

Comportamiento hidráulico y modelación hidrogeológica de las formaciones paleozoicas y miocenas de la cuenca del río Guadamar

Coordinador: E. Custodio^(1 y 4)

Autores: J. Gómez de las Heras⁽¹⁾, J. A. López Geta⁽¹⁾, C. Mediavilla⁽²⁾, A. Sahuquillo⁽³⁾ y E. Custodio^(1 y 4)

(1) Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

(2) Instituto Geológico y Minero de España, Oficina de Proyectos de Sevilla.

(3) Dep. Ing. Hidráulica y Medioambiente. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.

(4) Dep. Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

RESUMEN

Tras introducir los aspectos de evolución de la minería en el entorno de Aznalcóllar se presenta lo que los autores conocen acerca de las características hidrogeológicas de los materiales paleozoicos en que están excavadas las dos cortas (Aznalcóllar y Los Frailes), así como de los materiales inmediatos y aquellos que contienen las mineralizaciones de sulfuros polimetálicos. Se trata de materiales de baja a muy baja permeabilidad, aunque hay algunas formaciones locales de riolitas que pueden presentar mayor conductividad hidráulica. Sobre el paleozoico se desarrolla el acuífero Niebla-Posadas, de pequeño espesor, que al Norte de las cortas sólo aparece en manchas aisladas y que al Sur queda confinado bajo un espesor creciente de margas miocenas. La corta Los Frailes está activa mientras que la Aznalcóllar no lo está y estaba iniciándose un proceso de relleno de la misma con estériles procedentes de la de Los Frailes. Tras el accidente de la balsa de lodos ha cesado el relleno de la corta Aznalcóllar y ésta ha servido de receptor de los lodos y suelos retirados de la cuenca del Guadamar; actualmente se utiliza para almacenar los lodos mineros y temporalmente las aguas de drenaje de la corta de los Frailes y de los excedentes de tratamiento del mineral. El notable grado de contaminación con metales pesados de las aguas en las cortas mineras y en el entorno minero puede afectar y en algunos casos ya afecta a acuíferos locales. Si bien la movilidad de los metales pesados puede ser pequeña en medios carbonatados, es necesario conocer bien su impacto, tanto el actual como el previsible o posible tras el cese de las actividades mineras. Se presentan y discuten los esfuerzos de modelación numérica preliminar del flujo del agua subterránea y las actividades a realizar en el futuro para definir mejor el sistema de flujo y sus incertidumbres, así como el transporte de masa.

Palabras clave: Hidrogeología, Paleozoico, Acuífero Niebla-Posadas, Aznalcóllar, Minería polimetálica, Modelación.

Hdraulic behaviour and hydrogeological modelling of the palaeozoic and pliseng formations of the Guadamar river basin.

ABSTRACT

The main issues about the evolution of mining in the area of Aznalcóllar are introduced. What is currently known about the hydrogeological characteristics of the Palaeozoic materials which host the Aznalcóllar and Los Frailes open pits are described, as well as the close materials which contain the polymetallic sulphide mineralizations. They are low to very low permeability materials, although there are some local rhyolite formations of higher hydraulic conductivity. The Miocene Niebla-Posadas aquifer lies on top of the Palaeozoic. It has a small thickness. To the north of the open pits it appears only as patches, and to the south it becomes confined under an increasing thickness of Miocene marls. The Los Frailes open mine is active whilst Aznalcóllar is not. The backfilling of the Aznalcóllar pit with mining rock waste was starting when the tails dam failed, and afterwards the backfilling was discontinued. Then it became the receptor of the muds and soils collected from the Guadamar river basin. Currently it is being used to dispose mining muds as well as mine water on a temporarily basis. The conspicuous contamination with heavy metals of water in the pits and in the mine surroundings may affect and in some cases already affects local aquifers. Even if heavy metals mobility in carbonate rocks may be small, their impact has to be known, at present moment and after closing mining activities. A preliminary attempt to model groundwater flow as well as future activities to better define the flow pattern and its uncertainties are presented and discussed.

Key words: Hydrogeology, Paleozoic, Niebla-Posadas aquifer, Aznalcóllar, Polymetallic mining, Modelling.

INTRODUCCIÓN

E. Custodio

En el área minera de Aznalcóllar existe una densa red hidrográfica (figura 11.1), de dirección preferente norte-sur. Destacan el río Guadiamar y su afluente por la margen derecha, el río Agrio. Éste está formado por la unión del río Crispinejo y el arroyo Cañaveroso, y está regulado justo aguas arriba del área minera de Aznalcóllar por el embalse del mismo nombre, llamado también del río Agrio, con capacidad de 21,5 hm³ y altura de coronación de 110 m sobre el nivel del mar. El arroyo de Los Frailes es un afluente del río Agrio por su margen izquierda, y ambos cruzan el área minera.

Los materiales paleozoicos son de baja a muy baja permeabilidad, excepto algunas formaciones asociadas a la mineralización polimetálica, cuya conductividad hidráulica es de media a baja. Salvo en el entorno de las cortas mineras, donde se conocen con cierto detalle desde hace poco tiempo, en el resto las características hidráulicas de esas formaciones paleozoicas son casi desconocidas, así como las condiciones de flujo del agua subterránea. Sin embargo es claro que los ríos principales drenaban y continúan drenando agua de esos materiales, y que la minería subterránea, anterior a las cortas, tuvo ciertas dificultades por acceso de agua.

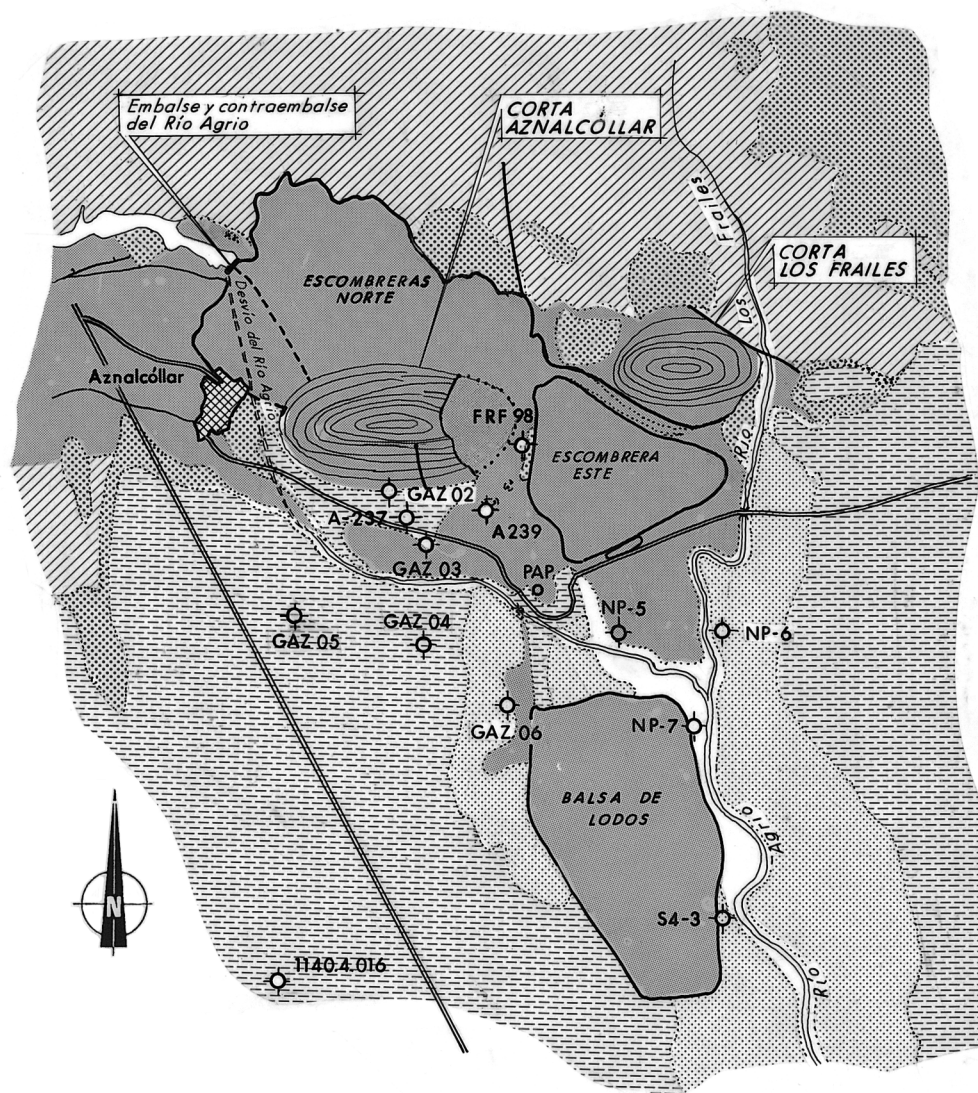
Hasta 1975 la explotación del yacimiento de sulfuros polimetálicos del entorno de Aznalcóllar se llevó a cabo por laboreo subterráneo (cámaras y pilares) y posteriormente a cielo abierto, mediante profundas cortas mineras. Estas cortas profundizan muy por debajo del nivel de drenaje de la red hidrográfica local. Además de la afectación al drenaje superficial, las cortas suponen un sumidero de aguas subterráneas de los materiales paleozoicos en los que están excavadas en tanto que se mantenga en las mismas la extracción de agua, bien mediante bombeo en la corta activa Los Frailes, o en la corta Aznalcóllar por el proceso natural de evaporación de una cierta cantidad de agua que depende de las circunstancias de cada momento.

Cuando se produjo la ruptura de la balsa de lodos, la corta Aznalcóllar estaba en el inicio del proceso de relleno con estériles procedentes de

la corta Los Frailes, introducidos por el lado Este. En su fondo había ya una notable acumulación de agua ácida, cargada con metales pesados. Dicho proceso de relleno cesó tras el accidente de la balsa y se utilizó para almacenar los lodos y suelos contaminados recogidos a lo largo de los cauces de los ríos Agrio y Guadiamar (incluyendo Entremuros), durante las diferentes fases de limpieza. Actualmente se vierten en dicha corta los lodos de la actividad minera tras el accidente así como el agua de vaciado de la corta Los Frailes y sobrantes del procesamiento de mineral, temporalmente, en espera de su evacuación tras el paso por la estación de tratamiento de aguas de drenaje de mina. Actualmente existe una limitación administrativa que exige que el agua en la corta Aznalcóllar no supere la cota 0 y deje una lámina de agua mínima de 5 m sobre el lodo depositado para evitar su oxidación. Está en estudio una petición de elevación de dicha cota, en función de que se argumente suficientemente que lo que se solicita no aumenta el riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

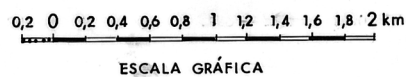
Los materiales paleozoicos son en general de muy baja permeabilidad. Ocupan buena parte de la cuenca alta del Guadiamar. Aunque los datos sobre observaciones son casi inexistentes, la escorrentía superficial parece dominar sobre la recarga a los niveles algo facturados y meteorizados superiores, y ésta es pequeña. En general se trata de sistemas de flujo local que descargan en la red de torrentes y ríos, con algunos manantiales de los que no se sabe a ciencia cierta si se trata de manifestaciones del nivel freático, que se adaptaría a grandes rasgos al relieve, o de nacientes colgados. Parece que algunos fondos de valle tienen agua semipermanente, aún cerca de cabecera. No cabe esperar la existencia natural de flujos regionales profundos bien definidos, aunque la presencia de las extracciones del área minera puede haber ido alterando el esquema de flujo, perturbando el preexistente de tipo valle-interfluvio.

Los materiales paleozoicos no tienen interés hidrogeológico como recurso de agua subterránea, excepto quizás los niveles más permeables de riolitas, de forma limitada espacial y temporalmente, y con muchas dudas. Cabe esperar que dicha agua esté afectada real o potencialmente por alta mineralización y por la presencia de



LEYENDA

-  Paleozoico indiferenciado
-  Acuífero Niebla-Posadas
-  Formación Margas Azules
-  Cuaternario indiferenciado
-  Cuaternario aluvial
-  Depósitos e instalaciones mineras
-  Antiguo cauce del río Agrio
-  Sondeo de observación



11.1.- Esquema de situación geográfica y geológica en el entorno de las minas de Aznalcóllar (datos IGME).

metales pesados disueltos. Pero estos materiales paleozoicos están en contacto con otras formaciones acuíferas, como los aluviales y el llamado acuífero Niebla-Posadas.

Sobre los materiales paleozoicos se ha depositado un nivel potencialmente permeable, que incluye niveles de carácter carbonatado, de poco espesor y potencialmente permeable, que constituye lo que regionalmente se denomina acuífero Niebla-Posadas, tomando el nombre de dos localidades en el afloramiento a lo largo del borde paleozoico, de Oeste a Este. Dicho acuífero forma retazos aislados aflorantes al Norte de las cortas mineras y está erosionado en buena parte en la franja de las explotaciones mineras; al Sur de las mismas es continuo y está progresivamente confinado bajo un espesor creciente de margas. En la zona próxima y aguas abajo del área minera, el acuífero Niebla-Posadas tiene una explotación pequeña pero interesante y creciente como fuente de agua dulce permanente o de emergencia. Aflora en el borde superior de las cortas mineras, por encima de los niveles de drenaje fluvial. Su hundimiento hacia el Sur, en contacto con el paleozoico, favorece que pueda recibir alguna alimentación desde dicho paleozoico, naturalmente y aún más cuando su potencial hidráulico disminuye a causa de la explotación, si bien el caudal aportado es y será probablemente muy pequeño. Eso ha llevado a que se haya planteado la hipótesis de su posible contaminación actual o futura a partir de las escombreras, balsa de lodos y cortas en relación con las labores mineras. Bajo este aspecto cabe diferenciar:

- a) lo ya realizado y su posible corrección, y las consecuencias de la acumulación de materiales en la corta Aznalcóllar tras el accidente de la balsa de lodos y como consecuencia de la continuación temporal de la actividad minera hasta agotar las reservas útiles, y
- b) lo que sucederá tras el cese de la actividad minera, principalmente en lo que respecta a la aportación progresiva de agua a las cortas.

Las hipótesis de contaminación se refieren únicamente a la porción del acuífero Niebla-Posadas aflorante en el entorno de Aznalcóllar y la franja confinada que se extiende hacia el sur y al drenaje lateral hacia los cauces, y no al resto del

acuífero, que queda fuera de la posible influencia minera directa o como consecuencia del accidente.

Para contribuir a clarificar las cuestiones planteadas se han iniciado trabajos de modelación numérica, adicionales a los que ha ido realizando la empresa minera, para tratar de conocer el funcionamiento del sistema acuífero y las incertidumbres asociadas a la propia naturaleza del medio, a la de insuficiencia de datos, a las diferentes hipótesis de continuidad de las formaciones y a las evoluciones previsibles de las condiciones del contorno.

En buena parte se trata de trabajos en curso, cuyos resultados irán apareciendo próximamente. Aquí sólo se reflejan las circunstancias del trabajo y algunos resultados preliminares.

