

# Aplicación de técnicas estructurales y geoquímicas para la caracterización de fracturas conductoras en el batolito de La Cabrera (España central)

*Application of structural and geochemical techniques for the characterization of conductive fractures in La Cabrera granite (central Spain)*

C. Fuentes (\*), A. Muñoz Martín (\*\*\*), A. Vela (\*\*), F. Elorza (\*\*), G. De Vicente (\*\*\*) y L. Mazadiego (\*)

(\*) E.T.S.I. Minas de Madrid. Ríos Rosas, 21. Madrid - 28003 (España)

(\*\*) Consejo de Seguridad Nuclear. Justo Dorado, 11. Madrid - 28040 (España)

(\*\*\*) Fac. de Ciencias Geológicas. Univ. Complutense. Madrid - 28040 (España)

## ABSTRACT

Groundwater flow and solute transport within fractured crystalline rocks are mainly controlled by the geometry and the properties of each individual fracture. The hydrogeological characterization of a granitic massif is usually achieved by a large number of destructive boreholes. This is undesirable in the case that the area is studied as a possible nuclear waste repository. Discrete fracture network models are good interpreters of the local hydraulic properties measured in situ. The extension of these types of models to a regional scale is limited by the high number of fractures that must be characterized and simulated. The applicability of two techniques ("Fault Population Analysis", geological techniques, and "Emanometry", geochemical technique) is analyzed and discussed to define the conductive fractures in the granitic massif. The objectives are: 1) to reduce the number of destructive boreholes and to place them; 2) to decrease the computer time and increase the scale of application of the discrete fracture network models. In this study the filtering made from the results of the two applied techniques has reduced the number of representative disks of the conductive fractures in 23 percent.

**Key words:** Hydrogeologic characterization, discrete fracture network, emanometry, fault population analysis.

Geogaceta, 20 (5) (1996), 1192-1195  
ISSN: 0213683X

## Introducción y objetivos

La barrera geológica es uno de los componentes fundamentales en el análisis de seguridad de los almacenamientos geológicos profundos para residuos radiactivos de alta actividad. La eficacia de la barrera geológica reside en su capacidad para limitar la cantidad de agua que puede entrar en el almacenamiento y retardar el transporte de radionucleidos desde el repositorio a la biosfera. Por esta razón, la búsqueda de rocas de baja permeabilidad para el almacenamiento de residuos de alta actividad, es uno de los objetivos principales de los programas nacionales e internacionales de investigación en este campo.

En este sentido, los granitos además de presentar un buen comportamiento mecánico, geoquímico y térmico, tienen una baja permeabilidad en las zonas inalteradas. Sin embargo, presentan algunos inconvenien-

tes, siendo el principal la presencia de fracturas (fallas, diaclasas y juntas) que interconectadas pueden dar lugar a vías rápidas de migración de los radionucleidos hacia la biosfera. Por otra parte, la metodología tradicional de caracterización de este tipo de rocas, requiere normalmente la utilización de técnicas destructivas que reducen en muchos casos la capacidad aislante de la roca, ya que supone la ejecución de un elevado número de sondeos, calicatas y trincheras.

La modelización del comportamiento hidrogeológico de los macizos rocosos fracturados, se realiza mediante dos tipos de modelos conceptuales: aquellos que lo consideran como medio poroso equivalente, y aquellos que lo consideran como medio heterogéneo. Dentro de este último tipo de modelos se encuentran los que simulan geoméricamente el medio geológico, como es el caso de los Modelos Discretos de Frac-

turación (M.D.F), que generan fracturas dentro de una masa compacta (matriz) de permeabilidad variable o constante.

Las metodologías actuales de trabajo se orientan hacia la utilización de modelos estocásticos que, además de estudiar la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros hidrogeológicos del medio, reducen la necesidad de utilizar técnicas destructivas. La primera etapa de los M.D.F es la estimación de las propiedades hidrogeológicas del medio a escala local a partir de medidas cuasi-puntuales, para después realizar estimaciones de dichas propiedades a escala global. Este tipo de modelos interpretan adecuadamente las medidas de campo obtenidas a escala local (La Pointe *et al.*, 1995; Cacas, 1990; Lindbom *et al.*, 1992; Geier *et al.*, 1992; Norman, 1992; Andersson *et al.*, 1991). No obstante, la simulación de la red de fracturación implica el procesamiento de una gran cantidad de

datos, lo que reducirá el volumen de medio geológico a modelizar, debido a la limitada capacidad de los ordenadores.

