fue realizada por Golder Associates-Aurensa (1998), obteniéndose los valores de conductividad hidráulica mediante la realización de ensayos de baja permeabilidad en secciones aisladas mediante un dispositivo de doble obturador en tres sondeos de reconocimiento, dos de ellos situados al Sur de la corta Aznalcóllar (A-237 y A-239) y otro situado entre ésta y la corta Los Frailes (FRF-98).

En el sondeo A-237 (Gómez de las Heras *et al.*, 2001), de 288,05 m de profundidad y situado a una

cota de 90,78 m sobre el nivel del mar, el rango de valores de la conductividad hidráulica se sitúa entre $9 \cdot 10^{-9}$ y $6 \cdot 10^{-6}$ m s⁻¹. Se observa una disminución progresiva de la permeabilidad desde la superficie hasta 50 m bajo el nivel del mar, donde aparecen tramos cuya litología se corresponde con la presencia de pizarras negras. Más hacia abajo, en los niveles de alternancias de pizarras y calizas se observa un aumento de la permeabilidad hasta valores de $6 \cdot 10^{-6}$ m s⁻¹.

En el sondeo A-239, de 274,7 m de profundidad, los valores de conductividad hidráulica oscilan entre $6 \cdot 10^{-9}$ y $6 \cdot 10^{-8}$ m s⁻¹. La mayor uniformidad de los valores de permeabilidad con respecto al sondeo A-237 parece corresponder con la menor variabilidad litológica de los materiales atravesados, constituidos básicamente por pizarras negras con zonas de alternancia de éstas con niveles de caliza bioclástica.

En el sondeo FRF-98, de 508,9 m de profundidad, se han realizado ensayos hidráulicos a partir de 194,6 m de profundidad. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos varían entre $2 \cdot 10^{-8}$ y $1 \cdot 10^{-5}$ m s⁻¹. En los ensayos llevados a cabo en el paquete constituido por riolitas masivas se observan los valores más altos de permeabilidad, del orden de 10^{-5} m s⁻¹.

Dada la importancia de que las pizarras negras actúen como barrera impermeable entre las cortas y el acuífero mioceno, se realizó por parte del IGME, a petición de Boliden-Apirsa, S. L., entre finales de 2000 y los primeros meses de 2001, la caracterización hidráulica de dos nuevos sondeos de reconocimiento cuyas características y resultados se exponen en este artículo.

Descripción de los sondeos de reconocimiento

Con el objetivo de obtener los parámetros hidráulicos de las formaciones atravesadas, para su introducción en el modelo matemático de flujo sobre la hidrogeología del entorno de las cortas desarrollado por Boliden-Apirsa, S.L. (Aurensa, 2001), se perforaron dos nuevos sondeos de reconocimiento, con una profundidad de 300 m cada uno, denominados FRF-243 y FRF-244, situados respectivamente al sur y este de la corta minera Los Frailes (Figura 2).

Litológicamente el sondeo FRF-243 atraviesa predominantemente pizarras negras limolíticas en las que se intercalan niveles volcánicos de lavas ácidas y, a fondo de sondeo, niveles de calizas bioclásticas (figura 3). Aparecen algunos tramos intensamente fracturados, sobre todo en el tercio más profundo del sondeo, con presencia de cuarzo y calcita y en algunas ocasiones con la aparición de óxidos. En el tramo