En el subcapítulo 11.1 se introducen aspectos generales del yacimiento de Aznalcóllar y las grandes líneas de su evolución histórica. El subcapítulo 11.2 presenta la información disponible sobre las características del paleozoico y de las cortas. El subcapítulo 11.3 describe el acuífero Niebla-Posadas y lo que se conoce sobre sus características y explotación. El subcapítulo 11.4 hace referencia a los trabajos de modelación numérica, sus condiciones y algunos de los resultados provisionales obtenidos de un trabajo que está aún en su fase inicial; se esbozan las líneas futuras en que se deberá conducir la modelación.

11.1. El yacimiento de Aznalcóllar dentro de la minería de la Faja Pirítica Ibérica

J. Gómez de las Heras

La minería de lo que actualmente se conoce como "Faja Pirítica Ibérica" se remonta al Neolítico. Su primer gran esplendor se encuentra en los trabajos mineros llevados a cabo por el pueblo tarteso, que fue la primera entidad política superior de todo el Occidente europeo. Su riqueza más importante era la minería y la metalurgia. Mención a sus riquezas en metales preciosos (oro y plata) y metales arrastrados por las aguas de sus ríos son recogidas por los grandes profetas bíblicos, Isaías, Ezequiel y Jeremías, en sus escritos del siglo VI antes de Cristo.

El esplendor minero del pueblo tarteso en los siglos VIII a VI antes de Cristo acabó tras la conquista y dominación de los cartagineses hacia el siglo V antes de Cristo. Sólo tras la llegada a esas tierras del Imperio Romano, ciento setenta y cinco años después de la entrada de los romanos en la Península, vuelve a recuperarse la actividad minera en los tiempos del emperador Augusto, en el año 43 antes de Cristo (Pinedo Vara, 1963). Ya en la época romana, y utilizando terminología actual, cabría hablar de afección al dominio hidráulico. El desagüe de las minas romanas se hacía a base de socavones largos, ruedas y tornillos de Arquímedes, movidos con los pies o a tracción por los esclavos, y que colocados en serie permitían elevar el agua unos 29 metros (Pinedo Vara, 1963).

A la importante actividad minera de la época romana le siguió un período de paralización total durante la dominación visigoda y musulmana. Tras la expulsión de los moriscos y la llegada al trono del rey Felipe II volvió a despertar el interés minero en la región, como consecuencia del cual se solicitaron diversas minas. Entre estas solicitudes se encuentra la realizada el 28 de agosto de 1563, por la cual se permitió labrar una mina de plata hallada en el término de Aznalcóllar (Sevilla). Dicha explotación volvió a denunciarse en 1628 (Pinedo Vara, 1963).

En lo que se refiere específicamente al yacimiento de Aznalcóllar, la historia de su explotación se remonta a la época romana, a cuyos tiempos pertenecen los restos del acueducto que iba desde el río Crispinejo hasta la antigua Itálica. Tras las denuncias anteriormente indicadas (años 1563 y 1628), en el año 1853 fueron otorgadas por la Jefatura de Minas de Sevilla las minas Silillos y Cuchichón.

En el año 1870 las minas pasaron a propiedad de la sociedad The Seville Sulphur & Copper Co. Ltd., que las explotó subterráneamente hasta finales de la década de 1940. En el período 1952 a 1960, y tras el necesario desagüe de las labores inundadas como consecuencia de la escasa e incluso nula actividad minera entre los años 1931 a 1951, la explotación la llevó a cabo Peñarroya España S.A.

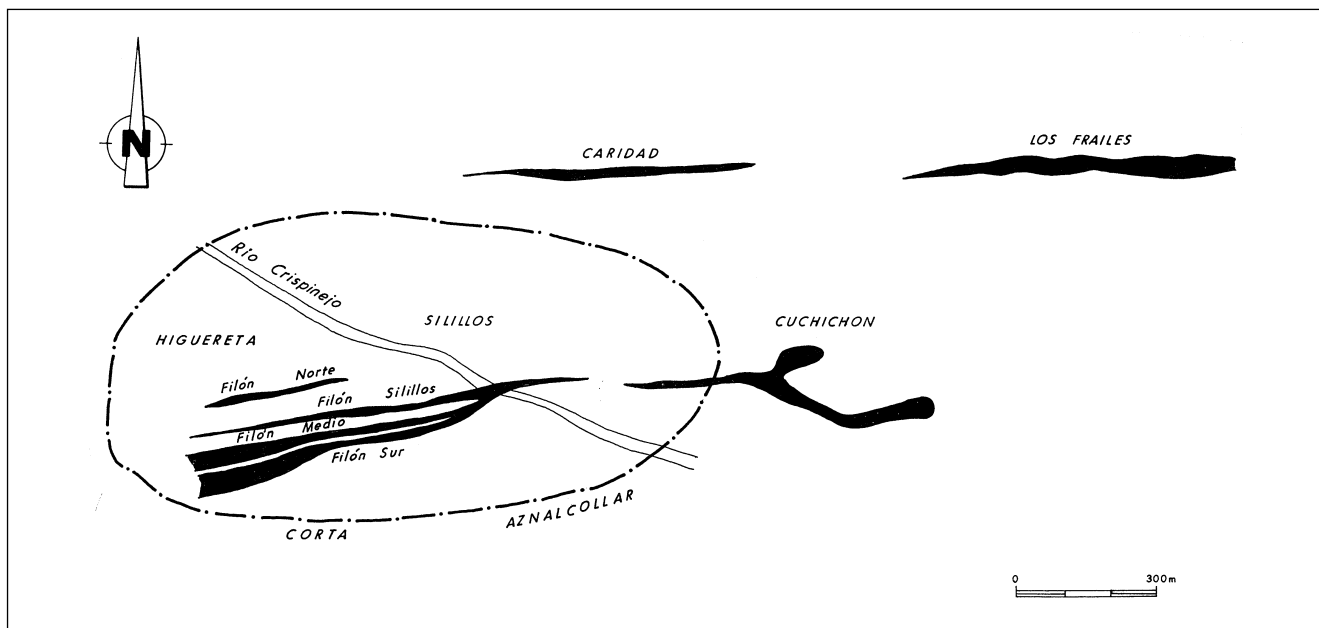
En el año 1960 el Banco Central adquirió la pro-

piedad, empezando a operar la mina con la constitución de Andaluza de Piritas S.A. (APIRSA). A finales de 1987 es cuando se produce la entrada de la compañía minera sueco-canadiense BOLIDEN.

La zona mineralizada en el yacimiento de Aznalcóllar, de unos 1800 m de longitud en dirección E-O, agrupaba a las antiguas minas Santiago, Pañoleta, Cuchichón, Masa Nueva, Silillos e Higuera (figura 11.2.), que constituyen un solo yacimiento. Su explotación se realizó por laboreo subterráneo hasta 1975. La masa Cuchichón fue la última explotada subterráneamente. A partir de 1975 la extracción se llevó a cabo a cielo abierto, primero en la hoy ya abandonada (diciembre 1996) corta Aznalcóllar (figura 11.3.) y actualmente en la corta Los Frailes.

Las profundidades a las cuales se debió llegar por laboreo subterráneo son muy diferentes, hasta algo más de 100 m, o sea unos 20 m bajo el nivel del mar y unos 70 m bajo el nivel del cauce de los ríos locales. La información sobre entrada de agua a las labores mineras y de inundación posterior es escasa y fragmentaria, aunque se sabe que estaban inundadas en 1945 (Pinedo Vara, 1963). En épocas más recientes, a mediados de la década de 1960, el Pozo Gustavo, cuyo fondo se encontraba aproximadamente a la cota -20 m, tuvo que ser desaguado para proceder a la toma de muestra de mineral con objeto de realizar ensayos de concentración por flotación en una planta piloto. El agua extraída de las labores mineras se vertía directamente sobre el terreno o a la red fluvial. La no existencia de balsas de lodos notables podría explicarse porque éstos iban a los ríos en las crecidas, como se deduce de algunos comentarios de habitantes locales.

En el yacimiento, de muro a techo se observan las siguientes unidades litológicas: riolitas; pizarras grafitosas y jaspes; tobas dacíticas; sulfuros masivos (filón Sur); alternancia de tobas y pizarras; segundo cuerpo mineralizado (filón Centro); piroclastos; tercer cuerpo mineralizado (filón Silillos); cineritas cloritizadas con calcopirita (piroclasto cuprífero). La última unidad parece tratarse de un stockwork cuprífero cabalgante sobre las unidades superiores. La figura 11.4



11.2.- Situación de las masas explotadas y en explotación, y perímetro de la corta Aznalcóllar.



11.3.- Vista de la corta Aznalcóllar desde el lado Oeste antes de iniciarse el proceso de relleno por el lado Este (foto J. Gómez de las Heras, 1986).

masa, una corrida del orden de 1000 m y una potencia real de unos 40 m (A. Sánchez, IGME, com. personal).

Las reservas totales se evaluaron en 90 millones de toneladas, de las cuales 43 millones corresponden al mineral masivo complejo y los otros 47 millones a los piroclastos cupríferos. La información en cuanto a las leyes de cobre, plomo, cinc, oro y plata se indican en la tabla 11.1:

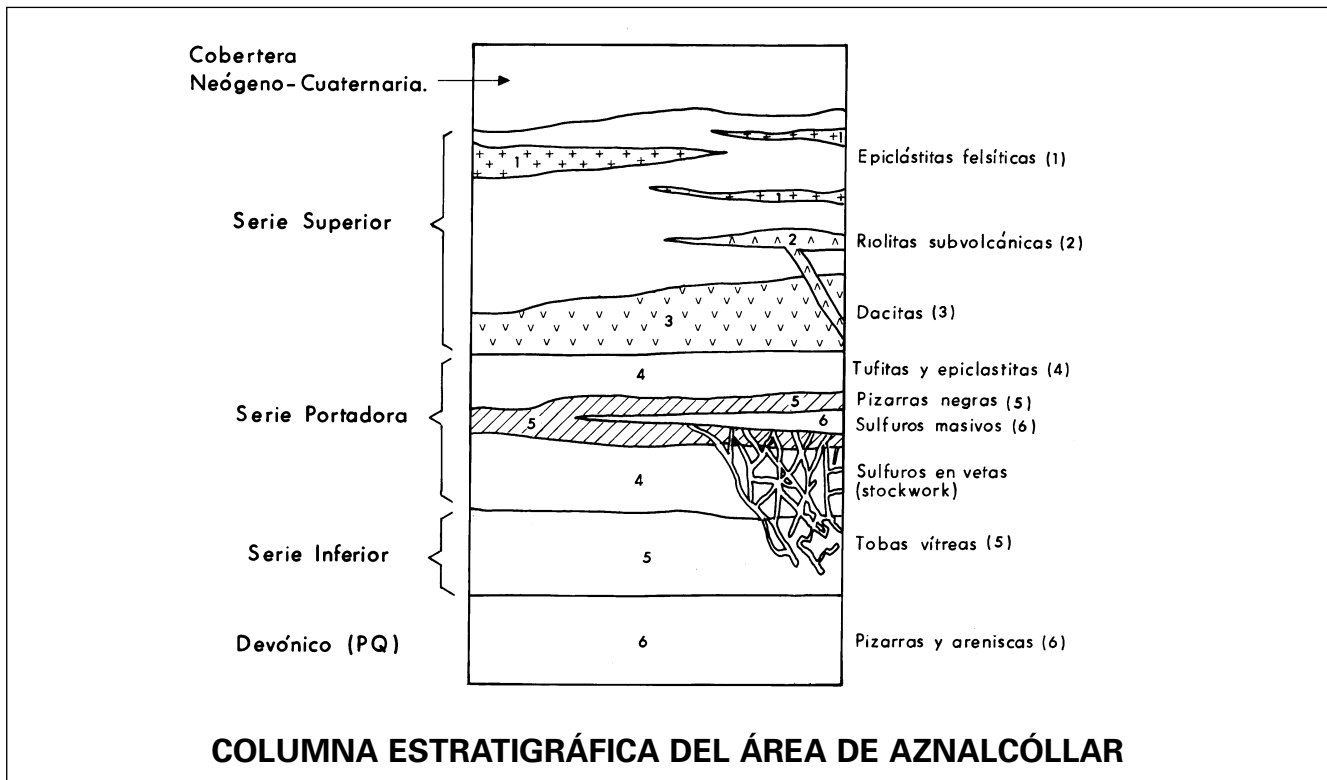
Ley	Cu ‰	Pb ‰	Zn ‰	Au (g/t)	Ag (g/t)
Media del conjunto	5,1	8,5	18	4,8	370
De los sulfuros complejos	4,4	17,7	33,3	10	670
Del piroclasto cuprífero	5,8	-	4,0	-	100

Tabla 11.1.- Leyes medias de las mineralizaciones

muestra una columna estratigráfica tipo del área de Aznalcóllar.

La agrupación de los tres cuerpos de mineral existentes (masa de sulfuros complejos) tiene una corrida de 1400 m, 40 m de potencia real y un buzamiento de 40° a 50° N. Por su parte, los piroclastos cupríferos, situados a techo de la masa de sulfuros, tienen un buzamiento igual al de dicha

Después del accidente de la balsa de lodos, en Abril de 1998, tras prácticamente un año de inactividad, en 1999 se reinició la actividad minera con el tratamiento de 1,86 millones de toneladas de mineral. La producción alcanzada en ese año ascendió a 6504 t de concentrados de cobre, 36 008 t de concentrados de plomo y 98 993 t de concentrados de cinc.



