

## **LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS EN LA PROVINCIA DE SALAMANCA**

### **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo se resumen algunos de los aspectos más significativos de las investigaciones realizadas bajo el patrocinio de la Excma. Diputación de Salamanca.

La prospección de aguas subterráneas en rocas compactas es una de las tareas más difíciles de la Hidrogeología. La bibliografía al respecto es abundante, las directrices generales son bien conocidas, pero su aplicación en una zona concreta, la elección de puntos para realizar captaciones es tan difícil que en su mayoría obtienen caudales nulos o casi nulos.

El subsuelo de gran parte de la provincia de Salamanca está constituido por este tipo de rocas, y en muchas zonas las aguas subterráneas constituyen la única alternativa para hacer frente a las demandas para uso urbano, agrícola o ganadero. Por estas razones, es interesante precisar las posibilidades hidrogeológicas de estas rocas y aportar algunos criterios para la realización de captaciones.

En una primera fase de investigación se ha estudiado el área situada al S. E. de la provincia, que se señala en la Figura 1, y que comprende rocas metamórficas al Norte y rocas graníticas al Sur. En una fase posterior se van a estudiar las áreas graníticas que ocupan todo el N. O. de la provincia, también bajo los auspicios de la Excma. Diputación.

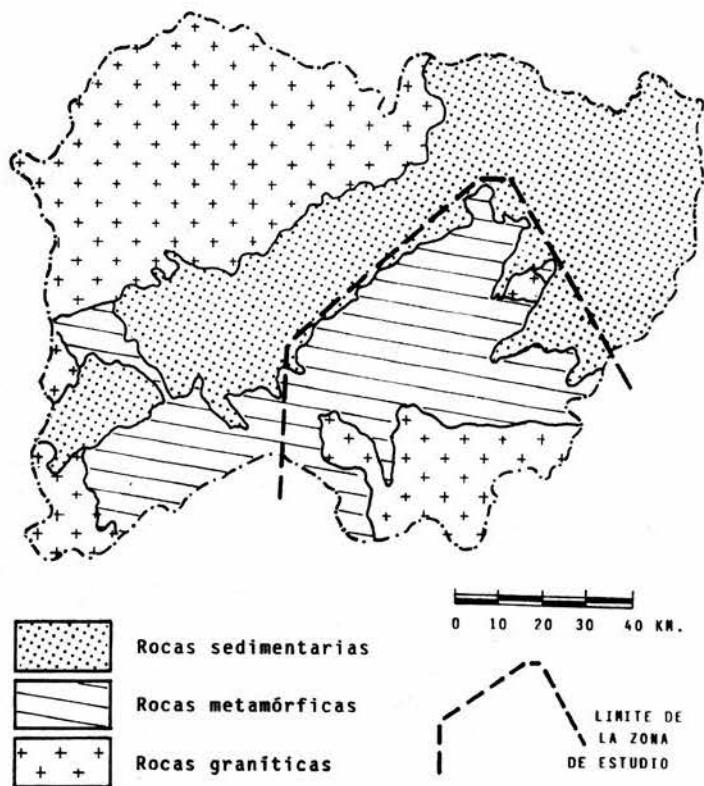


Figura 1.—Esquema geológico de la Provincia de Salamanca y situación del área estudiada.

#### PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LAS ROCAS IGNEAS Y METAMÓRFICAS

##### a) Generalidades. Alteración de la roca

Las rocas ígneas y metamórficas, tan dispares petrológicamente, presentan un comportamiento hidrogeológico similar en muchos aspectos: se trata de rocas compactas, sin poros, por lo que sus posibilidades acuíferas se reducen a:

1. Que la roca esté alterada.
2. Que esté fracturada.

La descomposición de la roca se debe a procesos físicos, como dilatacio-

nes por cambios de temperatura y congelación de agua en las grietas, o a procesos químicos, como disolución, hidrólisis, oxidación, etc... El resultado de estos procesos es un nivel superficial de alteración cuyo espesor oscila normalmente entre 1 y 15 metros Davis y de Wiest, 1971, p. 387), dependiendo del tipo de roca, del clima y de la erosión que puede haberlo arrasado parcial o totalmente.

El tipo de roca influye directamente en la naturaleza de los materiales resultantes de la alteración, que serán más arenosos en granitos y más arcillosos en pizarras y esquistos; en el primer caso serán materiales más permeables que en el segundo.