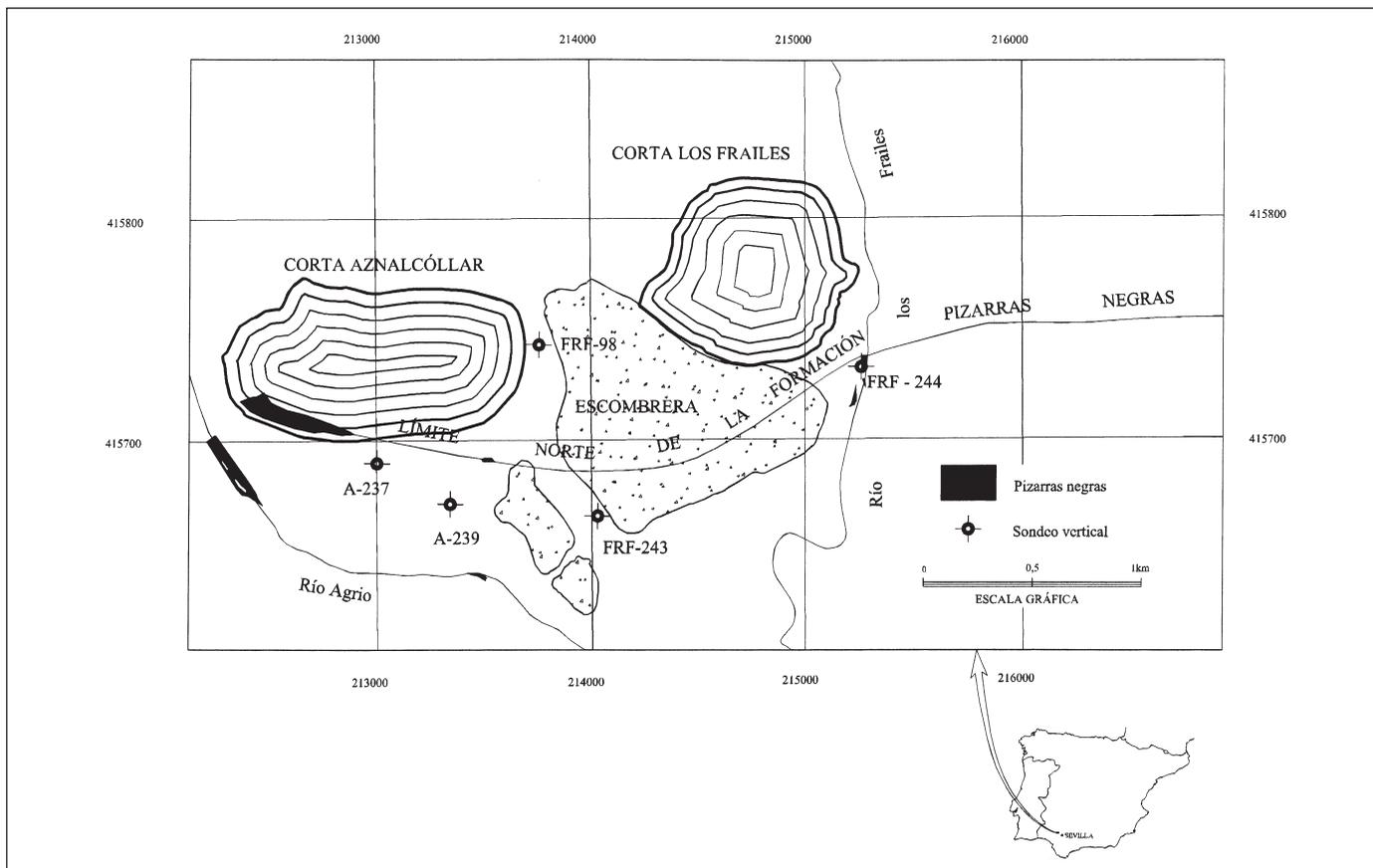


Fig. 2. Situación de los sondeos de reconocimiento (datos Boliden-Apirsa)
 Fig. 2. Situation of the investigation boreholes (data Boliden-Apirsa)

281,25-282,25 m existe una falla que limita el contacto entre el tramo carbonatado y las pizarras negras con pirita diseminada y recrystalizada en nódulos con calcita (Lopera, 2000, comunicación personal). Durante la instrumentación del sondeo se comprobó que éste se había cerrado a partir de los 277,9 m de profundidad.

El sondeo FRF-244 (figura 3) también atraviesa básicamente la formación de pizarras negras, con algunos niveles de lavas ácidas en los últimos 50 m perforados. En este sondeo se observan tramos con intensa fracturación y cizallado a todo lo largo del sondeo.

Instrumentación, objetivos y metodología de ensayo

Las características físicas de las formaciones de baja permeabilidad no permiten, en su mayoría, la utilización de las técnicas de caracterización hidráulica utilizadas tradicionalmente en los medios permeables,

siendo preciso el desarrollo de una instrumentación específica para estos medios (Mejías y Grima, 2000).

Para realizar la caracterización de los sondeos descritos se ha utilizado la Unidad Móvil de Hidrogeología de formaciones de baja permeabilidad (UMH), diseñada y construida por el IGME, y compuesta por (Mejías *et al.*, 1998): Vehículo Base, Vehículo de Descenso y grupo electrógeno (figura 4). El Vehículo Base tiene como función principal la ubicación de los sistemas de adquisición de datos, control de flujo, inflado de obturadores y equipo de profundidad. El Vehículo de Descenso lleva instalada una torre de perforación modificada que permite el descenso del equipo de profundidad, mediante varillaje, hasta la ubicación requerida para la realización de los ensayos hidráulicos, así como el transporte de los carretes del cable de señales eléctricas y la línea de inflado de obturadores.

El objetivo de la testificación hidráulica es la determinación de los parámetros hidráulicos de la formación (conductividad hidráulica y coeficiente de alma-