11.4.- Columna estratigráfica del entorno de la mineralización de Aznalcóllar (basada en datos comunicados por Boliden-Apirsa)

11.2. El paleozoico y las cortas mineras

J.A. López Geta

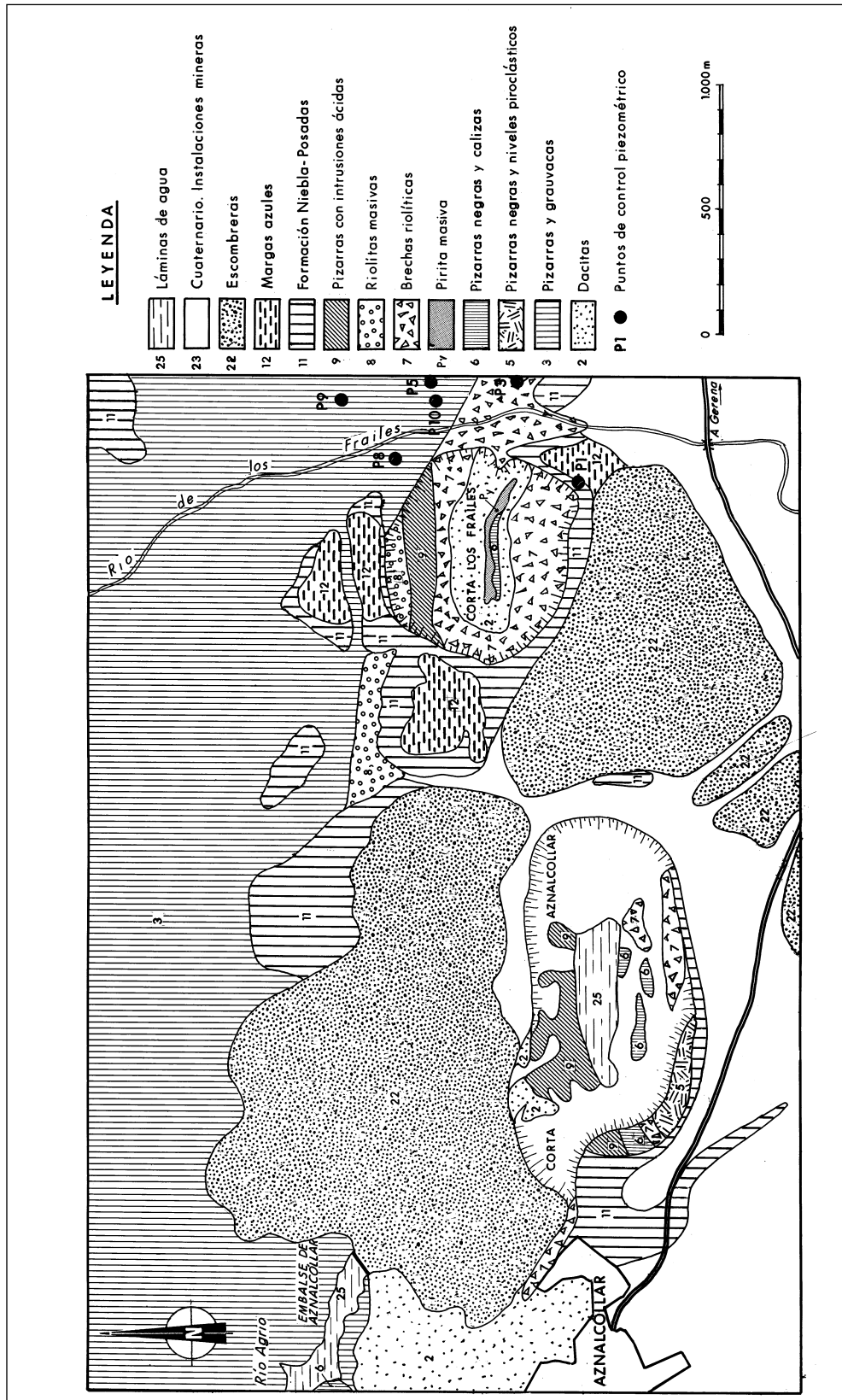
Formaciones paleozoicas

El yacimiento minero de Aznalcóllar se ubica sobre un área donde predominan las formaciones paleozoicas. El resto de instalaciones del complejo minero: escombreras, plantas de tratamiento, etc., comparten su ubicación con otras de edad Miocena y Cuaternaria (Figura 11.5).

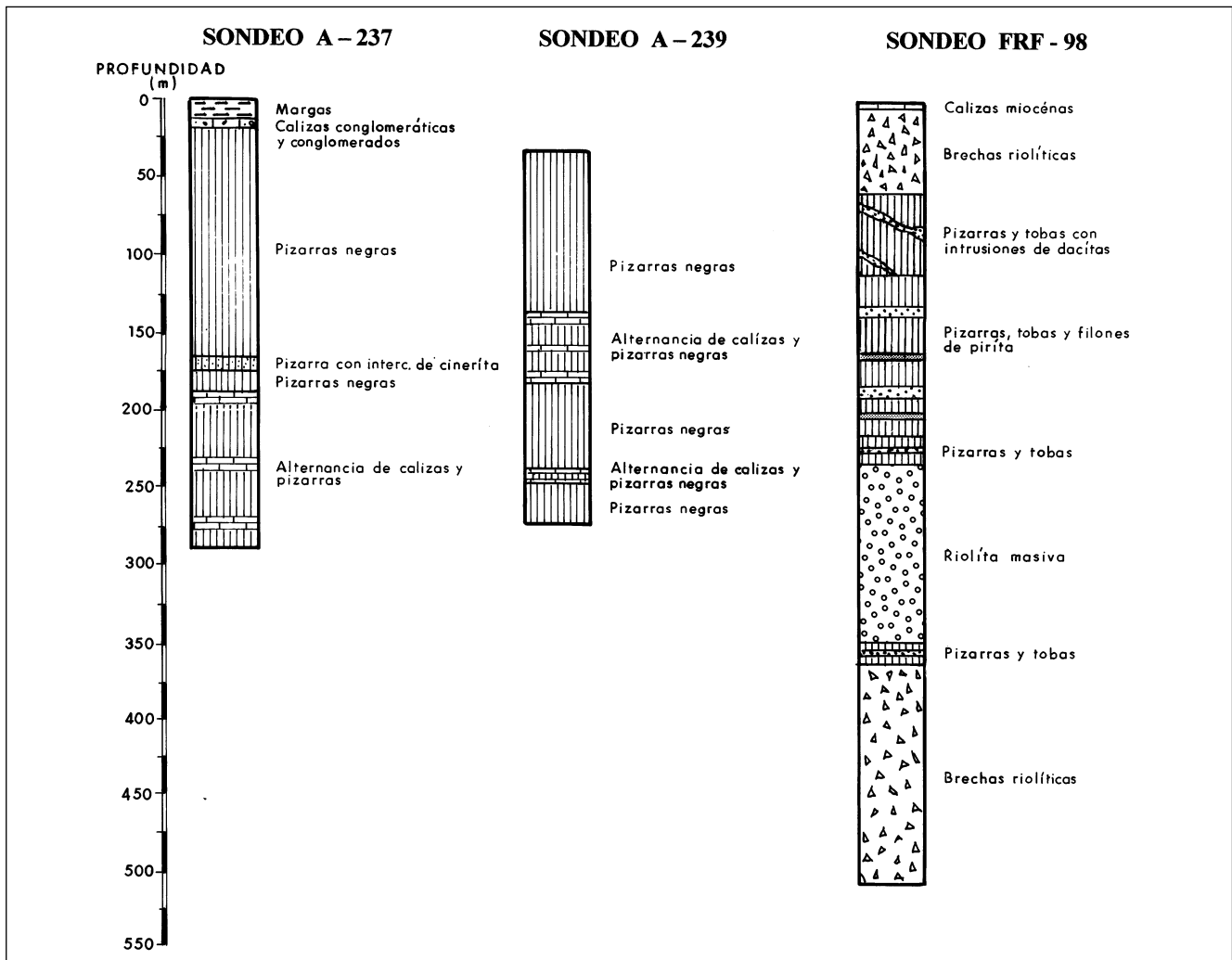
El encajamiento de la red hidrográfica, formando valles estrechos con perfiles en V, y las características geológicas e hidrogeológicas de los materiales paleozoicos existentes, así como su distribución espacial, determinan y condicionan el modelo de funcionamiento hidrodinámico de este sistema y su relación con las formaciones geológicas situadas en su entorno.

Las formaciones paleozoicas están representadas por un conjunto de unidades, cuyas principales características han sido definidas en diferentes reconocimientos, especialmente en los trabajos llevados a cabo por la propiedad minera y por el ITGE/IGME en el marco del programa de cartografía geológica nacional MAGNA a escala 1:50 000 (IGME, 1978; 1983).

La información minera se concentra en el entorno de la explotación, lo que da una visión tridimensional importante, pero muy restringida en relación con el área de posible influencia de la actividad minera y centrada en el cuerpo mineralizado. Algunos de estos datos se han contrastado recientemente mediante sondeos mecánicos (Figura 11.6) realizados en las proximidades de las cortas; se dispone así mismo de la información geológica obtenida del túnel de reconocimiento construido con el objeto de estudiar la mineralización de la actual mina Los Frailes. Esta



11.5.- Situación de los sondeos de reconocimiento geológicos y piezométricos en relación a la geología local del entorno de las cortas.

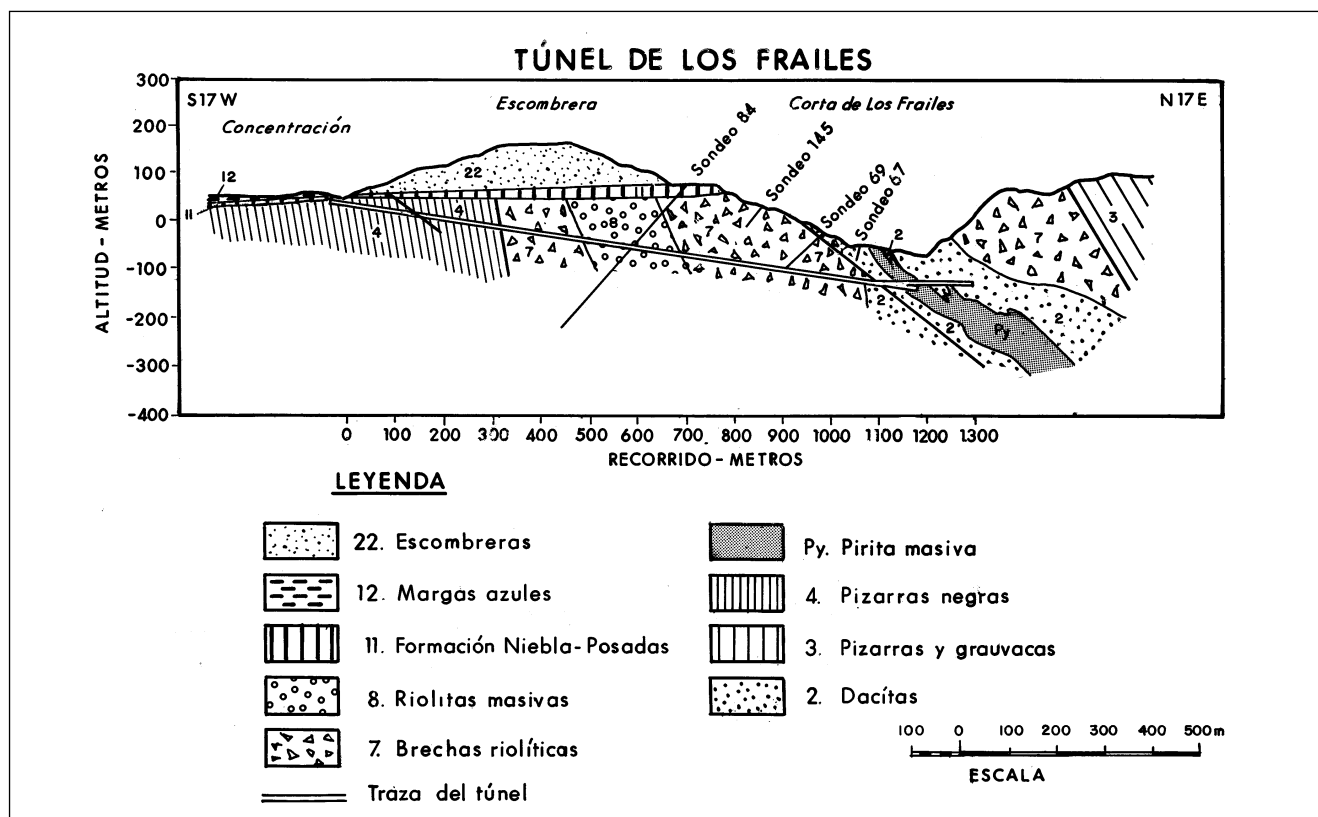


11.6.- Columna litológica de los sondeos A-237, A-239 y FRF-98. Véase la situación en la figura 11.1 (modificada a partir de datos de Boliden-Apirsa).

galería se inicia al norte de la planta de concentración, está excavada en rampa descendente con 8° de inclinación. Tiene una orientación N17E y una longitud de 1300 m (figura 11.7).

Si bien la información derivada de la cartografía geológica existente es importante, ésta se reduce al conocimiento areal de las formaciones aflorantes, sin entrar prácticamente en establecer el enraizamiento y distribución espacial de las diferentes unidades litoestratigráficas. Por tanto falta información que permita localizar con precisión las formaciones existentes, especialmente si se trata de dilucidar las posibilidades del transporte de contaminantes.

La litología de los materiales fuertemente deformados presenta gran diversidad. Sus rasgos principales pueden resumirse en un conjunto definido, de acuerdo con la bibliografía regional (Quesada et al., 1991) como Grupo Filítico Cuarcítico, constituido por alternancias de pizarras y areniscas con claro predominio de las pizarras, en las que se intercalan minoritariamente cuarcitas y niveles de calizas, y por una serie de pizarras negras y de calizas bioclásticas algo arenosas de tonos oscuros (Figura 11.8). El tramo de pizarras tiene una potencia variable, pero siempre superior a 300 m. Las calizas aflorantes en el canal de derivación del río Agrio tienen una potencia de 50 m, pero disminuye hacia el Este,



11.7.- Corte geológico a lo largo de la traza del túnel de reconocimiento minero de la corta Los Frailes (modificado a partir de datos de Boliden-Apirsa).

siendo de 12 m en el sondeo A-237 y de 1 m debajo del puente sobre el arroyo de los Frailes de la carretera que une la mina con el municipio de Gerena.

Concordante con este Grupo Filítico-Cuarcítico se superpone el Complejo Volcánico-Sedimentario, consistente en rocas que van desde felsíticas a máficas. Su potencia varía desde su ausencia total a más de 800 m.