#### b) *Importancia de la fracturación*

Como ya se ha indicado, por debajo de la cobertera de alteración, el almacenamiento y circulación del agua está reducido a las fracturas de la roca. Los factores que influyen en el comportamiento hidrogeológico de una zona fracturada pueden esquematizarse así:

1. Esfuerzos tectónicos que se han producido en la zona, que determinan el tipo de fracturación, su densidad, etc...

2. Tipos de materiales que han sufrido esos esfuerzos, pues en los materiales más competentes se habrá originado una fracturación más intensa. Por esta razón, en áreas metamórficas las cuarcitas suelen ser más favorables hidrogeológicamente que las pizarras y esquistos.

3. Colmatación o disolución de las aberturas. La anchura de las fracturas es normalmente menor de 1 mm. (Freeze y Cherry, 1979, p. 159), siendo determinante la acción del agua subterránea aumentando la abertura por disolución es muy limitado, pues el agua alcanza muy pronto una concentración en sílice que hace que no sea agresiva con los minerales silicatados, y las aberturas tienden a cerrarse por precipitación de óxidos de Fe y Al insolubles. El hierro puede precipitar o disolverse como Fe (ferroso) dependiendo del pH y Eh del agua (Hem, 1970, p. 118). Calvalho (1980) señala como desfavorable las rocas generadoras de materiales arcillosos (pizarras, esquistos), que tienden a colmatar las aberturas producidas por los esfuerzos tectónicos.

4. La densidad y anchura de las fracturas disminuye rápidamente con la profundidad, lo que da lugar a que en la mayoría de los sondeos el caudal obtenido proceda de los primeros 30 a 50 metros.

c) *Porosidad y permeabilidad. Caudales*

Este tipo de rocas, inalteradas y sin fracturar, presentan porosidades menores del 1 ó 2% (Freze y Cherry, op. cit., p. 158), y como los poros son muy pequeños y generalmente desconectados, la permeabilidad es casi nula, habiéndose medido valores del orden de  $10^{-6}$  (Stuart et al., 1954, en Davis y de Wiest, op. cit., p. 386). Las medidas de permeabilidad en el campo proporcionan valores muy superiores a los obtenidos con muestras de laboratorio; a esta escala, la permeabilidad es anisótropa, más elevada según los planos de estratificación o de fracturación. Existen pocas medidas de la transmisividad; Otton (1981) da un valor medio de 3 m<sup>2</sup>/día para pizarras y esquistos en Maryland (U.S.A.).

Los caudales obtenidos por captaciones que explotan estas rocas suelen estar comprendidos entre 0,5 y 1,5 litros/seg. (Davis y de Wiest, op. cit., p. 390), aunque son numerosos los caudales prácticamente nulos, de los que no queda ninguna constancia. Esto conduce a un error importante cuando se calcula el caudal medio de una región a partir de los datos obtenidos en un inventario de campo. Algunos valores representativos se resumen en el Cuadro número 1.

## CUADRO N.º 1

## VALORES REPRESENTATIVOS DE CAUDALES OBTENIDOS EN DIVERSAS AREAS DE ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS

<i>Litología</i>	<i>Situación</i>	<i>Caudal medio</i> (litros/seg.)	<i>Autor</i>
Igneas y metamórficas	Texas	0,9	Landers y Turk (1973)
Metamórficas	Vermont	0,7-1,2	Hodges et al. (1972)
Esquistos	Pennsylvania	0,6	Poth (1976)
Metamórficas	Alasca	0,12	Johnson (1979)
Pizarras y cuarcitas	New York	2.1	Snavely (1980)
Metamórficas	Carolina Sur	0,25	Snipes (1981)
Metamórficas y granito	Massachussetts	0,3	Delaney (1979)

Como puede apreciarse, existe disparidad en las cifras, pero los datos se sitúan alrededor de 1 litro/seg. o menos. Esta disparidad puede explicarse por diferencias reales en los materiales o en la recogida de datos de campo por los diversos autores. Por otra parte el valor medio puede corresponder a la media aritmética o a la mediana (frecuencia = 0,5). Para Llamas (en Custodio y Llamas, 1976, p. 1.466) la media de los caudales oscila entre 0,7 y 1,7 litros/seg., mientras que la mediana es 2 ó 3 veces menor; según este autor, sólo de un 2 a un 10% de las captaciones superan los 3-3,5 litros/seg.