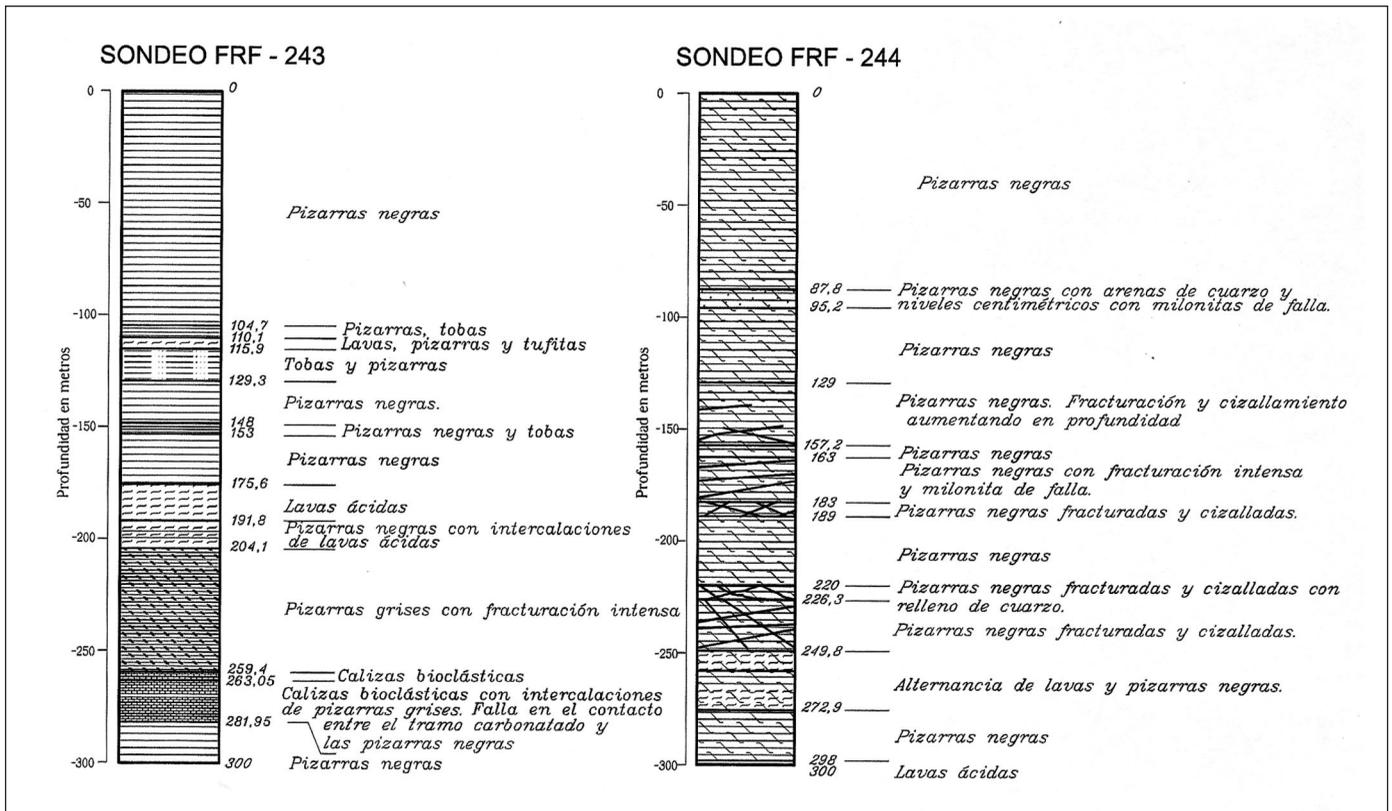


Fig. 3. Columnas litológicas de los sondeos FRF-243 y FRF-244 (Datos: Boliden-Apirsa, Aurense, IGME)

Fig. 3. Geological column of the FRF-243 and FRF-244 boreholes (Data: Bolidan-Apirsa, Aurense, IGME)

cenamiento) obtenidos mediante ensayos hidráulicos y la obtención de los niveles piezométricos de los intervalos ensayados (Almen *et al.*, 1986). La testificación hidráulica proporciona valores medios puntuales de conductividad hidráulica del tramo ensayado, los cuales pueden estar alterados, en las inmediaciones del sondeo, por los trabajos de perforación, características constructivas del sondeo y efectos de flujo turbulento (Nagra, 1989).

Los ensayos se han realizado en ambos sondeos una vez concluida la perforación, en secciones aisladas mediante dispositivo de doble obturador (figura 5), con una longitud de ensayo de 46 m en el sondeo FRF-243 y 37 m en el sondeo FRF-244. Asimismo se han realizado ensayos a columna completa en ambos sondeos.

Los ensayos hidráulicos llevados a cabo han sido fundamentalmente de tipo slug (Kruseman y de Ridder, 1991), complementados con la realización de ensayos de inyección en régimen pseudoestacionario (Raven y Lafleur, 1986). Para la realización de los ensayos hidráulicos de inyección el IGME ha desarrollado un sistema de control de caudal constituido por

un sistema de inyección y un panel de control que regula el caudal de agua inyectado en la sección de ensayo. Su diseño permite una elevada precisión en la medida de caudales muy pequeños, debido a la utilización de caudalímetros máscicos, y una elevada capacidad de regulación de caudal por medio de un sistema de válvulas de precisión, así como una estanqueidad garantizada por la utilización de tubo calibrado con conexiones estancas; el rango de caudal a medir es de 0,0005 L/min a 40,3 L/min, con una precisión media de 0,2 %, lo que permite alcanzar un límite inferior de conductividad hidráulica de $N \times 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ (Mejías *et al.*, 1995).

La respuesta transitoria de presión obtenida durante la realización de cada ensayo ha sido analizada mediante la utilización de técnicas de ajuste de los datos a curvas patrón (Earlougher, 1977).