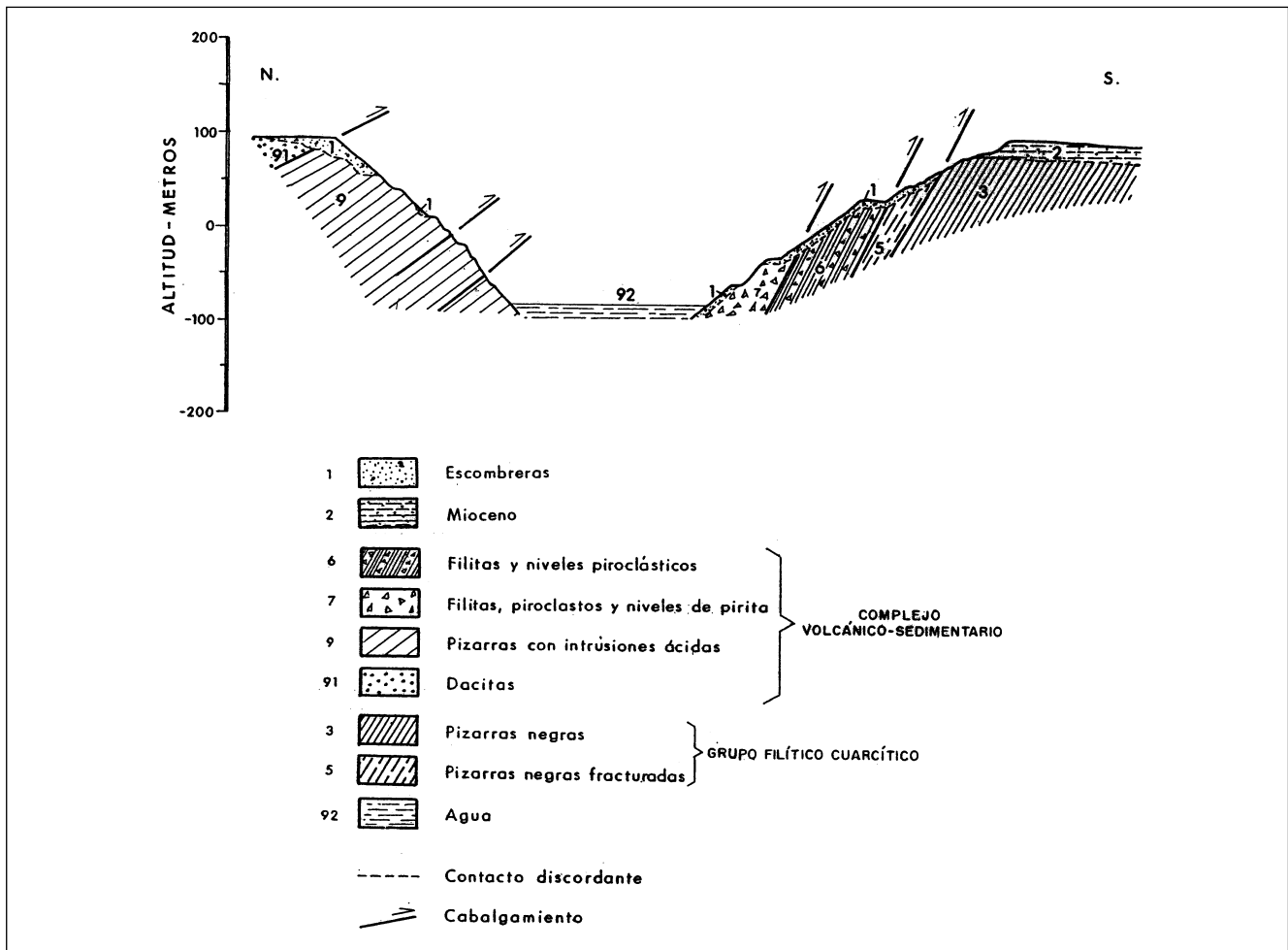
En el reconocimiento geológico llevado a cabo (Golder Associates-AURENSA, 1998) a lo largo del túnel (Figura 11.7) se ha observado que los 320 m primeros están excavados en pizarras negras. De éstas se pasa por fallas a las brechas riolíticas. A partir de los 396 m las brechas pasan a ser monomíticas y se hacen más masivas, pasando a riolitas compactas hasta el final del tramo visitado.

Las rocas presentes en la zona muestran en general un elevado grado de deformación, que depende de su naturaleza litológica y de la unidad estructural en que se encuentran. Se presentan esquistosidades, pliegues, fallas y cabalgamientos, así como varios sistemas de diaclasas, la mayor parte de ellos originados durante la orogénia alpina.

En general, todos los materiales de edad paleozoica están incluidos en un conjunto de unidades tectónicas de dirección dominante Este-Oeste, con buzamiento principal hacia el Norte.

Características hidrogeológicas de los materiales paleozoicos

En términos generales los materiales paleozoicos descritos anteriormente se pueden considerar



11.8.- Corte geológico N-S por el centro de la corta Aznalcóllar (modificado de Boliden-Apirsa, 1997).

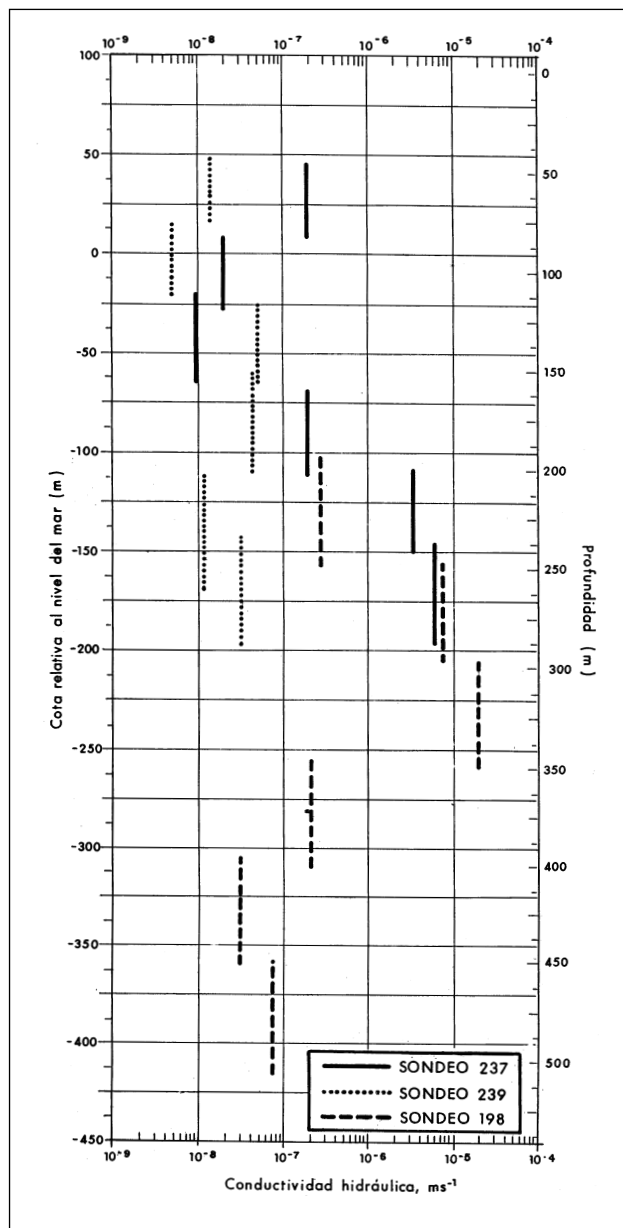
como formaciones geológicas de baja permeabilidad, con valores de la conductividad hidráulica en torno a 10^{-9} m s^{-1} . No obstante, esos valores pueden aumentar localmente por la presencia de fallas, fracturas o diaclasas conectadas frecuentemente entre sí, aunque en ocasiones pueden estar rellenas de materiales arcillosos. Las rocas de origen volcánico (riolitas y dacitas) y las calizas existentes en la zona presentan permeabilidad mayor, mientras que las pizarras negras y las brechas riolíticas presentan menor permeabilidad, pudiéndose asimilar a una barrera impermeable.

Los valores de conductividad hidráulica se han obtenido por medio de ensayos tipo "slug", pulso e inyección a caudal constante, en seccio-

nes aisladas mediante obturadores a distintas profundidades, en varios sondeos de investigación (Golder Associates-AURENSA, 1998). Los resultados se muestran en la figura 11.9.

En el sondeo A-237 el rango de valores de la conductividad hidráulica se sitúa entre $9 \cdot 10^{-9}$ y $6 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$. Analizando los datos 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 $6 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$.

En el sondeo A-239 los valores de conductividad



11.9.- Valores de la conductividad hidráulica deducida de ensayos en los sondeos A-237, A-239 y FRF-98 (1998). Véase la situación en la figura 11.1 y la columna litológica en la figura 11.6 (según Golder Associates-AURENSA 1998).

hidráulica oscilan entre $6 \cdot 10^{-9}$ y $6 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$. 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 alternan-

cia de éstas con niveles de caliza bioclástica (figura 11.6).

En el sondeo FRF-98, de mayor profundidad que los anteriores, se han realizado ensayos hidráulicos a partir de 194,6 m de profundidad. Las conductividades hidráulicas obtenidas varían entre $2 \cdot 10^{-8}$ y $1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Las brechas riolíticas presentan los valores de conductividad hidráulica menores, del orden de 10^{-8} m s^{-1} . En los ensayos llevados a cabo en el paquete constituido por riolitas masivas se observan valores más altos de permeabilidad, del orden de 10^{-5} m s^{-1} .

En agosto de 1997, en la zona Este de la corta de los Frailes Golder Associates-Aurensa (1998) realizaron la testificación hidráulica de 6 sondeos de investigación correspondientes a las referencias P1, P3, P5, P8, P9 y P10 (ver figura 11.1). La columna litológica atravesada en los sondeos P1 y P3, con una profundidad de 153 m, está constituida básicamente por tobas volcánicas correspondientes a materiales del Complejo Volcano-Sedimentario, con unos valores de conductividad hidráulica entre $1,2 \cdot 10^{-6}$ y $5,8 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$.

Los sondeos de reconocimiento P5, P8, P9 y P10, con profundidades en torno a 150 m y situados en la zona Noreste de la corta de Los Frailes y al Este del río del mismo nombre, atraviesan predominantemente materiales constituidos por pizarras pertenecientes al muro del Grupo Filítico-Cuarcítico, con valores de conductividad hidráulica entre $4 \cdot 10^{-6}$ y $5 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$.

Funcionamiento hidrodinámico de los materiales paleozoicos

Es difícil definir el modelo de funcionamiento hidrogeológico de un sistema tan complejo, especialmente por la falta de datos y la no disponibilidad de otros. Sólo se dispone de información razonable de tres sondeos profundos realizados con este fin en un área de unos 20 km^2 del entorno de la mina. Se trata de un conjunto de materiales paleozoicos, considerados globalmente de baja permeabilidad, aunque existen localmente litologías más permeables como las riolitas masivas que se extienden hacia el Este, por debajo y al Sur de las unidades mineralizadas de Aznalcóllar y Los Frailes.

Los datos piezométricos elaborados por Golder Associates-AURENSA (1998) definen en estado natural una posible divisoria hidrogeológica local situada al sur de las cortas, coincidente con la línea de afloramiento de las pizarras negras, dando lugar a un flujo en sentido norte y otro en sentido sur. No obstante, con la información disponible no puede asegurarse la continuidad de este umbral hacia el este, ni decidirse si hay o no conexión hidráulica de la corta de Los Frailes con el río del mismo nombre.

El régimen hídrico natural en la zona se ha visto alterado por la presencia de la intensa actividad minero-industrial que se viene desarrollando en la zona desde la década de 1950 y que ha necesitado para su explotación el bombeo de caudales importantes de agua. Existen cuatro minas abandonadas, tres de ellas subterráneas: Higuera, los Silillos y Cuchichón, conectadas a distintos niveles de profundidad, y una superficial, la corta Aznalcóllar, que alcanzó una profundidad de 275 m (de los cuales 175 m se sitúan por debajo del nivel del mar) y una mina activa, la corta Los Frailes, con más de 100 m de profundidad en la actualidad, estando previsto que alcance los 360 m. A estas labores mineras hay que añadir el bombeo en el túnel de reconocimiento, el desvío del río Agrio a su paso por la corta de Aznalcóllar y el previsto para el arroyo de Los Frailes.

Todas estas actividades han modificado el funcionamiento hidrodinámico natural. Así la presencia de las cortas Aznalcóllar y Los Frailes, con profundidades de varias decenas de metros, han inducido a una distorsión en la superficie piezométrica, dando lugar en el entorno de dichas cortas a la presencia de un doble cono invertido donde concurren las líneas de flujo, desde las formaciones paleozoicas hacia esa zona, y desde la corta Aznalcóllar a la de Los Frailes, cuyo nivel piezométrico se encuentra a mayor profundidad a causa de la explotación minera.

11.3. El acuífero Niebla-Posadas en el entorno del Guadamar

C. Mediavilla

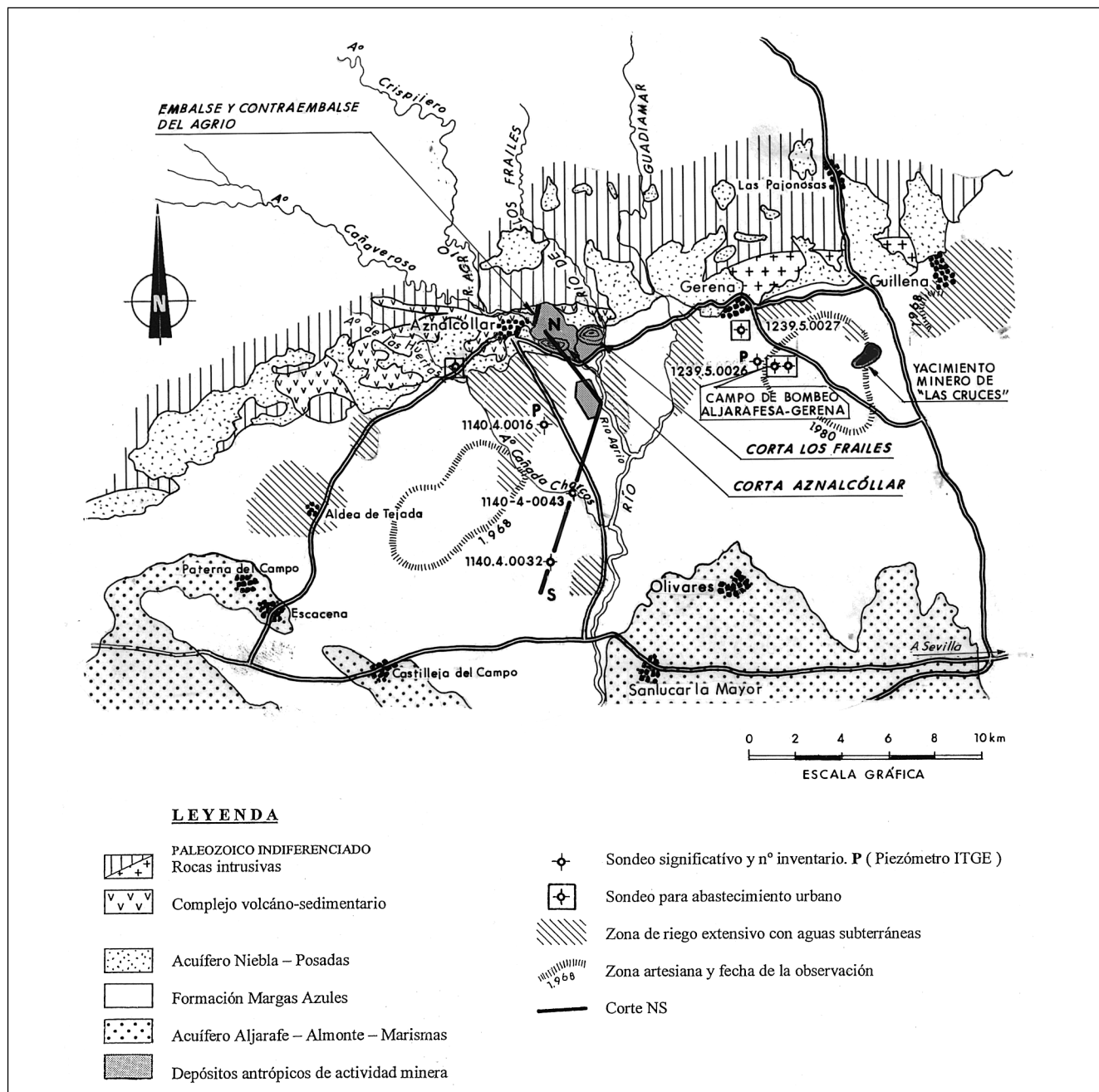
El sistema hidrológico del río Guadamar y sus afluentes el río Agrio y el arroyo de Los Frailes se

sitúa en el extremo oriental de la Faja Pirítica Ibérica donde se localizan las cortas mineras Aznalcóllar y Los Frailes, dentro de la explotación minera de Boliden Apirsa, S.L. En este área se distinguen dos conjuntos sedimentarios distintos: uno de materiales paleozoicos fuertemente deformados que ocupan el sector septentrional, que ha sido descrito en el apartado anterior, y otro formado por sedimentos miocenos y cuaternarios sin apenas deformación. Estos se extienden por el sector meridional, recubriendo los materiales paleozoicos. Entre las litologías existentes en este entorno tan sólo pueden considerarse como acuífero las terrazas y aluviales de los ríos Agrio, Frailes y Guadamar, y los materiales que constituyen la Unidad Hidrogeológica Niebla-Posadas. La utilización de la antigua corta Aznalcóllar como depósito de los lodos vertidos al Guadamar como consecuencia de la rotura de la balsa, y de los lodos del concentrador tras la nueva fase de explotación iniciada en la corta Los Frailes, exige un tratamiento hidrogeológico de detalle e integral para todos los materiales presentes en superficie y en el subsuelo de este entorno minero.