### GEOLOGÍA DE LA ZONA ESTUDIADA

En este apartado se describen las características geológicas más importantes en relación con el comportamiento hidrogeológico de los distintos tipos de rocas. En la Figura 2 se presenta un esquema de la geología de la zona estudiada (Díez, 1982, b; Dpto. Petrología, 1983).

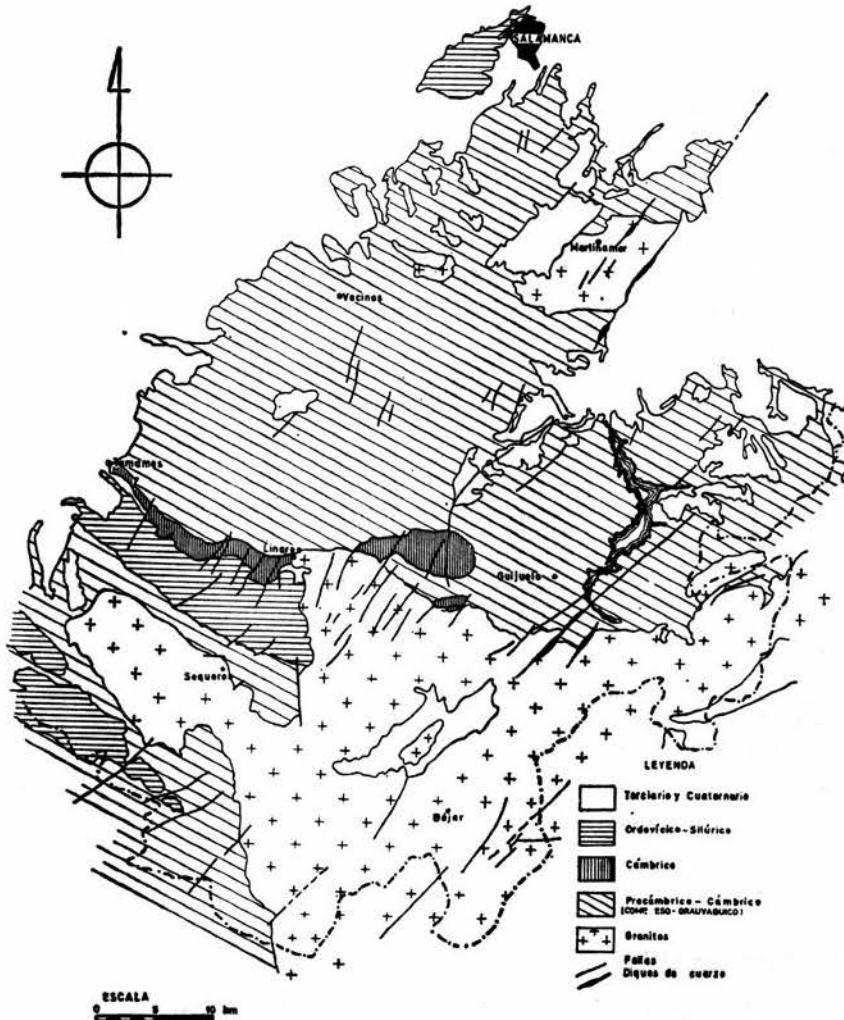


Figura 2.—Geología de la zona estudiada. Simplificada de DIEZ (1982) y DPTO. PETROLOGÍA (1983).

Dentro del contexto geológico de la península, nos hallamos en la Zona Centro Ibérica de la división de Julivert del Macizo Hespérico (Julivert et al., 1972), como parte de la Cadena Hercínica Europea. En este área encontramos los siguientes materiales:

a) Materiales sedimentarios metamorfizados

- Complejo esquisto-grauváquico (Precámbrico sup.-Cámbrico Infer.).
- Areniscas y Calizas de Tamames (Cámbrico).
- Pizarras de Endrinal (Cámbrico).
- Cuarcita Armoricana (Ordovícico)
- Pizarras y cuarcitas (silúrico).

b) Rocas graníticas.