Los ensayos de inyección pueden realizarse a caudal constante o a nivel constante (Jacob y Lohman, 1952). Teóricamente son equivalentes a un ensayo de bombeo, con la diferencia de que no es necesario disponer de una bomba en profundidad, sino que se utiliza el sistema de control de caudal de inyección ubi-

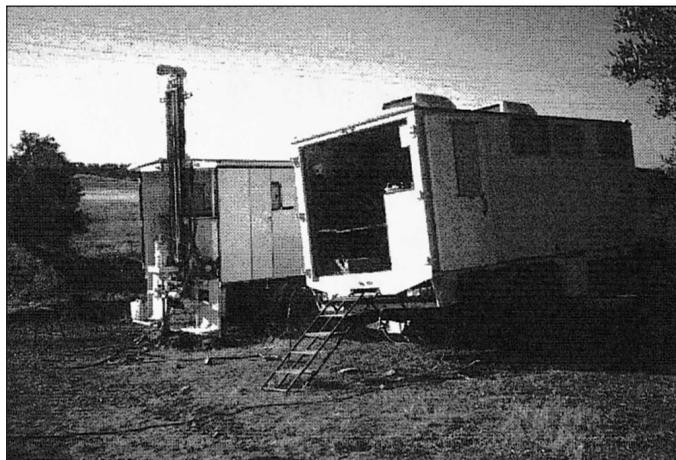


Fig. 4. Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica del IGME durante la instrumentación del sondeo FRF-244 (Foto M. Mejías)
 Fig. 4. Mobile Unit of Hydrogeological Characterization of IGME during the instrumentation of FRF-244 borehole (Photography M. Mejías)

cado en el Vehículo Base de la UMH. En este caso se ha utilizado un procedimiento de ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario, más simplificado que los de estado transitorio, y en el que se supone que el flujo de agua es constante en magnitud y dirección en todos los puntos del acuífero y que no cambia con el tiempo, con lo cual se puede asimilar a un flujo pseudoestacionario durante un período de tiempo limitado (Figura 6). Mediante la aplicación de las fórmulas correspondientes se obtiene el valor de la conductividad hidráulica en la sección confinada del sondeo.

Los métodos de análisis en estado estacionario sobrestiman, en general, el valor de la conductividad hidráulica. Sin embargo, estos métodos de análisis son ampliamente utilizados debido a su simplicidad matemática y al hecho de que se obtiene una buena correspondencia con los métodos basados en análisis transitorio. Dicho error es generalmente menor que un orden de magnitud y normalmente se corresponde con la conductividad hidráulica obtenida por métodos de análisis transitorio multiplicado por un factor comprendido entre dos y tres (Almen *et al.*, 1986).

Los ensayos tipo slug han sido analizados mediante el código conocido como AQUIX-4S, desarrollado por Envirottools Ltd, que para la interpretación utiliza la metodología desarrollada inicialmente por Cooper *et al.* (1967). El método proporciona el valor de la transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y del coeficiente de almacenamiento (S), aunque este último valor es sólo indicativo (López Geta *et al.*, 1994).

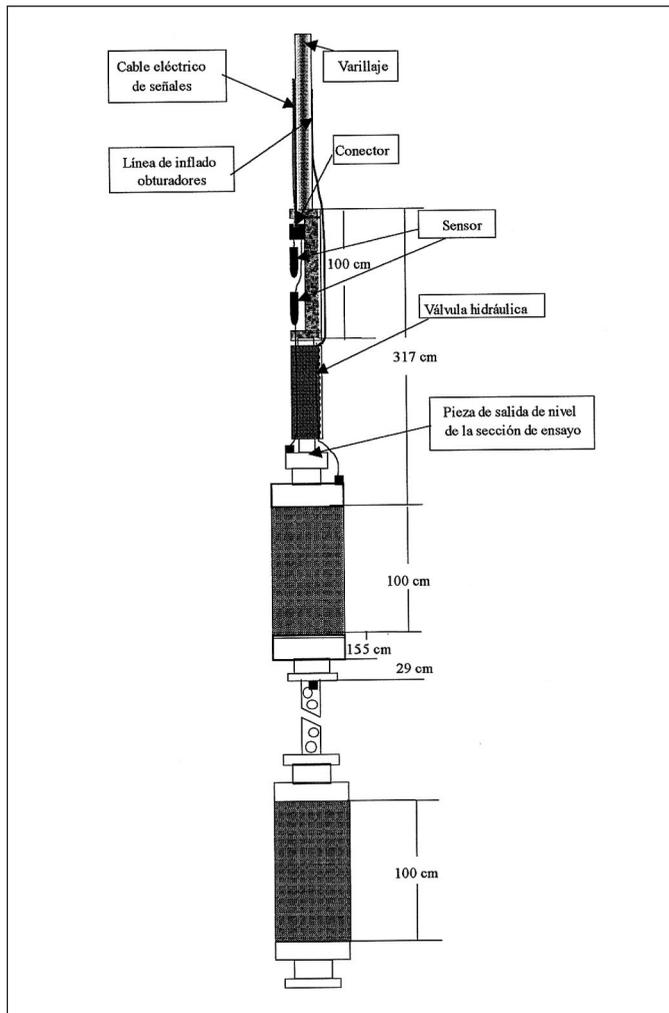


Fig. 5. Dispositivo de ensayo con doble obturador
 Fig. 5. Double packer device test

Resultados

La realización de los ensayos no ha presentado problemas importantes desde el punto de vista de la instrumentación, la estabilidad de las paredes del sondeo ha permitido la introducción y extracción del equipo de profundidad sin incidencias.