A continuación se describen las características hidrogeológicas del acuífero Niebla-Posadas, en el área próxima a Aznalcóllar, así como su participación en el modelo hidrogeológico conceptual integral, al estar conectado hidráulicamente, en mayor o menor medida, con los aluviales, escombreras, e incluso con el paleozoico y las margas azules. En realidad todo el modelo conceptual se debe entender como el conjunto de diferentes materiales con diferentes permeabilidades afectados por la recarga, topografía y descarga que condicionan el movimiento del agua subterránea en este entorno.

Descripción general del acuífero Niebla-Posadas

El acuífero Niebla-Posadas se localiza en el contacto de la Meseta Castellano-Manchega con la Depresión del Guadalquivir, aflorando entre ambas localidades con una anchura media del orden de los 2 km y una cierta continuidad lateral (figura 11.10). Administrativamente es designada en el Plan Hidrológico del Guadalquivir como Unidad Hidrogeológica Niebla-Posadas 05-49. Sin embargo, los materiales que constituyen esta



11.10.- Mapa geológico simplificado (IGME, 1978, 1983) y de usos del acuífero Niebla-Posadas en el entorno de la cuenca alta y media del Guadimar.

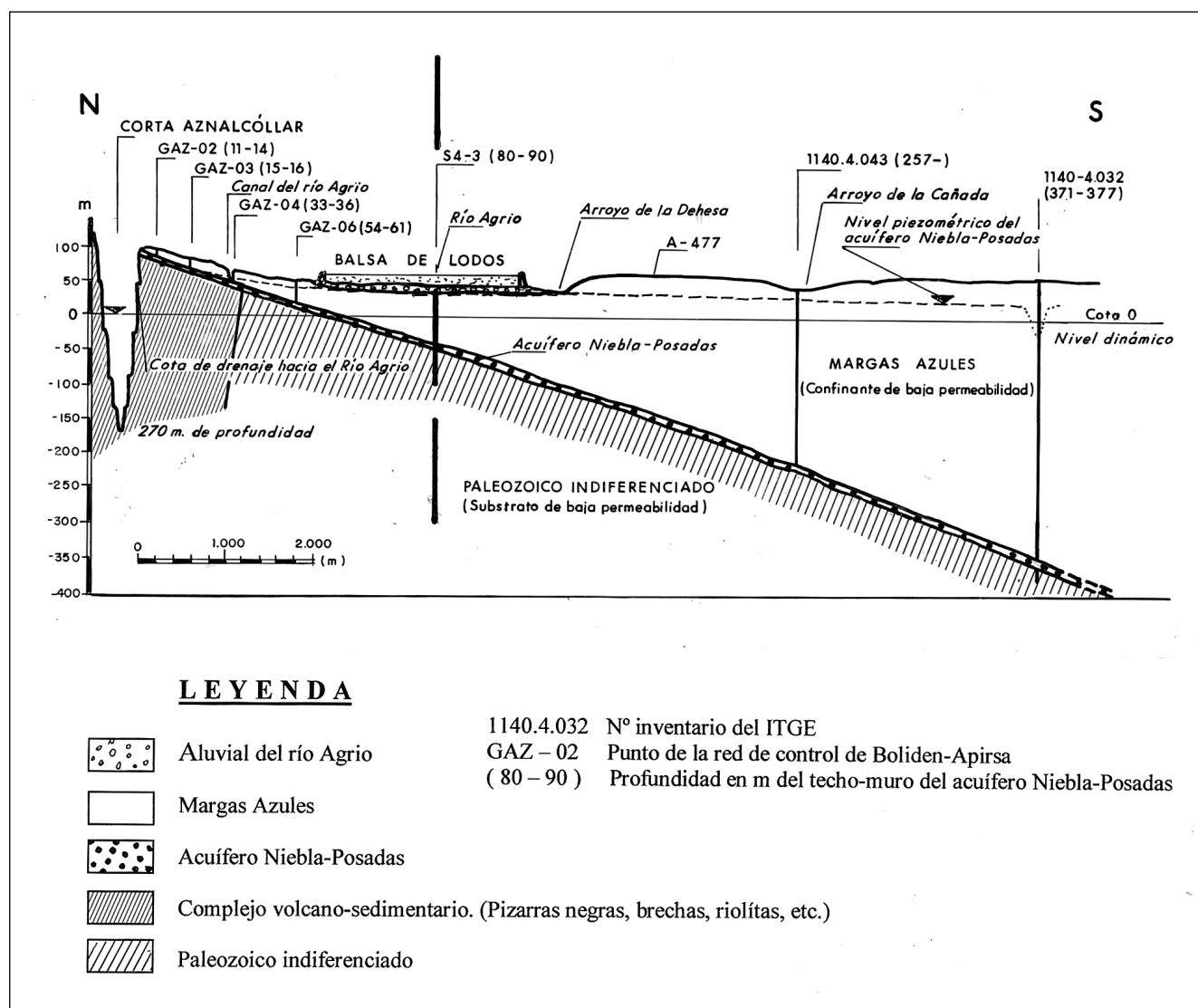
formación aparecen a lo largo de 400 km, desde las proximidades de Ayamonte (Huelva) hasta Beas de Segura (Jaén), adoptando diversas denominaciones locales, que se definió e integró con anterioridad como Sistema Acuífero 26 “Mioceno transgresivo de base” (IGME, 1984).

En términos generales los niveles permeables presentan una facies asociada a los sedimentos basales de la transgresión miocena, entre los que predominan conglomerados, arenas y calizas detríticas y orgánicas, depositados discordantemente sobre un paleorrelieve paleozoico cuyos

afloramientos constituyen el límite septentrional del acuífero. Hacia el Sur y a techo del acuífero se sitúan concordantes los materiales margosos de la formación denominada Margas Azules, que confieren un marcado carácter confinado a este sector del acuífero. Dicha formación constituye el principal relleno de la Depresión del Guadalquivir, con potencias progresivamente crecientes (figura 11.11), que llegan a superar los 1000 m al Sur de Aznalcázar. La continuidad del acuífero Niebla-Posadas en profundidad hacia el Sur, más allá de la zona conocida de explotación,

ha sido deducida por métodos indirectos, al aplicar técnicas geofísicas para detectar el contraste resistivo del zócalo paleozoico, pero sin precisar la potencia del acuífero. Su presencia está constatada sólo puntualmente por algunos sondeos de investigación de petróleo que no entran en valorar sus características hidrogeológicas (IGME, 1987).

La UH Niebla-Posadas está considerada por el Plan Hidrológico del Guadalquivir como de "uso prioritario para abastecimiento humano" puesto



11.11.- Corte geológico-hidrogeológico N-S desde la corta Aznalcóllar hasta las proximidades de San Lúcar la Mayor. Ver la situación de los sondeos en la figura 11.1.

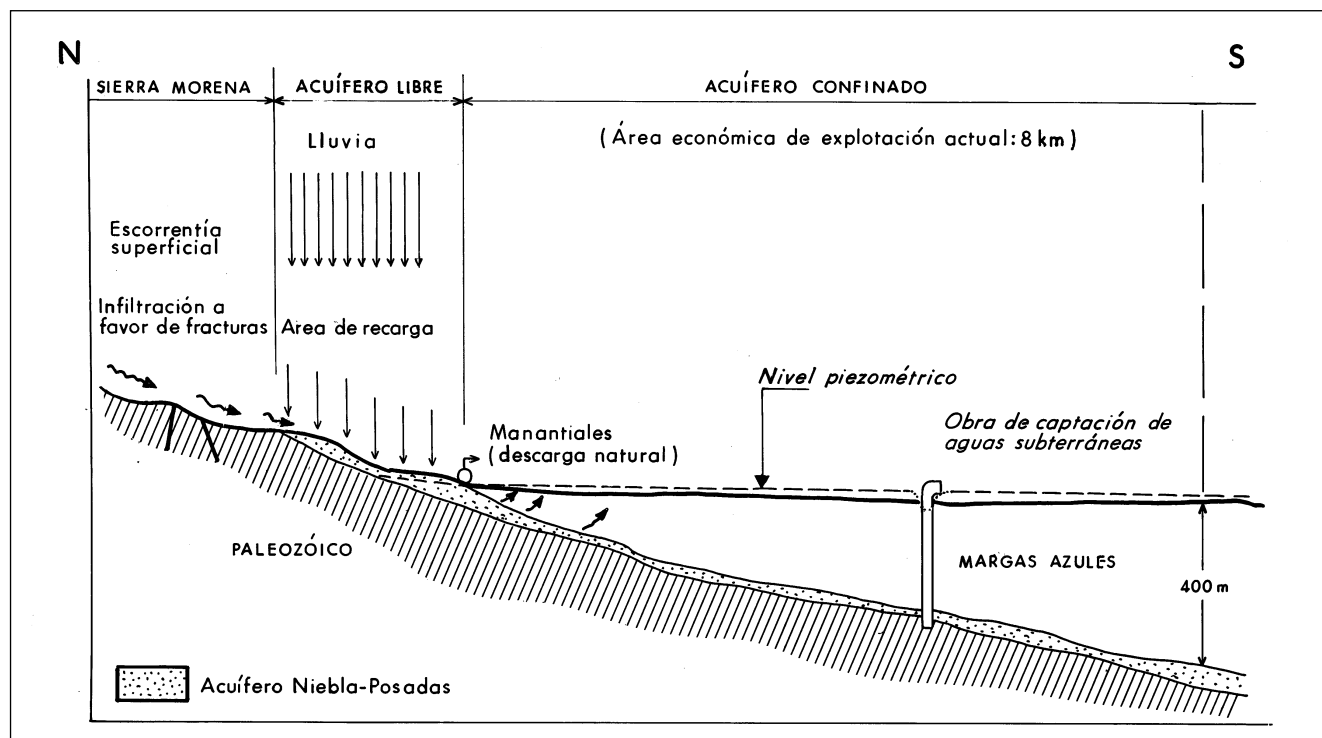
que por sus peculiares características, aun considerando su compartimentación y cierta desconexión lateral, constituye el acuífero del que se abastecen gran número de poblaciones que jalonan el contacto Sierra Morena-Valle del Guadalquivir.

Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero Niebla-Posadas en el entorno del Guadimar

Los materiales que aparecen en este sector del acuífero Niebla-Posadas presentan dos litologías distintas. Una inferior de carácter continental, con conglomerados poligénicos e intercalaciones de arenas y limos que se depositaron rellenando un acusado paleorrelieve, con potencias que superaban los 100 m antes de la erosión post-miocena, pero con una escasa e irregular distribución en el entorno de las cortas. Y otra superior marina, bien representada en la zona, de carácter transgresivo, que da lugar al depósito de una serie de calizas conglomeráticas o arenosas, a

veces lumaquéllicas, algo recrystalizadas, con abundantes fósiles de algas, equinodermos, foraminíferos, etc., que se depositó concordante con el tramo anterior durante el Tortoniense superior (Mioceno superior).

En el entorno de Aznalcóllar el conjunto de estos materiales afloran con cierta continuidad a lo largo de una estrecha franja cuya anchura varía entre 1,5 y 3 km, y en niveles aislados sobre materiales paleozoicos, con potencias que varían entre 10 y 20 m, hasta acunarse o desaparecer lateralmente y/o en profundidad, a favor de un marcado paleorrelieve. El sondeo de explotación más meridional conocido tiene una profundidad de 386 m, en el que se cortó un nivel de 6 m (371 a 377 m) de areniscas calcáreas muy cementadas y gravas sobre arcillas rojas abigarradas, posiblemente del Trías, con un caudal de 30 L/s y una temperatura de 40° C. Este sondeo se localiza a 8 km del afloramiento y ha sido inventariado por el IGME (n° 114040432). Los descensos piezométricos debidos a la explotación son de unos 80 m.



11.12.- Esquema hidrogeológico del funcionamiento en sección vertical N-S del acuífero Niebla-Posadas en la franja que pasa por Aznalcóllar, en estado natural.

En sus inmediaciones se han perforado 3 nuevos sondeos de similares características.

Así pues, la geometría del acuífero puede asimilarse a un cuerpo que presenta un buzamiento entre 2° y 4° hacia el sureste, confinado entre los materiales paleozoicos a muro, y las margas azules a techo, ambos con un comportamiento hidrogeológico regional de carácter general muy poco permeable (figura 11.12). El acuífero funciona como libre cuando aflora y ocasionalmente también en zonas de cabecera cuando el nivel piezométrico está por debajo del muro de las margas azules. Según los datos de inventario del IGME, hasta la década de 1980 era relativamente frecuente su artesianismo en un amplio sector al Sur de Aznalcóllar. Los parámetros hidráulicos son muy variables, en función de las diferentes litologías, con transmisividades que oscilan entre 80 y 500 m² d⁻¹.

La recarga del acuífero Niebla-Posadas se produce por infiltración directa del agua de lluvia caída sobre la superficie de afloramiento y a partir de la recarga inducida por la escorrentía superficial de las cuencas paleozoicas al circular sobre el acuífero, siempre y cuando los niveles piezométricos estén por debajo de la superficie topográfica. En régimen natural las descargas del sistema se producen por manantiales y de forma difusa hacia los cauces y aluviales de los ríos Guadamar, Frailes y Agrio en los puntos topográficamente más bajos.