α) *Materiales sedimentarios metamorfizados*

El complejo esquisto-grauváquico ha sido estudiado con detalle por Díez (1982 a), que distingue dos Formaciones: Monterrubio y Aldeatejada. Se trata fundamentalmente de pizarras con intercalaciones de conglomerados, cuarcitas, microconglomerados, porfiroides y areniscas. La Formación Monterrubio tiene una potencia visible de 2.000 metros, y la Formación Aldeatejada, situada estratigráficamente sobre la anterior, de 2.000 a 3.000 metros.

Sobre el Complejo esquisto-grauváquico aparecen areniscas, calizas y pizarras de edad cámbrica. Las Areniscas de Tamames presentan una potencia de 600 metros y las Calizas de Tamames de 50 a 500 metros. Sobre éstas se encuentran unos 150 metros de pizarras bandeadas (Pizarras de Endrinal).

El Ordovícico está representado en la zona por la Cuarcita Armoricana, con una potencia de hasta 1.400 metros, y, sobre ella, pizarras grises. Culminando la serie paleozoica, aparecen pizarras con intercalaciones de cuarcitas del Silúrico.

Como puede apreciarse en el esquema geológico de la Figura 3, el Complejo esquisto-grauváquico ocupa superficialmente la mayor parte del área metamórfica, mientras que el resto de los materiales citados afloran solamente al S. O., en la zona de Tamames y Peña de Francia.

b) *Rocas graníticas*

Las series metamórficas descritas están limitadas al Sur por afloramientos graníticos que se extienden hasta el límite de la provincia. En la zona de Martinamor se encuentra otro enclave granítico de menor extensión. Los granitos del Sur son granitoides biotíticos de grano grueso, mientras

que los de Martinamor corresponden a granitos de dos micas, de grano fino o grueso.

Aparte de los dos tipos de rocas descritos, metamórficas y graníticas, hay que citar la existencia de numerosos filones de cuarzo, verticales o subverticales, que presentan una cierta importancia desde el punto de vista hidrogeológico.

### c) Deformación y fractura

La deformación de los materiales precámbricos y paleozoicos de la región se debe fundamentalmente a la orogénesis Hercílica, que a su vez dio lugar al metamorfismo y plutonismo de la misma. Se han señalado tres fases principales de deformación, y una etapa posterior de fracturación tardihercínica (Díez, 1982 a).

La primera fase generó pliegues de gran longitud de onda de dirección N 50° a N 90° E y esquistosidad subvertical. La segunda fase originó pliegues de dirección N 100° a N 120° E de plano axial subvertical. Las fracturas más importantes son N 70° a N 130° E, que funcionaron durante la 3ª fase, y N 10° a N 30° E, tardihercínicas, que han jugado hasta épocas muy recientes, todas ellas subverticales.

## EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA ZONA

Se efectúa mediante dos tipos de captaciones: pozos excavados de gran diámetro y profundidades generalmente inferiores a 8 ó 10 metros, y sondeos de 30 a 150 metros de profundidad. En total están registrados 2.035 pozos y 234 sondeos. Sobre rocas metamórficas existen 1.903 pozos excavados, sobre 74 municipios, a una media de 26 por municipio, aunque varía entre 0 (en 20 casos) y más de 100 (en 5 términos municipales). Sobre rocas graníticas existen 366 pozos sobre 33 municipios, a una media de 11, oscilando entre 0 y 31.

Los pozos excavados extraen pequeños caudales para abastecimiento de pueblos o regadío de huertas de media hectárea ó aún menores. Esto puede suponer volúmenes de 20 a 60 m<sup>3</sup>/día, que en caso más frecuente de los regadíos se producen solamente en los tres meses de verano.

Existen menos sondeos, pues se trata de una técnica más moderna, de utilización muy reciente en esta región; casi todos los sondeos se han perforado en los últimos 6 u 8 años. Igual que en el caso de los pozos excavados, están más explotadas las rocas metamórficas que las graníticas; en las primeras se contabilizan 196 sondeos sobre 74 municipios (media =



2,6), mientras que en granito existen solamente 38 captaciones profundas sobre 33 municipios (media = 1,1).