Los obturadores se han inflado con Nitrógeno a presiones comprendidas entre 18 y 46 bar, produciéndose sólo en una ocasión, en un ensayo del sondeo FRF-243, un sellado deficiente del obturador superior, detectado por el incremento de presión en la sección superior al producir la perturbación en la sección de ensayo (Martínez Navarrete *et al.*, 1995)

El desarrollo de los ensayos hidráulicos en el sondeo FRF-243 ha sido favorable tanto en su ejecución como en su interpretación, excepto el tramo más

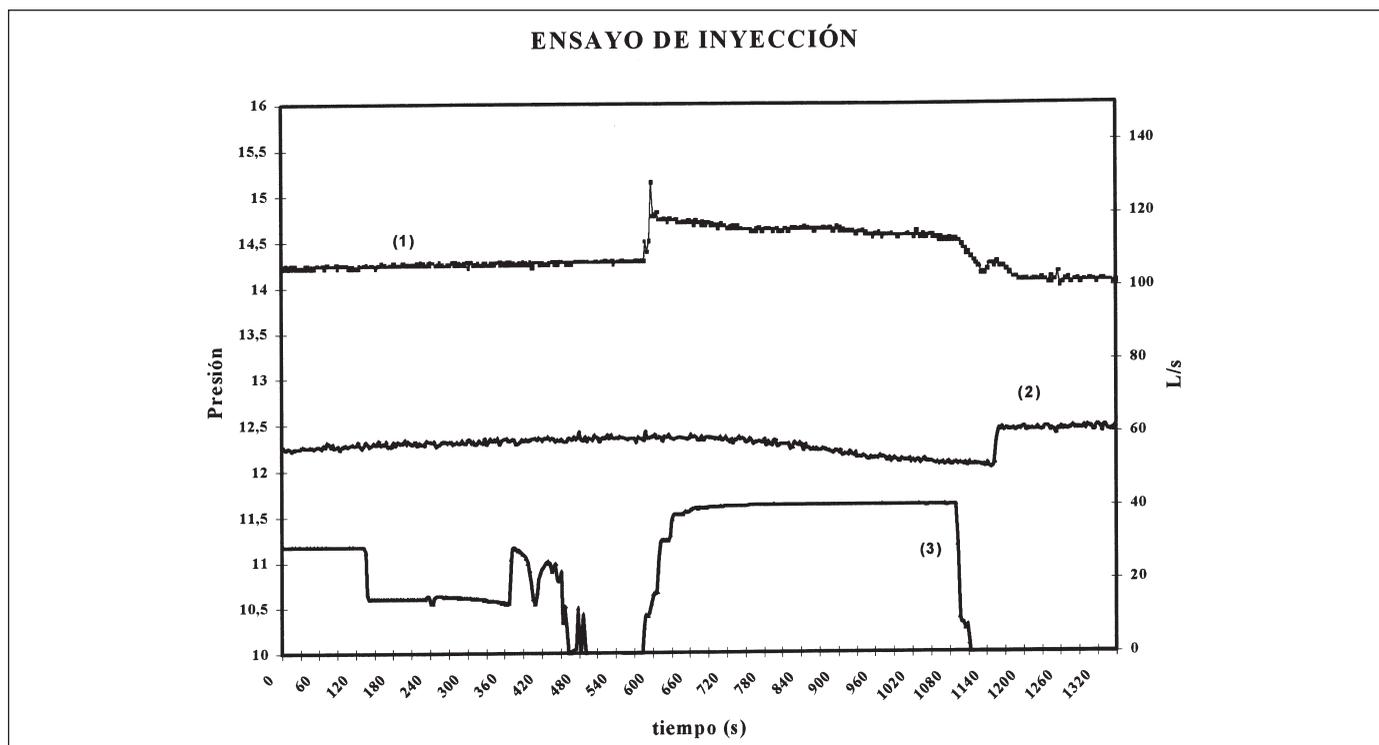


Fig. 6. Ejemplo de un ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario. La línea 1 representa la variación de presión en la sección de ensayo y la 2 la variación de presión en la sección superior; el tramo final de ambas corresponde al desinflado de obturadores. La línea 3 corresponde a la medición del caudal de inyección

Fig. 6. Example of a pseudo steady-state test injection. The line 1 represents the pressure variation in the test section and the line 2 the pressure variation in the upper section; the final plot of both it is the packers deflation. The line 3 is concerned about the flow injection measurement.

superior, entre 54 y 96 m de profundidad, en que tanto la interpretación analítica como automática ha mostrado problemas de ajuste, debido probablemente a alguna anomalía en el medio físico. En el sondeo FRF-244 se observó, desde el inicio de la testificación, un comportamiento cualitativamente diferente al del sondeo FRF-243. Durante los trabajos de instrumentación e inflado de obturadores la respuesta a las perturbaciones producidas indicaba que los valores de conductividad hidráulica debían ser superiores a los obtenidos en el primer sondeo. Para verificar el correcto funcionamiento de todos los sistemas de la UMH se realizaron varios ensayos hidráulicos de tanteo y registros programados de datos, que aseguraron la idoneidad de las respuestas de los equipos utilizados y la comprobación de los órdenes de magnitud de los valores de los parámetros hidráulicos. Algunos de los ensayos realizados en este sondeo presentaron valores de conductividad hidráulica próximos al límite superior para el que está calibrada la UMH.