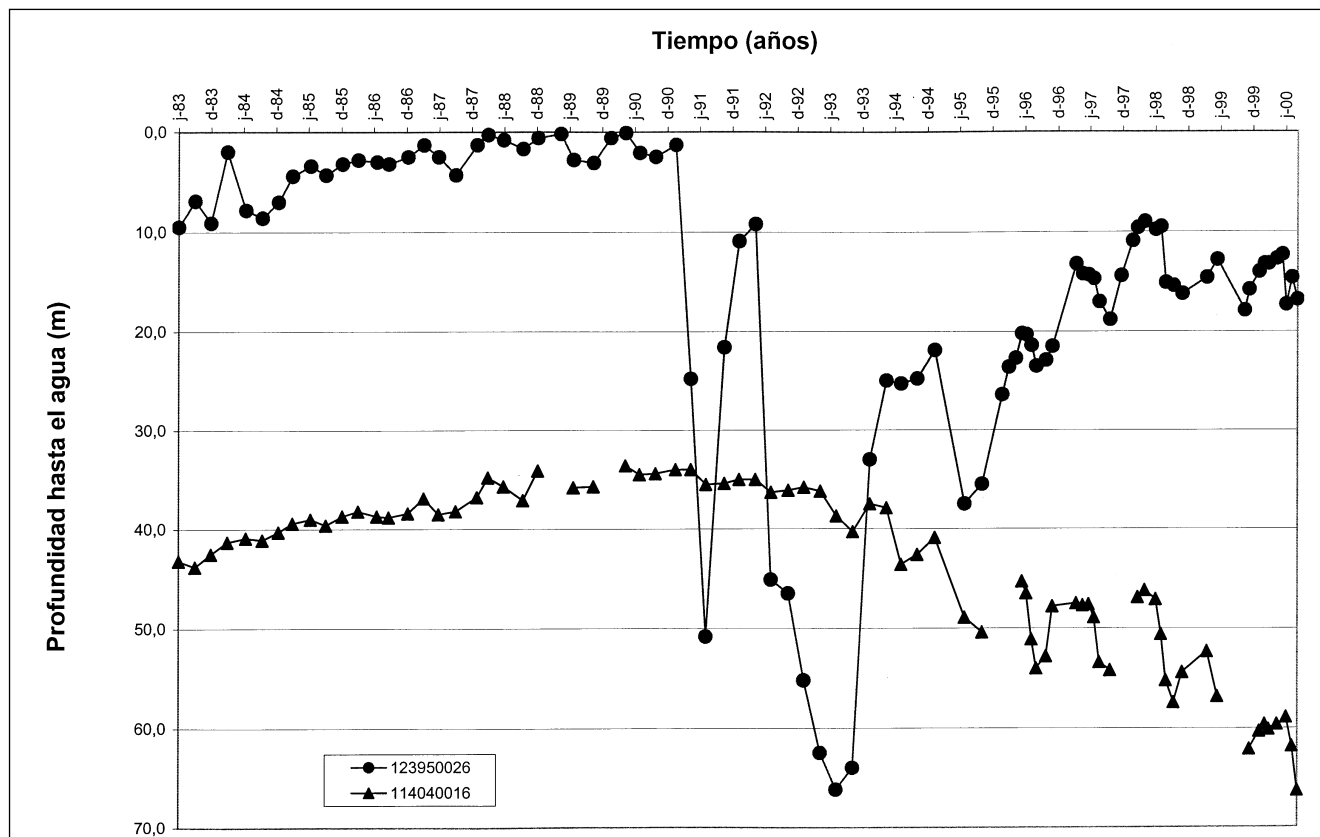
En el entorno de Aznalcóllar el uso prioritario del agua del acuífero es para regadío de apoyo de unas 1000 ha de explotaciones agrarias dedicadas mayoritariamente al cultivo extensivo de invierno, que se localizan al sur y suroeste de la zona minera, con un consumo del orden de 2,5 hm³/a, según el inventario de regadíos de Andalucía. Otras zonas de riego más alejadas se sitúan en Aldea de Tejada (500 ha con 1,5 hm³/a) y entorno de Gerena-Guillena (1000 ha con 2,3 hm³/a). La explotación para abastecimiento urbano se concentra en el campo de bombeo que Aljarafesa posee en el área de Gerena, con una capacidad conjunta de bombeo que supera los 100 L/s; actualmente la puesta en funcionamiento está subordinada a la disponibilidad de recursos superficiales regulados para el sistema de abastecimiento a Sevilla. Durante la década de 1990 el

piezómetro 1139 5 0026 registró descensos de hasta 50 m coincidiendo con los episodios de mayor sequía y eventos de la Exposición Universal de Sevilla 1992 (figura 11.13). En la actualidad esta infraestructura de bombeo no se utiliza, dado su carácter de reserva. Así en estos momentos la explotación real para abastecimiento urbano está en torno a los 0,55 hm³/a repartidos entre Gerena (0,45 hm³/a) y Aznalcóllar (0,1 hm³/a) como complemento al abastecimiento desde el embalse del Agrio.

En los datos de la red de control de la calidad establecida por el IGME sobre los abastecimientos urbanos de Gerena y Aznalcóllar se observa que las aguas son bicarbonatadas a bicarbonatado-cloruradas cálcicas, cálcico-magnésicas o cálcico-sódicas. Se trata de aguas duras a muy duras, de mineralización débil a media, y residuo seco entre 0,5 y 2 g/L. Hacia el Sur del acuífero la mineralización aumenta progresivamente y las aguas pasan a ser cloruradas sódicas.

En régimen natural el acuífero Niebla-Posadas era surgente en extensas áreas al sur de Aznalcóllar, como lo atestiguan los datos del inventario. En régimen influenciado los bombeos constituyen una de las principales salidas del sistema, lo que puede provocar modificaciones significativas en el comportamiento hidrogeológico de las diferentes formaciones. La relación hídrica acuífero-río puede llegar a invertirse y se pueden establecer flujos entre distintos niveles, dependiendo de los niveles piezométricos relativos entre el acuífero Niebla Posadas, las margas azules y el Paleozoico. Así se puede producir una recarga adicional, posiblemente pequeña, al acuífero cautivo en aquellas zonas en las que el nivel piezométrico de los materiales poco permeables que lo confinan esté por encima del nivel piezométrico del acuífero.

La modelación numérica del funcionamiento hidrogeológico de este sector del acuífero, además de los trabajos que se exponen en el apartado 11.4, ha sido realizado por Boliden-Apirsa utilizando el código matemático tridimensional MODFLOW-88, con algunas variaciones para poder reproducir un modelo que responda a tres capas; margas azules, acuífero Niebla-Posadas y paleozoico, que a su vez contempla los resultados del modelo hidrogeológico desarrollado por



11.13.- Evolución piezométrica en los puntos 1140 4 0016 y 1239 5 0026 de la red de control del IGME en el acuífero Niebla-Posadas, sector de Aznalcóllar-Gerena. Ver la situación de la figura 11.10.

Boliden-Apirsa (1999) para el entorno de las cortas mineras. Dicho modelo está siendo retocado y mejorado en el momento de redactar este capítulo. Se pretende simular la relación entre los niveles piezométricos del entorno de las cortas Aznalcóllar y Los Frailes, el túnel de reconocimiento del yacimiento minero de Los Frailes y los acuíferos Niebla-Posadas y aluviales en este sector. Para la calibración hidráulica en el período 1990-1999 tan sólo se dispone de las series completas de dos piezómetros controlados por el IGME (1140 4 0016 y 1239 5 0026), éste último muy marginal, en Gerena, y el apoyo de otra decena de puntos medidos durante el último semestre de la simulación, para una superficie modelada de 192 km². Sin embargo la incorporación de otras observaciones y la caracterización hidrogeoquímica e isotópica ambiental puede ayudar a esa calibración. Ésta es la fase actual de los trabajos.

Riesgos de afección al acuífero Niebla-Posadas en el área de Aznalcóllar

Existen dos escenarios principales de afección al acuífero Niebla-Posadas a partir de la migración de los contaminantes almacenados en la corta Aznalcóllar. El primero es a través del flujo subterráneo desde la corta Aznalcóllar hacia la corta Los Frailes a través de los materiales poco permeables del paleozoico, y desde ésta hacia el acuífero Niebla-Posadas y aluvial de Los Frailes. Sin embargo, la presencia entre ambas cortas de una banda de riolitas fracturadas de mayor permeabilidad (10^{-5} - 10^{-6} m s⁻¹), y su posible continuidad hacia el este de la corta Los Frailes, favorecería el transporte de los contaminantes. El segundo escenario hace referencia al cierre y abandono definitivo de la explotación minera, sin bombeos, una vez que se recuperen los niveles naturales de agua en ambas cortas a partir de los

aportes tanto superficiales como subterráneos. Si aumentarían los niveles de la lámina de agua en las cortas Aznalcóllar y Los Frailes por encima de 48 y 46 m sobre el nivel del mar, respectivamente, se produciría un vertido de agua contaminada hacia los antiguos cauces de los ríos Agrio y Los Frailes. El aluvial de éste último está en contacto con la formación Niebla-Posadas.

Actualmente la mayor afección se está produciendo como consecuencia de toda la serie de actividades mineras desarrolladas sobre los afloramientos de la cabecera del propio acuífero, que constituye su principal área de recarga. Así, buena parte de las actuales escombreras, que ocupan una superficie del orden de las 300 ha, están depositadas sobre 100 ha del acuífero Niebla-Posadas. Inicialmente fueron construidas sin considerar la generación de drenaje ácido a partir de la oxidación y lavado de las rocas “estériles”. Por esta razón constituyen un foco permanente de contaminación de aguas ácidas y metales pesados hacia el acuífero carbonatado. Cabe esperar que la movilidad real de esos metales pesados sea pequeña a causa de la naturaleza del medio, pero no se conocen estudios específicos in situ.

El aumento de los bombeos en el acuífero Niebla-Posadas en el entorno de Aznalcóllar puede variar el comportamiento hidrodinámico de este acuífero, favoreciendo su posible afección a través del Paleozoico. Sin embargo, este hecho estaría en función de la continuidad geológica y homogeneidad hidráulica del nivel de “pizarras negras” (de muy baja permeabilidad) que, situadas al Sur de las cortas, parecen representar una barrera hidráulica que impediría el flujo desde las cortas mineras excavadas en el Paleozoico hacia el acuífero Niebla-Posadas.

Consideraciones finales

La utilización de la corta de Aznalcóllar como adecuado emplazamiento de los residuos mineros requiere que la estructura geológica del sistema cortas Aznalcóllar-Los Frailes presente unas características hidrogeológicas e hidrodinámicas que garanticen un alto grado de estanqueidad del sistema, de tal manera que se impida el flujo de agua y el transporte de posibles contaminantes

hacia el Dominio Público Hidráulico: acuífero Niebla-Posadas en la franja frente y aguas abajo del área minera, y aluviales del Agrio y Los Frailes y, en último término, hacia los cauces superficiales de los ríos Agrio, Los Frailes y Guadamar. Se entiende que se deben cumplir los condicionantes legales en supuestos técnicamente admisibles y con riesgos socialmente asumibles.

Hasta este momento no se conoce con la suficiente precisión la geometría y distribución espacial en profundidad del acuífero Niebla-Posadas hacia el Sur y Este de las cortas, especialmente en el entorno de los ríos Los Frailes y Guadamar. Este hecho y la escasez de puntos específicos de observación piezométrica y de caracterización geoquímica e isotópica de las aguas subterráneas, dificulta la validación del modelo hidrogeológico conceptual en este entorno, especialmente en cuanto a la definición de zonas de recarga-descarga y líneas de flujo con un nivel de confianza suficiente para la toma de decisiones.

El incremento a corto y medio plazo de los bombeos en este entorno del acuífero Niebla-Posadas es un hecho que se debe considerar, si no se quieren hipotecar los recursos de este sector del acuífero como externalidad de las explotaciones mineras, que no ha sido tenida en cuenta.

Por un lado hay que considerar la demanda de agua para abastecimiento de población en el ámbito Aljarafe-Gerena, teniendo en cuenta no sólo su cantidad y su papel estratégico, sino también su calidad material, sin efectos antrópicos. Por otro lado es previsible la puesta en riego de nuevas explotaciones agrarias, incluso más al sur de las actuales. A este conjunto hay que añadir la perturbación previsible si se aborda la puesta en marcha del proyecto minero de Las Cruces que precisa deprimir 240 m los niveles piezométricos del sector sur de Gerena mediante un bombeo estimado en 200 L/s.

Todos estos factores y la incorporación de los nuevos datos resultantes de los reconocimientos que Boliden-Apirsa ha de seguir realizando en la zona, deben alimentar un modelo matemático de detalle capaz de reproducir adecuadamente el carácter tridimensional del flujo subterráneo en las proximidades de las cortas, y que interrela-

cione el Paleozoico con el acuífero Niebla-Posadas, englobando todas las formaciones de este entorno geológico.