Las profundidades de los sondeos son generalmente inferiores a 100 metros, y se distribuyen así:

<i>Profundidad</i> (mts.)	<i>Rocas metamórficas</i>	<i>Rocas graníticas</i>
Menos de 50 ... ..	59%	70%
50 a 100 ... ..	31%	19%
Más de 100 ... ..	10%	11%

Los caudales de los sondeos son difíciles de precisar, y el valor medio no es significativo dada la gran dispersión de los valores y su distribución asimétrica (log-normal). La mayor parte de los valores son inferiores a 3 litros/seg. en rocas metamórficas y menores que 0,5 litros/seg., en granito, según puede apreciarse en la siguiente tabla:

<i>Caudal</i> (litros/seg.)	<i>Rocas metamórficas</i>	<i>Rocas graníticas</i>
Menos de 0,5 ... ..	37%	72%
0,5 a 3 ... ..	46%	22%
Más de 3 ... ..	17%	6%

Hay que recordar el error de apreciación que supone el que se consideren las perforaciones existentes, no todas las realizadas, pues las que resultan totalmente negativas se abandonan.

El volumen total extraído mediante sondeos debe ser del orden de 1 Hm<sup>3</sup>/año, mientras que los pozos excavados pueden extraer hasta 4 ó 5 Hm<sup>3</sup>/año. Estas cifras son pequeñas, considerando que se trata de una superficie de unos 2.800 km<sup>2</sup>, por lo que la explotación podría incrementarse, realizando las captaciones en los puntos adecuados.

## CRITERIOS DE PROSPECCIÓN

### a) *Generalidades*

El estudio de las posibilidades hidrogeológicas de la zona presenta dos aspectos distintos, según se considere la posible explotación de la cobertera de alteración o de la roca subyacente inalterada. En una primera fase debe estudiarse la posibilidad de explotar los materiales alterados, que siempre presentan mayores permeabilidades que la roca dura, aunque en algunos ca-



sos sean predominantemente arcillosos y tampoco sean interesantes. En esta fase, la prospección irá dirigida a localizar los puntos con mayor espesor de alteración y con materiales poco arcillosos. En estos casos, las obras de captación indicadas serían pozos excavados o zanjas de drenaje, y su rendimiento se verá afectado por los períodos secos.

Si no existe alteración o el caudal obtenido no es suficiente, es preciso realizar la captación en la roca inalterada. El rendimiento de un pozo o sondeo depende del número de fracturas atravesadas, así como de su anchura y grado de interconexión. La elección de puntos para perforar debe ir dirigida en tal sentido: atravesar la máxima densidad de facturación posible.

En ocasiones puede existir una cierta relación entre la topografía actual y la fracturación: gran parte de los valles y depresiones se han desarrollado a lo largo de fracturas o zonas fracturadas, donde la erosión ha actuado con mayor facilidad. Esta indicación topográfica debe ir necesariamente acompañada por un estudio geológico detallado, con el conocimiento de los sistemas de fracturación existentes en la zona.

Por el contrario, Carvalho (op. cit.) ha comprobado que en pizarras y esquistos las zonas más fracturadas no proporcionan las máximas permeabilidades, por tratarse de materiales arcillosos producto de la tectónica sufrida y de la alteración subsiguiente. Por tanto, han de considerarse simultáneamente la fracturación y la litología, siendo más favorables, como ya se ha indicado, las formaciones más competentes.

#### b) *Características de los materiales metamórficos de la zona estudiada*

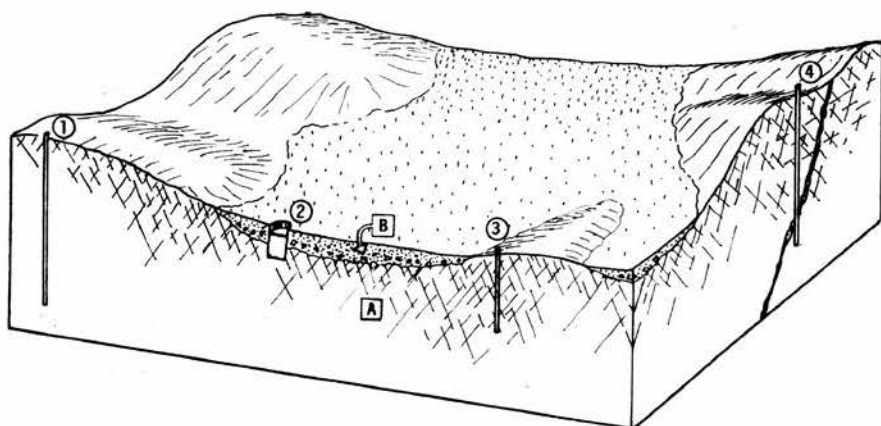
Ya se ha indicado que en esta zona aproximadamente un 17% de los sondeos en explotación proporcionan un caudal superior a 3 litros/seg., llegando excepcionalmente hasta 10 litros/seg. Se han estudiado con detalle algunos de estos casos para tratar de obtener ciertos criterios que permitan la ubicación correcta de futuras captaciones.