Los resultados obtenidos en los ensayos hidráulicos

realizados en ambos sondeos se refleja en la tabla 1.

En la figura 7 se representa la distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad en el sondeo FRF-243. Se puede observar que la mayoría de los ensayos tienen una conductividad hidráulica entre $N.10^{-8}$ $m s^{-1}$ y $N.10^{-9}$ $m s^{-1}$, y que sólo los ensayos más superficiales, entre 54 y 113 m, tienen unos valores más altos, de $N.10^{-7}$ $m s^{-1}$, presentando además algunas anomalías en los valores de recuperación de presión que producen un deficiente ajuste en la interpretación.

Con respecto al sondeo FRF-244, cuya representación de la conductividad hidráulica en función de la profundidad se muestra en la figura 8, puede observarse que la mayoría de los ensayos presentan un valor de conductividad hidráulica entre $N.10^{-6}$ $m s^{-1}$ y $N.10^{-7}$ $m s^{-1}$, encontrándose los tramos más permeables en el último tercio del sondeo. Solamente una sección de 88 a 125 m presenta un valor de conductividad hidráulica de $N.10^{-9}$ $m s^{-1}$.

En la mayoría de los ensayos tipo slug, con valo-

res de conductividad hidráulica de $N \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ y $N \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$, se observa que el ajuste a las curvas patrón es deficiente en los valores iniciales, por lo que se ha realizado el mejor ajuste posible en el tramo medio y final de la curva de campo, que, en todo caso, supone la mayor parte de los valores registrados.

Discusión de los resultados y conclusiones

Con respecto a la representatividad de los valores de los parámetros hidráulicos, y al igual que ocurre con los valores de otras magnitudes obtenidos con la aplicación de diversas técnicas de estudio del medio geológico, en sentido estricto son sólo representativos de un entorno próximo al punto en que son obtenidos. Los valores hallados ponen de manifiesto una cierta variabilidad espacial en la distribución de los parámetros hidráulicos, lo que resulta coherente con la heterogeneidad que es característica de los medios geológicos fracturados.

En el sondeo FRF-243 los valores de conductividad

hidráulica oscilan entre un valor mínimo de $9,7 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$, para la sección de ensayo comprendida entre 96 y 142 m de profundidad, y un valor máximo de $1,01 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ para la sección comprendida entre 54 y 100 m. Para interpretar este rango de variación debe tenerse en cuenta que los ensayos hidráulicos realizados entre el metro 54 y 96 presentan anomalías de presión que producen un deficiente ajuste en la interpretación; pudiendo explicarse por la existencia en dicho intervalo de alguna discontinuidad o anomalía en el medio físico, probablemente relacionada con las antiguas explotaciones mineras subterráneas.

Cabe resaltar que los ensayos, tanto tipo slug como inyección en régimen pseudoestacionario, realizados a columna completa entre 96 y 277,9 m de profundidad, ofrecen unos valores muy similares, de $4,05 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ y $7,8 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ respectivamente.

En el sondeo FRF-244 los valores de conductividad hidráulica presentan su valor máximo entre 235 y 300 m de profundidad, concretamente de $1,013 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ para ensayo tipo slug y $5,03 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ para ensayo de inyección en régimen pseudoestacionario, para una

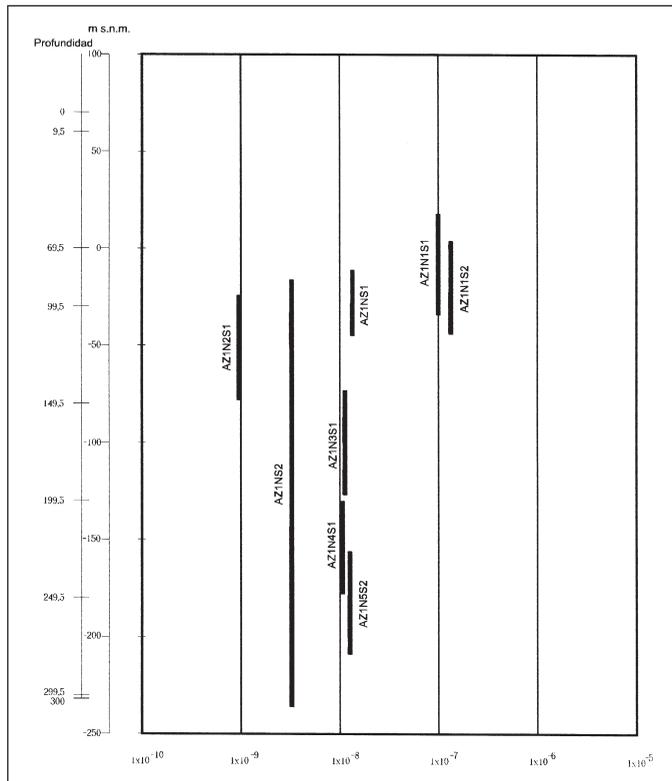


Fig. 7. Distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad en el sondeo FRF-243
 Fig. 7. Distribution of the hydraulic conductivity versus depth in the borehole FRF-243