11.4. Modelación del comportamiento del sistema paleozoico-acuífero Niebla-Posadas

A. Sahuquillo

Modelo preliminar

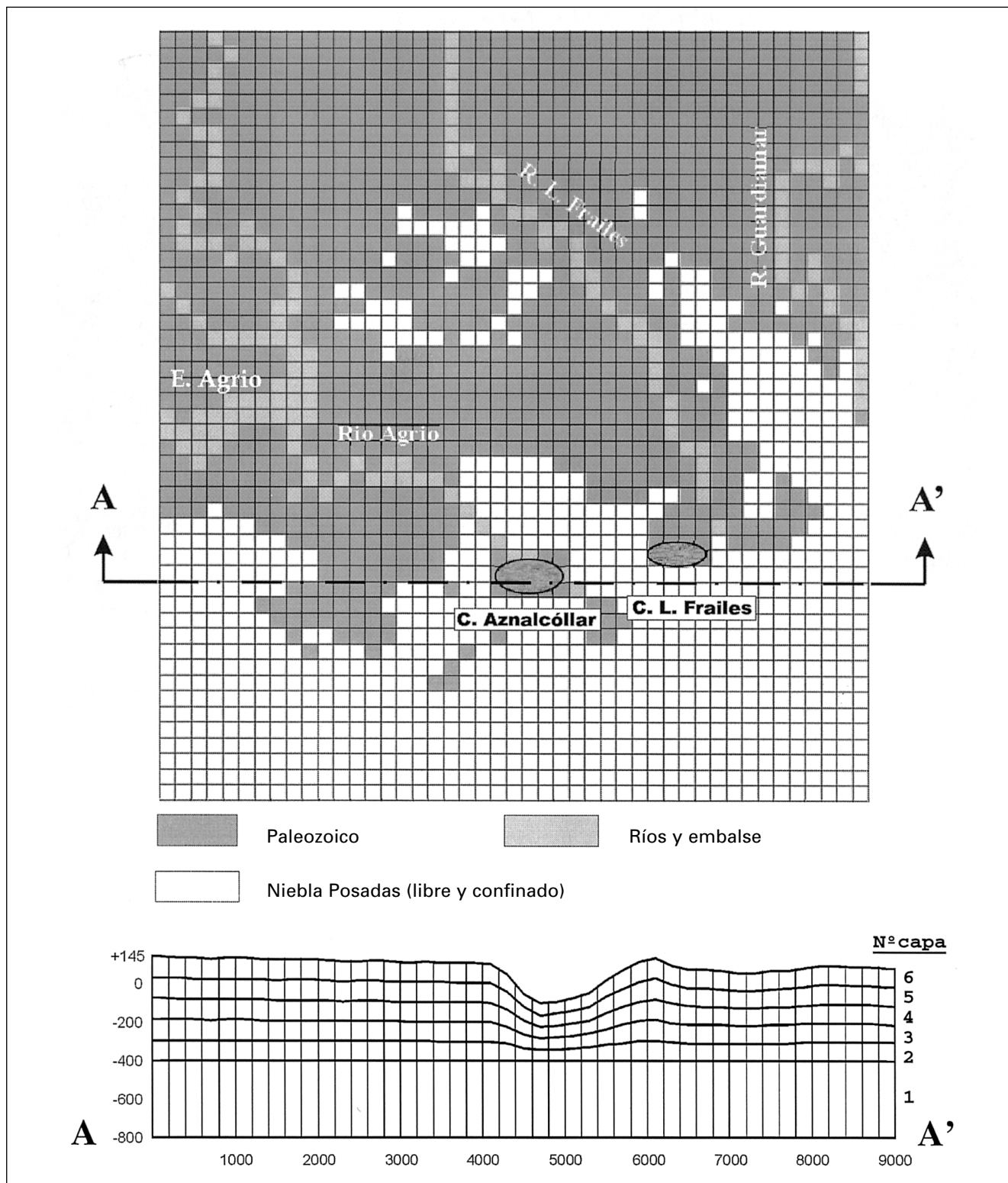
El objetivo de la modelación es el de poder llegar a disponer de un utensilio para predecir el flujo y la posible migración de metales pesados disueltos en el agua de las cortas hasta el acuífero Niebla-Posadas en el sector de Aznalcóllar, o a un cauce superficial próximo. Se ha realizado un modelo preliminar que representa una primera aproximación al conocimiento del medio, que ya ha proporcionado algunos resultados de interés. Es el que aquí se comenta. Se trata de un modelo tridimensional en diferencias finitas en régimen transitorio. Las dimensiones de las celdas son de 200 m x 200 m en planta, con espesor variable en la vertical, siendo la capa inferior la que tiene mayor espesor: 400 m. Esta capa va desde la cota -800 m hasta la -400 m. Sobre ésta, en la zona norte del modelo, donde no está presente la formación Niebla-Posadas, hay cinco capas adicionales con espesor uniforme hasta la superficie. Para conformar la superficie del terreno las celdas no tienen la misma altura a lo largo de cada capa, siendo su altura media de 104 m. Las seis capas inferiores corresponden al paleozoico. Donde está presente hay una capa adicional que representa al acuífero Niebla-Posadas, que tiene un espesor entre 0 y 10 m, siendo su valor medio de 4,4 m. La discretización en planta es de 45 celdas en la dirección E-O y 50 en la N-S, lo que hace un total de 2250 celdas por capa. En la figura 11.14 se representa un corte vertical Este-Oeste por la corta de Aznalcóllar. Si se considera que hay una capa más en los límites, necesaria para imponer las condiciones de contorno del modelo, se tiene un total de 21 573 celdas. La superficie total modelada es de 90 km².

Al estar la divisoria de cuencas mucho más al norte del modelo, se han fijado para las celdas de la cara norte unas condiciones de nivel impuesto que tratan de seguir lo que se observa o intuye

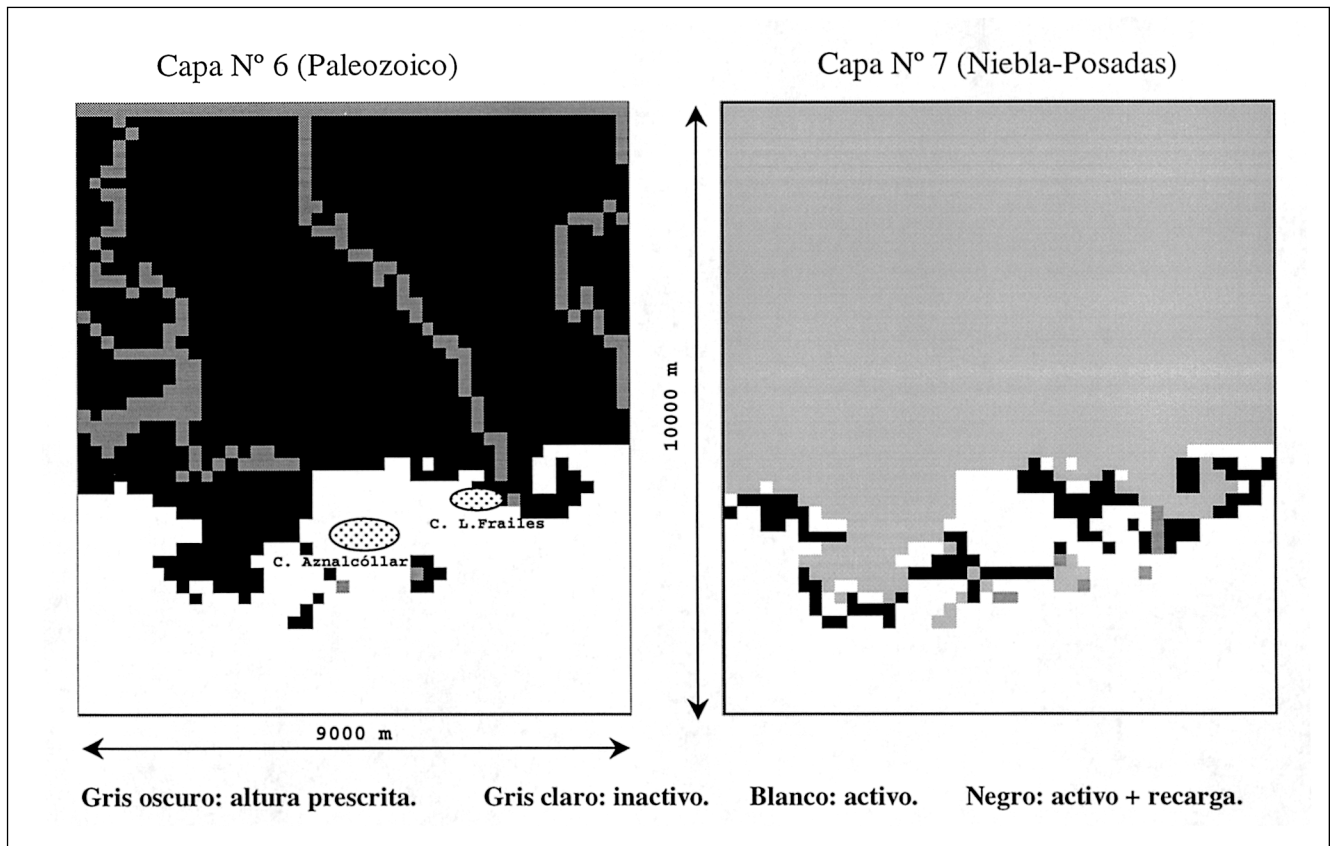
en la realidad: estar relativamente próximos a la superficie topográfica en los interfluvios, tener un gradiente vertical descendente en estos interfluvios y ascendente en el entorno de la vertical de los ríos. También se ha prescrito la altura en las celdas de los ríos Guadiamar, de los Frailes y Agrio, y en el embalse construido en ese río, para imponer la descarga del acuífero hacia los cauces. Los límites, Sur, Este y Oeste, así como el límite inferior del modelo se han considerado impermeables. Los límites E y W no coinciden con planos de corriente, pero están lo suficientemente alejados de las extracciones como para suponer que se puede admitir que no hay flujo a su través. El límite S está lo suficientemente alejado en el sentido del posible flujo como para poder hacer similar hipótesis. En cualquier caso son condiciones que se comprueban durante la simulación. En la figura 11.15 se puede ver la localización de las celdas de nivel impuesto. En el acuífero Niebla-Posadas son de nivel impuesto las celdas que coinciden con los puntos en los que lo drenan el río Agrio y el río de los Frailes, que es donde éstos atraviesan los afloramientos de la formación.

Los límites Este y Oeste no coinciden con las divisorias hidrológicas, aunque se aproximan a ellas. No obstante se ha impuesto una condición de límite impermeable. Se ha dejado para etapas posteriores el análisis de la influencia de los flujos que atraviesen esos límites y la forma de considerarlos, ya sea imponiendo límites con condición de contorno mixta, o alejándolos tras aumentar la superficie del modelo. Las conductividades hidráulicas asignadas han sido de $10^{-3.6}$ ms⁻¹ para el acuífero Niebla-Posadas, que corresponde a una transmisividad de 90 m²/día, 10^{-7} ms⁻¹ para las brechas riolíticas y pizarras negras, y 10^{-8} ms⁻¹ para resto del paleozoico. El coeficiente de almacenamiento ha sido de 0.15 para el acuífero Niebla-Posadas cuando es libre y el coeficiente de almacenamiento específico 10^{-5} m⁻¹ cuando está confinado. A los materiales paleozoicos se le ha asignado respectivamente $2 \cdot 10^{-3}$ cuando es libre y 10^{-6} m⁻¹ en las capas en que está confinado. En la figura 11.16 se da la composición litológica de la capa 6, a título de ejemplo.

Por el momento existe bastante incertidumbre en cuanto a la recarga, incertidumbre que sólo se podrá disminuir cuando se tenga calibrado un modelo en régimen transitorio. Con una modeli-



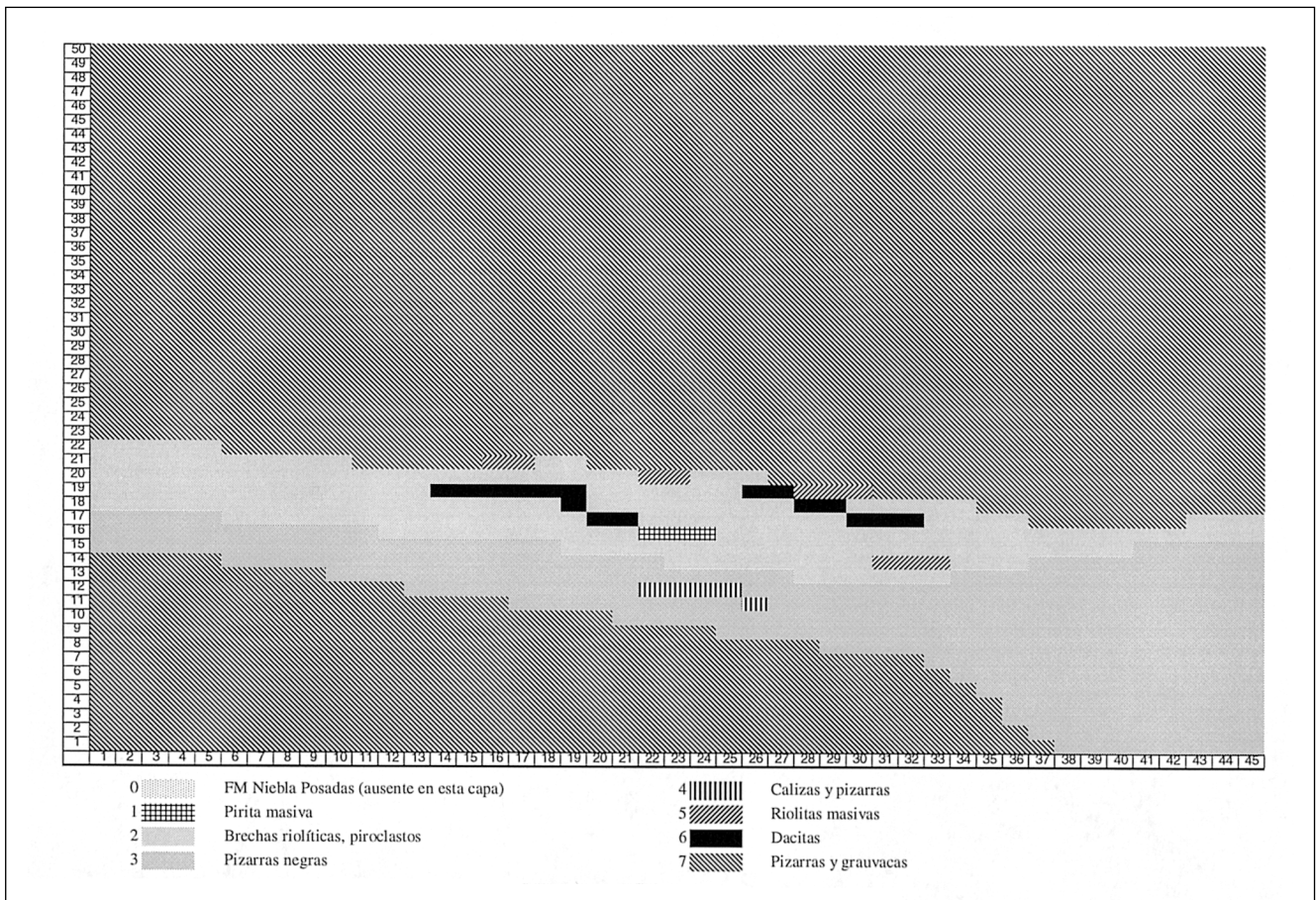
11.14.- Planta y sección vertical E-W del modelo numérico preliminar sobre el comportamiento hidrogeológico del paleozoico y del acuífero Niebla-Posadas en el entorno de Aznalcóllar. Valores en metros. En la sección no se representa la capa 7 correspondiente al acuífero Niebla-Posadas, debido a su reducido espesor, que se confunde con el grosor de la línea de techo de la capa 6.