En este trabajo se analizan los resultados obtenidos a partir de las dos técnicas aplicadas (emanometría y análisis poblacional de fallas) con objeto de poder estimar las orientaciones y densidades de las fracturas más conductoras en un área del batolito de La Cabrera. De forma que nos permita eliminar aquellas fracturas que prácticamente no faciliten el transporte de los radionúclidos a su través.

El M.D.F utilizado en este trabajo de investigación, fue desarrollado por Cacas (1990). Este es un modelo tridimensional y estocástico que representa el flujo del agua subterránea en un sistema de fracturas generado en una matriz impermeable. Para ello, es necesario conocer las características geométricas e hidráulicas de las fracturas presentes en el área.

Como ya se ha comentado anteriormente, una limitación de la aplicación de los M.D.F es la reducida capacidad de los ordenadores para generar un gran volumen de macizo rocoso. Por tanto, se hace necesario realizar un filtrado de fracturas. La forma de realizar este filtrado y los criterios utilizados para ello, serán muy importantes para obtener unos resultados realistas cuando se trabaja a gran escala.

**Zona de estudio**

La zona de estudio es un área situada al sur del batolito de la Cabrera (Madrid) que esta formada por granitos de grano medio y grueso. El volumen global simulado abarca un área de 1.2 x 1.2 km. La escala local o de detalle elegida ha sido una cantera que cubre un área de unos 400x400 m (Fig.1).

El trabajo se ha realizado combinando la información obtenida a las dos escalas de trabajo. Para ello, es necesario demostrar que existe una semejanza estadística entre las distribuciones de los datos geométricos de las fracturas medidas a ambas escalas. De esta forma, la cantera podrá considerarse estadísticamente representativa del volumen global y la información de las características hidrogeológicas de las fracturas definidas a escala de detalle, podrán extrapolarse para simular el volumen global.

**Metodologías utilizadas**

Se han analizado dos metodologías como herramientas complementarias para llevar a cabo la cuantificación de la importancia hidrogeológica relativa de las familias de fracturas presentes en el medio: **Aná-**

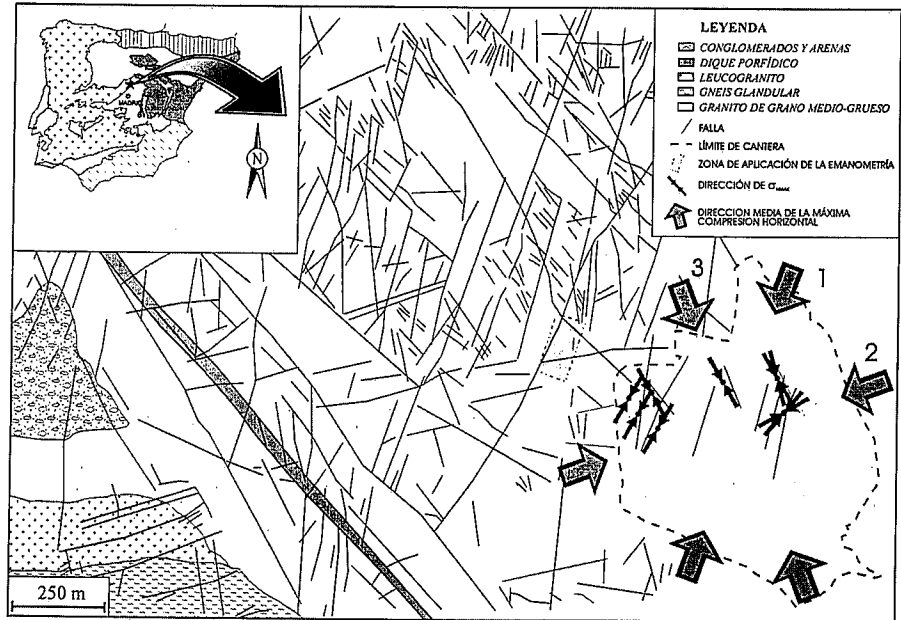
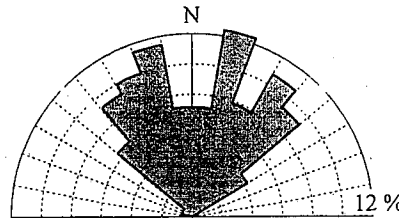