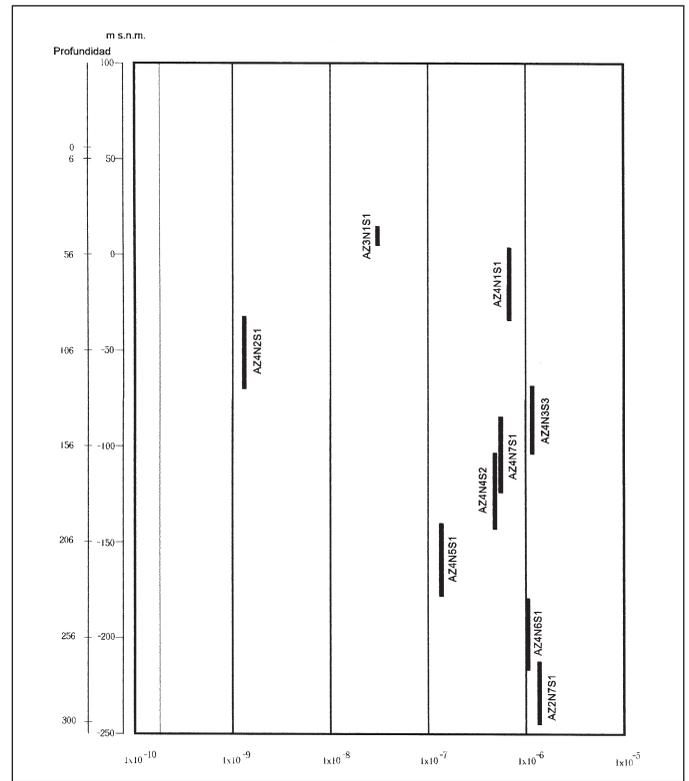


Fig. 8. Distribución de la conductividad hidráulica en función de la profundidad en el sondeo FRF-244
 Fig. 8. Distribution of the hydraulic conductivity versus depth in the borehole FRF-244

SONDEO FRF-243						
Ensayo I: inyección S: slug	Intervalo ensayado (m)	Longitud de la sección de ensayo (m)	Nivel piezométrico (ms.n.m.)	K (m s ⁻¹)	S	Observaciones
I	96-277,9	181,9	-	7,82.10 ⁹	-	
S	96-277,9	181,9	-	4,05.10 ⁹	3,13.10 ⁻⁴	
S	67-113	46	-	1,4.10 ⁻⁷	3,26.10 ⁻⁹	Ajuste deficiente
S	54-100	46	54,5	1,01.10 ⁻⁷	1,56.10 ⁻⁹	*
S	96-142	46	52	9,7.10 ⁻¹⁰	3,32.10 ⁻⁵	
S	147-193	46	55,6	1,24.10 ⁻⁸	1,25.10 ⁻⁸	*
S	200-246	46	50,4	1,13.10 ⁻⁸	2,71.10 ⁻⁷	
S	224,5-277,9	53,4	45,78	1,39.10 ⁻⁸	7,05.10 ⁻⁷	

** Datos iniciales afectados por variaciones anómalas de presión*

SONDEO FRF-244						
Ensayo I: inyección S: slug	Intervalo ensayado (m)	Longitud de la sección de ensayo (m)	Nivel piezométrico (ms.n.m.)	K (m s ⁻¹)	S	Observaciones
I	60-300	240	-	1,32.10 ⁵	-	
S	50-87	37	23,49	7,77.10 ⁻⁷	9,75.10 ⁻¹¹	*
S	88-125	37	22,56	1,31.10 ⁻⁹	9,13.10 ⁻⁴	
S	123-160	37	22,89	1,31.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻¹¹	*
S	161-198	37	23,33	5,12.10 ⁻⁷	5,56.10 ⁻⁹	*
S	197-234	37	21,93	1,38.10 ⁻⁷	1,7.10 ⁻⁶	
S	235-272	37	22,35	1,01.10 ⁻⁶	8,0.10 ⁻¹⁰	Ajuste deficiente
I	235-272	37	-	5,03.10 ⁻⁶	-	
S	141-178	37	23,95	6,43.10 ⁻⁷	7,9.10 ⁻⁹	Ajuste deficiente
S	270-300	30	-	1,43.10 ⁻⁶	7,15.10 ⁻¹⁰	Ajuste deficiente

** Datos iniciales afectados por variaciones anómalas de presión*

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos en la caracterización hidráulica de los sondeos de reconocimiento
 Tabla 1. Summary of the obtained values in the hydraulic characterization of the investigation boreholes

profundidad de sección de ensayo entre 235 y 272 m, y de 1,43.10⁻⁶ m s⁻¹ para la sección comprendida entre 270 y 300 m.

El resto de los ensayos tipo slug, realizados a profundidades entre 50 y 234 m presentan valores de conductividad hidráulica con un orden de magnitud de N.10⁻⁷ m s⁻¹, excepto la sección comprendida entre 88 y 125 m que presenta un valor más bajo de conductividad hidráulica, 1,31.10⁻⁹ m s⁻¹ y la sección comprendida entre 123 y 160 m que también presenta, al

igual que la zona más profunda entre 235 y 300 m, un valor de conductividad hidráulica de 1,31.10⁻⁶ m s⁻¹.