En primer lugar hay que señalar las Calizas de Tamames como más favorables debido a los procesos de disolución a lo largo de las fracturas que pueden dar lugar a permeabilidades relativamente elevadas.

Un interés especial merece el Complejo esquistos-grauváquico, pues aflora en la mayor parte de la zona estudiada. Desgraciadamente, los sondeos más productivos no presentan ninguna característica en común que sea apreciable mediante estudio geológico o fotogeológico. En general se cumple la norma clásica de señalar valles o vaguadas como áreas más propicias, pero en pocos casos los sondeos productivos están situados sobre fracturas cartografiadas; cuando es así, se trata de fallas tardihercínicas de dirección N 10° - N 30° E.

Dentro del Complejo esquisto-grauváquico, parece más favorable la Formación Monterrubio por sus frecuentes intercalaciones de conglomerados y cuarcitas, y, en efecto, muchos de los sondeos considerados atraviesan esta Formación. No obstante, algunos de los sondeos de mayor caudal, están situados en la Formación Aldeatejada, generalmente en sus tramos inferiores, pero sin llegar a cortar la F. Monterrubio subyacente (por ejemplo, en Avililla, Tº de Tamames, y en Moraleja de Huebra, Tº de Barbalos).

En algunos sondeos existe relación entre los caudales obtenidos y la profundidad a que se atravesaron filones de cuarzo, en ocasiones de sólo unos centímetros de espesor. En otros casos, como en los dos citados de Avililla y Moraleja, se perforaron 50 ó 60 metros de pizarras sin intercalaciones de ningún tipo; estos casos deben corresponder a áreas fuertemente diaclasadas en las que se han producido fenómenos de disolución a lo largo de las fisuras.



**A**: Roca inalterada, fracturada

**B**: Roca alterada

①: Sondeo negativo, en una zona sin fracturas

②: Pozo excavado, explota la alteración y las diaclasas más superficiales

③: Sondeo en una zona fuertemente diaclasada. Caudal= 3-6 litros/seg.

④: Sondeo que atraviesa un plano de falla. Caudal= 5-10 litros/seg.

Figura 3.—Posibilidades hidrogeológicas de la zona.

Se realizaron varios Sondeos Eléctricos Verticales y Calicatas Eléctricas sobre perforaciones con caudales diversos (Sánchez, in lit.), encontrándose una relación clara entre el rendimiento de la captación y la resistividad eléc-

trica del terreno: a mayores caudales corresponden resistividades menores y viceversa. Los sondeos con un caudal superior a 3 litros/seg. presentan resistividades aparentes menores de 200 ohmios  $\times$  metro, para líneas de corriente de 80 a 260 metros, mientras que sobre los sondeos con un caudal inferior a 0,5 litros/seg. se midieron resistividades aparentes de 200 a 2.000 ohmios  $\times$  metros. Interpretando las curvas de los Sondeos Eléctricos, se obtiene que las perforaciones más productivas atraviesan algún nivel de resistividad real inferior a 100 ohmios. m., lo que nunca sucede con los sondeos negativos.

### CONCLUSIONES

Es bien conocido que las rocas ígneas y metamórficas son negativas desde el punto de vista hidrogeológico, pero en puntos concretos pueden obtenerse caudales superiores a 3 litros/seg.

La elección de dichos puntos no es sencilla, pues los sondeos más productivos no presentan en común ninguna característica claramente observable. Es preciso estudiar conjuntamente la litología y la fracturación, y utilizar técnicas geofísicas.

En general, las litologías más favorables son las calizas, por su posible disolución, y las rocas más competentes (cuarcitas, conglomerados, etc.), en las que la fracturación puede ser más intensa, y las aberturas tienen menos tendencia a ocluirse que en pizarras y exquistos.