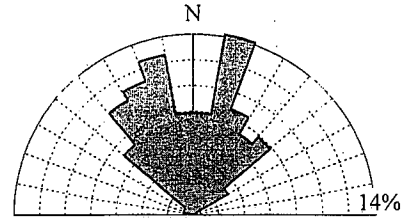
Fig. 1.- Mapa estructural y tensional. Direcciones medias del máximo esfuerzo horizontal ( $S_{HMAX}$ ): N20E (1), N70E (2), N159E (3).

Fig. 1.- Structural sketch and paleostress map.  $S_{HMAX}$  trends: N20E (1), N70E (2), N159E (3).

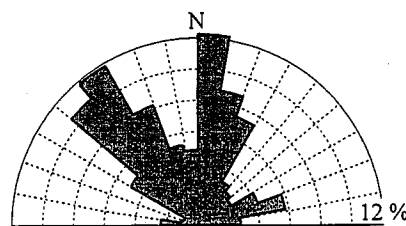
A) DIRECCIONES DE LAS FALLAS MEDIDAS A ESCALA LOCAL



B) FALLAS ACTIVADAS POR EL TENSOR DE ESFUERZOS RECIENTE (ESCALA LOCAL)



C) DIRECCIONES DE LAS FALLAS A ESCALA CARTOGRAFICA



D) ROSA DE DIRECCIONES DE VENAS MEDIDAS A ESCALA LOCAL

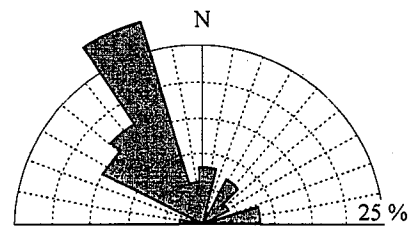


Fig. 2.- Rosas de direcciones de las trazas de fracturas a escala cartográfica (global), y de las fallas y venas medidas a escala local (cantera).

Fig. 2.- Fault trace rosegrams. Intercomparación of the distributions of the measured global fault traces directions and of the measured local scale fault and quartz veins directions.

lisis Poblacional de Fallas (APF) y Emanometría. Además, se han realizado observaciones de aperturas, presencia de agua y estimado el tipo de relleno fisural en las fallas medidas (Fuentes, 1994).

**Análisis Poblacional de Fallas:** (APF). Esta metodología se fundamenta en la resolución de un problema inverso. A

partir de la medida de un número suficiente de fallas y estrías de deslizamiento, se determinan los tensores de esfuerzo- de formación responsables de la formación de dichas fallas (Bott, 1959; Carey y Brunier, 1974; Reches, 1983). Esta metodología ha alcanzado un gran desarrollo en la última década, permitiendo definir con precisión el número y características de los eventos de-