En la mayoría de los ensayos tipo slug con valores de conductividad hidráulica de N.10⁻⁶ m s⁻¹ y N.10⁻⁷ m s⁻¹, se observa que el ajuste a las curvas patrón es deficiente en los valores iniciales, por lo que se ha realizado el mejor ajuste posible en el tramo medio y final de la curva de campo, que, en todo caso, supone la mayor parte de los valores registrados. Este comportamiento podría deberse a una compleja res-

puesta en los valores de recuperación de presión, característico de medios fracturados.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren expresar su agradecimiento a Boliden-Apirsa, S.L. por su autorización a la publicación de los datos expuestos y el apoyo prestado durante la ejecución de los trabajos descritos. Así mismo, agradecer la contribución, en forma de comentarios y sugerencias, realizada por D. Luis López Vilches y D. Juan A. Navarro de la empresa AURENSA y el apoyo prestado por D. Silvino Castaño Castaño, del Instituto Geológico y Minero de España, en el diseño y elaboración de las figuras incluidas en el presente artículo.

Referencias

- Almen, K.E., Andersson, J. E., Carlsson, L., Hansson K., Larsson, N. A., 1986. Hydraulic testing in crystalline rock. A comparative study of single-hole test methods. *Technical Report 86-27*. SKB, Uppsala (Suecia).
- Arenas, J.M., Carrero, G., Galache, J., Mediavilla, C., Silgado, A., Vázquez, E.M., 2001. Actuaciones realizadas tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, número especial, 35-56.
- AURENSA, 2001. *Modelo hidrogeológico del entorno de las cortas mineras. Recalibración con nuevos datos hidrogeológicos*. Madrid. (Difusión restringida).
- Borja, F., López-Geta, J.A., Martín, M., Mantecón, R., Mediavilla, C., Olmo, P., Palancar, M., Vives, R., 2001. Marco geográfico, geológico e hidrológico regional de la cuenca del Guadiamar. *Boletín Geológico y Minero*, número especial, 13-33.
- Cooper, H.H., Bredohoeft, J.D., Papadopoulos, I.S., 1967. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3(1), 263-269.
- Earlougher, R.C., 1977. Advances in well test analysis. *Monograph volume 5 of the Henry L. Doherty Series*. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. Dallas, Texas (USA). Pp. 264.
- Golder Associates-Aurensa, 1998. *Estudio hidrogeológico de las cortas de Aznalcóllar y su entorno. Memoria y Anexos*. (Informe Interno para Boliden-Apirsa, S.L.)
- Gómez de las Heras, J., López-Geta, J.A., Mediavilla, C., Sahuquillo, A., Custodio, E., 2001. Comportamiento hidráulico y modelación hidrogeológica de las formaciones paleozoicas y miocenas de la cuenca del río Guadiamar. *Boletín Geológico y Minero*, número especial, 257-282.
- IGME, 1982. Síntesis geológica de la Faja Pirítica del SO de España. *Colección Memorias, IGME*, Madrid. Tomo 98.
- IGME, 2000. Unidades Hidrogeológicas de España. Mapa y Datos Básicos. IGME, Madrid.
- Jacob, C.E., Lohman, S.W., 1952. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Transactions, American Geophysical Union* 33 (4): 559-569.
- Kruseman, G.P., de Ridder, N.A., 1991. Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). Publ. 47. Wageningen. Pp. 377.
- López-Geta, J.A., Grima, J., Martínez Navarrete, C., 1994. Borehole testing and test interpretation in the San Pedro Clay Formation. *Workshop on determination of hydraulic and hydrochemical characteristics of Argillaceous rock*, Nottingham, Session III, Hydraulic Testing, 195-211.
- Martínez Navarrete, C., Grima, J., Mejías, M., Gómez, J.A., 1995. Celda de presión para ensayo de componentes de un equipo de testificación hidráulica. Especificaciones técnicas y ensayos. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX: 209-222.
- Mejías, M., Grima, J., Martínez Navarrete, C., Gómez, J.A., 1995. Sistema de control de flujo para la realización de ensayos hidráulicos de inyección. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX: 223-236.
- Mejías, M., Grima, J., Gómez, J.A., Martínez, C., 1998. Unidad Móvil de caracterización hidrogeológica de formaciones de baja permeabilidad. Ensayos de calibración. *X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia*, I: 199-218, Valencia.
- Mejías, M., Grima, J. 2000. Obtención de parámetros hidráulicos en formaciones geológicas de baja permeabilidad. *Geotemas*, 1(2): 99-104.
- Nagra, 1989. Interpretation of hydraulic testing in crystalline rock at the Leuggern borehole. *Technical Report 87-19*, Baden, Suiza.
- Navarro, J.A., Eriksson, N., Martínez, P.E., López Vilchez, L., 2001. La corta Aznalcóllar como depósito de los estériles del concentrador de la mina Los Frailes (Aznalcóllar, Sevilla). Modelo Hidrogeológico. *Hidrogeología y Recursos hidráulicos*, XXIV: 391-401.
- Raven, K.G., Lafleur D. W., 1986. *An evaluation of hydrogeologic data of crystalline rock systems*. INTERA Technologies. Info-0221. Ottawa, Canadá.

Recibido: Diciembre 2001

Aceptado: Marzo 2002