11.15.- Condiciones de contorno y niveles impuestos en las celdas superiores del modelo numérico (capas 6 y 7).

zación en régimen permanente sólo se pueden dar valores de recarga compatibles con las conductividades hidráulicas calibradas, pero conductividades dobles o mitad requerirán valores del doble o de la mitad para la recarga. Para tener una idea del orden de magnitud de su influencia se hizo una simulación en régimen permanente para una recarga de 2 mm/año en los afloramientos del Paleozoico, y de 4 mm/año en los del acuífero Niebla-Posadas, siendo nula en la parte sur del modelo, en la que este acuífero está confinado. No se trataba de simular la recarga del acuífero, sino de probar su comportamiento ante esa acción unitaria. La primera simulación consistió en simular la piezometría media que se tendría con esa recarga antes de la excavación de las cortas mineras. Se ve claramente la influencia del drenaje de los ríos, pero los niveles alcanzados están muy poco por encima de los valles, por lo

que parece claro que para esos valores de conductividad hidráulica se requiere una recarga mayor. También se hicieron simulaciones en las que se eliminaron algunas de las celdas de nivel impuesto en los valles en la parte norte del modelo. En todas las simulaciones realizadas queda patente que hay que mantener las celdas con altura prescrita en los valles de los ríos en todo el modelo, pues en caso contrario las alturas piezométricas suben muy por encima de los cauces en las zonas en las que no se hace. De hecho no hay evidencia de que exista un drenaje permanente de los ríos al acuífero ni se conoce su posible magnitud. Aunque haya que analizar con detalle este tema, las simulaciones realizadas permiten afirmar que es verosímil que los ríos impongan un nivel de salida al acuífero a lo largo de todo su cauce, aunque pudiera ser que este nivel no se alcanzase durante ciertos períodos



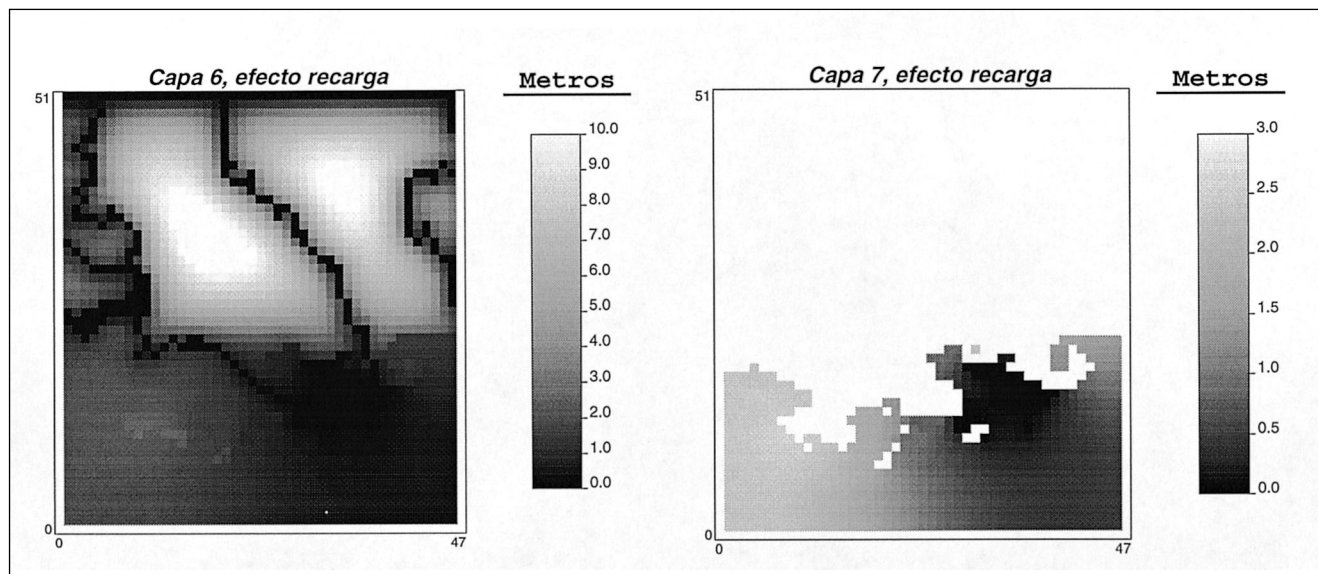
11.16.- Composición litológica de la capa 6.

secos en los tramos más elevados y con mayor pendiente.

Para analizar mejor la influencia de las variaciones de la recarga se procedió a descomponer la simulación en dos. En una de ellas la recarga es nula, obteniéndose cuales serían los niveles en el acuífero para los niveles impuestos, tanto en los ríos como en las condiciones de los contornos. La otra simulación calcula los niveles para la recarga citada, siendo los niveles impuestos de 0 m. Aunque el modelo no es estrictamente lineal, la suma de los resultados obtenidos con estas dos simulaciones reproduce prácticamente los de la primera simulación. En la figura 11.17 se puede ver el incremento de potencial que produce la recarga que se ha impuesto. Al comparar los niveles proporcionados por el modelo en el paleozoico de la zona norte, con las cotas de los

manantiales y los niveles del agua en perforaciones existentes en la mitad norte del acuífero, se deduce que la recarga que se impuso debería ser entre 5 y 10 veces mayor en el supuesto que se mantengan las mismas conductividades hidráulicas.

Las excavaciones mineras han necesitado de bombeos para mantener los niveles de agua del acuífero por debajo de la explotación. La primera corta realizada fue la de Aznalcóllar, que se inició en 1975 y terminó de operar en 1996 a una profundidad de 275 m. La corta Los Frailes comenzó a excavar en 1996 y está previsto que alcance una profundidad de 360 m. En la corta Aznalcóllar se ha supuesto que se bombeó la cantidad de agua precisa para mantener los niveles algo por debajo de la profundidad que se iba alcanzando. Para mantener en seco la corta Los Frailes se



11.17.- Incremento de la altura piezométrica sobre la posición 0 m, como consecuencia de una recarga de 2 mm/a en los afloramientos del paleozoico y de 4 mm/a en los afloramientos del acuífero Niebla-Posadas. La escala de alturas difiere en ambas figuras (capas 6 y 7) para facilitar la visualización.

bombeó desde dos pozos que llegan hasta el túnel que se perforó para exploración minera de la corta (ver apartado 11.2 y figura 11.7). Este túnel está situado por debajo de la corta en su estado actual, y será cortado cuando la misma llegue a su altitud. Además de bombear en estos pozos que llegan al túnel se precisó bombear en la misma excavación. Para analizar el efecto de estos bombeos se hicieron simulaciones en las que los niveles impuestos en el borde norte y en las celdas de río eran nulos, y también era nula la recarga de lluvia. Los niveles en las celdas localizadas en la corta Aznalcóllar se hacían descender de acuerdo a como se produjeron en el tiempo, y se introdujeron los datos de los bombeos en la corta y el túnel de Los Frailes. Tampoco es rigurosamente cierta la hipótesis de linealidad en este caso, aunque los resultados también son suficientemente aproximados. Las primeras simulaciones pusieron de manifiesto que si se mantenían como celdas de nivel constante las celdas de los ríos situadas inmediatamente al norte de las cortas, y entre éstas y el límite meridional de los afloramientos del Paleozoico, se producía una recarga demasiado grande a través de los cauces de los ríos Agrio y de Los Frailes, por lo que se decidió suprimir las celdas de nivel constante hasta una cierta distancia de las cortas. De hecho el río Agrio está desviado en el azud

localizado unos 500 m aguas abajo de la presa de Aznalcóllar construida para el suministro de agua al complejo minero y a la población. En la figura 11.18 se pueden ver los descensos obtenidos para las capas superiores del modelo al final del período de simulación: enero de 1997. Los descensos en la zona norte del modelo son insignificantes. Los descensos en el Paleozoico en la parte sur del modelo son importantes, llegando a alcanzar los 40 metros; con toda seguridad son muy superiores a los reales, pues no se encuentran esos descensos más que en zonas relativamente próximas a las cortas. También hay descensos importantes en la zona sudeste del acuífero Niebla-Posadas, donde alcanzan entre 30 y 40 metros, lo cual parece muy exagerado y se hubiese notado en los pozos de este acuífero en la zona. Parece claro que la conductividad hidráulica de las pizarras negras, o al menos la de su parte más oriental, parece ser sensiblemente menor a la introducida en el modelo, lo que se ha tenido en cuenta para los análisis posteriores.

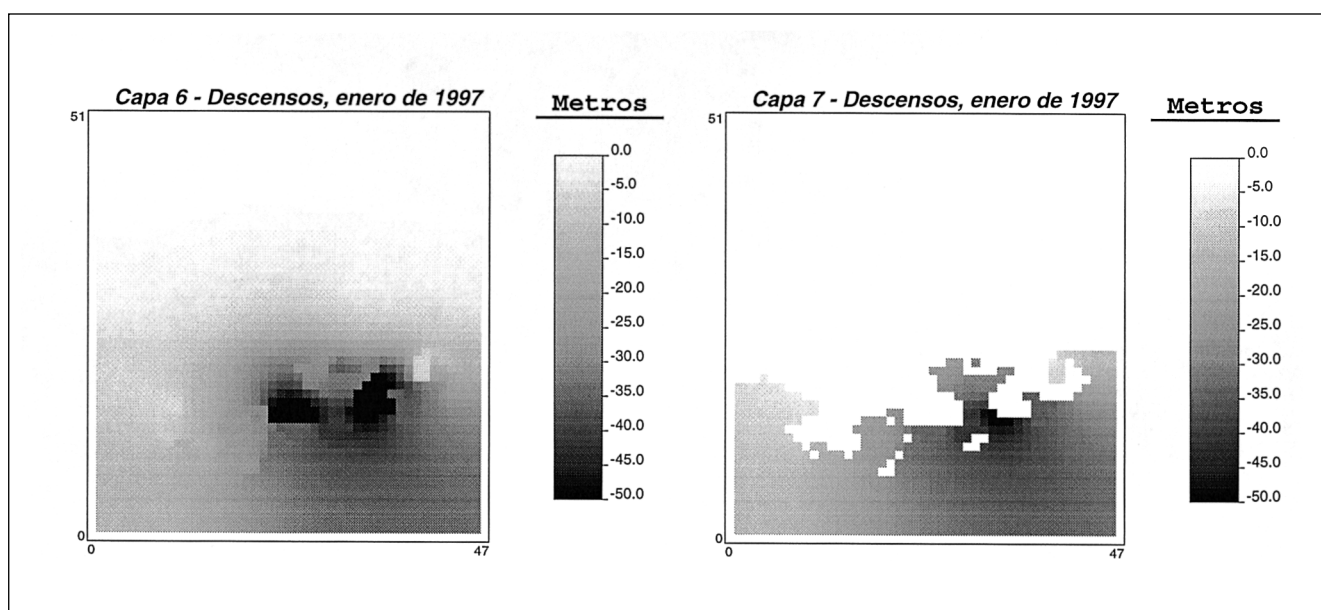
Análisis futuros mediante modelación numérica

Los resultados de la modelación ponen de manifiesto que a pesar de la escasez de datos se pueden obtener algunas conclusiones importantes.

No obstante aún persisten demasiadas incógnitas sobre las características hidrodinámicas de los acuíferos, sobre su distribución y variabilidad espacial, y sobre la recarga. Además de los datos de profundización de las cortas, de los escasos datos de bombeos de las mismas y de los bombeos en el túnel bajo la corta Los Frailes, se dispone de medidas de los caudales que hubo que bombear durante su excavación y el efecto de estos bombeos sobre la piezometría en el entorno de la corta Los Frailes. También existen datos de las oscilaciones piezométricas durante un período entre dos y tres años en una docena de piezómetros en los alrededores de la corta Los Frailes, y de ensayos de permeabilidad en una serie de sondeos realizados para el análisis hidrogeológico y geotécnico de la misma. Por último existen datos de pruebas de permeabilidad y medidas de niveles en los tres sondeos FRF-98, A-237 y A-239 (fig 11.1), realizados inmediatamente después del accidente de la balsa (ver apartado 11.2), así como de las medidas piezométricas realizadas en los puntos de inventario. También se incluirán los bombeos para riego que se vienen haciendo desde hace algunos años en el acuífero Niebla-Posadas, del que, además de los datos de un piezómetro del IGME y de otros próximos a Gerena, se ha podido disponer de

algunos datos piezométricos adicionales. Se va a incorporar cualquier dato disponible, histórico o reciente, de medidas piezométricas, aunque sean discontinuas, o de medidas hidrogeológicas, para tratar de reproducirlos en las distintas simulaciones que se hagan. Esto contribuirá a disminuir las incertidumbres del modelo y mejorará su representatividad.

Un aspecto muy importante es el determinar la incertidumbre de las predicciones. Al ser muy pocos los puntos en los que hay datos de conductividad hidráulica y medidas piezométricas, se ha empezado a utilizar desde hace algunos años el concepto de modelación estocástica. Para ello se generan una serie de medios permeables con unas características de variabilidad espacial, deducida de los datos medidos existentes, de sus características geológicas o de su similitud con otros medios, condicionada a los valores puntuales de conductividad hidráulica y alturas piezométricas medidos en el medio permeable. De los resultados de las simulaciones de medios sintéticos igualmente probables simulados estocásticamente se pueden determinar trayectorias y tiempos de paso que permiten valorar el riesgo de que se pueda producir una migración no deseada de contaminantes (Sahuquillo et al., 1993;



11.18.- Descensos piezométricos en las capas superficiales del modelo numérico al finalizar la simulación, causados por las extracciones de agua efectuadas en ambas cortas mineras y durante la excavación del túnel de exploración de la corta de los Frailes.

Gómez-Hernández et al., 1997). El objetivo inicial es el de calibrar al menos un campo sintético, tratando de calibrar también para cada realización la recarga más adecuada. Una vez analizada la coherencia de los resultados se analizará la viabilidad y posible utilidad del método, y si conviene aplicarlo en etapas posteriores.

REFERENCIAS

- Boliden-Apirsa (1997). Hydrogeological and geological characterization of Los Frailes open pit and eastern end wall at the Boliden Apirsa Mine. Aznalcóllar. Spain (Internal report for the Administration).
- Boliden-Apirsa (1999). Modelo hidrogeológico del entorno de las Cortas Mineras (Informe interno para la Administración).
- Boliden-Apirsa (1999). Modelo hidrogeológico del acuífero Niebla-Posadas en el entorno de Aznalcóllar (Informe interno para la Administración).
- Espí, J.A. (2000) La minería española durante 1999. Industria y Minería. Madrid. 340: 42-48.
- Golder Associates-AURENSA (1998). Estudio hidrogeológico de las cortas de Aznalcóllar y su entorno: Anexos. Madrid (Informe interno para Boliden-Apirsa).
- Gómez-Hernández, J.J.; Sahuquillo, A.; Capilla, J. (1997). Stochastic simulation of transmissivity fields conditioned to both transmissivity and piezometric data, 1. Theory. *Journal of Hydrology*, 203: 162-174.
- IGME (1978). Mapa geológico de España, serie Magna, 1/50 000: hoja 961, Aznalcóllar. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Memoria + mapa.
- IGME (1983). Mapa geológico de España, serie Magna, 1/50 000: hoja 983, San Lúcar La Mayor. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Memoria + mapa.
- IGME (1984). Síntesis hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir. Colección Informe. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- IGME (1987). Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la Geología de España: Cuenca del Guadalquivir. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Pinedo Vara, I. (1963). Piratas de Huelva: su historia, minería y aprovechamiento (Cap. I y Cap. V). Ed. Rivadeneira. Madrid.
- Quesada, C.; Bellido, F.; Dallmeyer, R.D.; Gil Ibarguchi, J.I.; Oliverira, J.D.; Pérez Estaún, A.; Ribeiro, A.; Robarder, M.; Silva J.B. (1991). Terranes within the Iberian Massif: correlations with west-African sequences. In *The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlations* (R.D. Dallmeyer, J.P. Lécroché, eds.), Springer Verlag: 267-294.
- Sahuquillo, A.; Capilla, J.; Gómez-Hernández, J.J.; Andreu, J. (1992). Conditional simulation of transmissivity fields honouring piezometric data. *Computational Mechanics Publ./Elsevier Applied Sci*: 201-212.