Debe intentarse la localización de fracturas, aunque en esta zona la mayoría de los sondeos productivos no se localizan sobre fracturas cartografiables.

Las áreas más diaclasadas se detectan claramente por su resistividad eléctrica, en general inferior a 100 ohmios  $\times$  metro, mientras que la roca no fracturada presenta resistividades de 500 a 1.500 ohmios  $\times$  metros.

F. JAVIER SÁNCHEZ SAN ROMÁN \*

(\*) Departamento de Geomorfología y Geotectónica. Universidad de Salamanca.

BIBLIOGRAFIA

- Carvalho, J. M. (1980). 'Contribucao para a prospeccao e pesquisa hidrogeologica no Maciço Hesperico Portugues', *Boletim do Museu e Laboratorio Mineralogico e Geologico da Faculdade de Ciencias*, V. 16, pp. 305-326 (Lisboa).
- Custodio, E. y M. R. Llamas (1976). *Hidrología Subterránea* (Omega, Barcelona) 2 tomos.
- Davis, S. N. (1969). 'Porosity and permeability of natural materials', en *Flow through porous media*. R. de Wiest, editor (Academic Press), pp. 54-89.
- Davis, S. N. y R. de Wiest (1971). *Hidrogeología* (Ariel, Barcelona), 563 pp.
- Delaney, D. F. (1979). 'Ground-Water availability in parts of the Chicopee and Mild River Basins, near Wilbraham, Massachusetts', *Geological Survey Water Resources Investigations 79-72 (Open-file report)*.
- Departamento de Petrología (1983). *Síntesis Geológica del Basamento (Zona del Centro-Oeste español)*. Mapa escala 1:200.000 (Salamanca).
- Díez Balda, A. (1982 a). *El Complejo esquistograuváquico, las series paleozoicas y la estructura hercínica al Sur de Salamanca*. Tesis Doctoral (Dpto. Geomorfología y Geotectónica. Universidad de Salamanca).
- Díez Balda, A. (1982 b). *Mapa Geológico del Sureste de la Provincia de Salamanca*. Escala 1:200.000 (Dpto. Geomorfología y Geotectónica. Universidad Salamanca).
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979). *Groundwater* (Prentice-Hall, London) 604 pp.
- Hem, J. D. (1970). *Study and interpretation of chemical characteristics of natural waters* (Geological Survey. Water Supply Paper 1473, Washington).
- Hodges, A. L.; D. Butterfield y J. W. Ashley (1976). 'Ground-Water resources of the Barre-Montpelier area, Vermont', *Vermont Agency of Environmental Conservation, Montpelier, Departament of Water Resources*. 27 pp....
- Johnson, P. (1979). 'Hydrogeologic data for the Eagle River-Chugiak area, Alaska', *Geological Survey Water Resources Investigations 79-75 (Open-file Report)*, 17 pp.
- Julivert, M.; J. M. Fontbote; A. Ribeiro y L. Conde (1972). *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. Escala 1:1.000.000 (Instituto Geológico y Minero de España. Madrid).
- Landers, R. A. y L. J. Turk (1973). 'Occurrence and quality of ground water in crystalline rocks of the Llano Area, Texas', *Ground Water*, v. 11, 1, pp. 5-10.
- Otton, E. G. (1981). 'The availability of Ground Water in Western Montgomery County, Maryland', *Maryland Geological Survey Report of Investigations*, n.º 34, 76 pp.
- Poth, C. W. (1976). 'Summary of Ground-Water Resources of Lancaster County', *Pennsylvania Geological Survey, Harrisburg Fourt Series, Water Resources Report 43*, 80 pp.
- Sánchez, F. J. (in lit.). 'Prospección hidrogeológica en rocas metamórficas mediante geofísica eléctrica', *Studia Geologica Salmanticensia*, v. XX.
- Snively, D. S. (1980). 'Ground-Water apraisal of the Gidhllill Beacon Area, Dutchess County, New York', *Geological Survey Water Resources Investigations 80-437*, 14 pp.
- Snipes, S. (1981). 'Ground Water Quality and Quantity in Fracture Zones in the Piedmont in Northwestern South Carolina', *South Carolina Water Resources Research Institute, Clemson, Publ. n.º 93*, 87 pp.