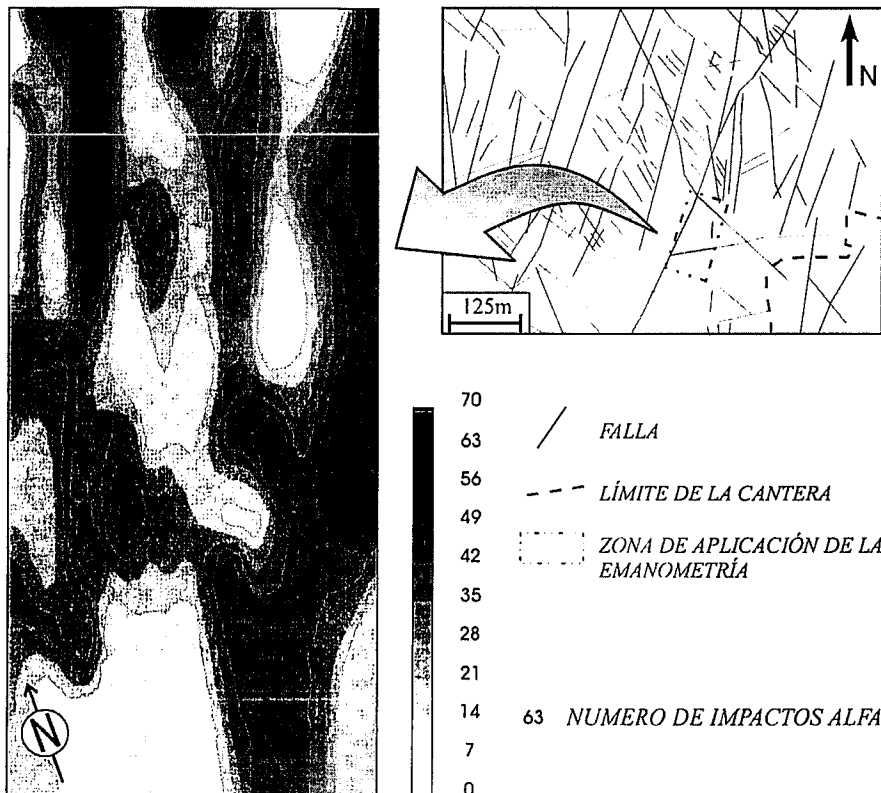


Fig. 3.- Direcciones de anomalías de Radon obtenidas en la campaña emanométrica.

Fig. 3.- Radon anomalies trends obtained from Emanometry technique.

formacionales frágiles que han afectado a una región. De entre todos los métodos desarrollados para resolver este problema, en este trabajo se han utilizado el Modelo de Deslizamiento (Reches, 1983 y De Vicente, 1988) y el Método de Inversión de Esfuerzos de Reches *et al.*, (1992).

Esta metodología (APF), consideramos que puede aportar valiosa información sobre las características geométricas tridimensionales de la fracturación y el estado tensional del macizo rocoso. En principio, se ha supuesto que las fracturas asociadas a esfuerzos distensivos serán más favorables a la circulación del agua subterránea (Ericsson, 1986) que las relacionadas con esfuerzos compresivos, aunque esto deberá comprobarse mediante ensayos hidrogeológicos. Por otra parte, debe tenerse en cuenta la edad relativa de actuación de los estados de esfuerzos, así como, las características mineralógicas y texturales del medio granítico.

**Emanometría:** Es un método geoquímico que cuantifica las emanaciones de gas radón en el suelo. El interés de esta técnica se basa en el hecho de que los gases, al igual que los líquidos, viajan por superficies libres. Por tanto, su aplicación es interesante para identificar direcciones de debilidad es-

tructural y definir áreas con distinta densidad de fracturación en zonas cubiertas. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en la exploración de aguas (NWWA, 1987) y yacimientos de Uranio (Card, 1982) y en el campo del petróleo para detectar concentraciones de Radón ligadas a zonas de reducción (Mazadiego, 1994).

**Resultados de la campaña de toma de datos realizada**

El análisis estructural realizado a las dos escalas consideradas ha demostrado la existencia de fallas normal-direccionales orientadas según N10-25E y N140-160E, siendo esta última coincidente con la dirección de un dique de pórfido granítico próximo a la zona de estudio (Fig. 1). La dirección N60E es minoritaria, y se corresponde con fallas inversas y normales. En la Fig. 2 se representan los diagramas de frecuencias de las direcciones de las fracturas a las dos escalas consideradas y se puede comprobar la similitud visual que existe entre ellas (Fig.2A, B y C). Las dos direcciones de fallas más importantes en las rosas de direcciones, quedan representadas

a ambas escalas y corresponden al campo de esfuerzos más reciente (De Vicente *et al.*, 1996), que puede considerarse como el más significativo desde el punto de vista hidrogeológico.

El diagrama de frecuencias realizado con las direcciones de los planos de venas encontradas en la cantera (Fig. 2D), revela una moda principal según la dirección N150-165E, y dos secundarias según N75-90E y N0-30E. Aunque esta última presenta venas de mayor espesor.

Los métodos de inversión de esfuerzos han proporcionado tres direcciones de máximo esfuerzo horizontal ( $S_{HMAX}$ ): N20E, N70E y N159E (Fig.1). Por otra parte, también se han clasificado las fallas según su tipo de movimiento, y se dispone de criterios de campo y mecánicos sobre la edad relativa de movimiento de las distintas familias (Fuentes, 1994).

Por otro lado, el análisis de los datos de emanometría, obtenidos en la zona de estudio, revela dos claras direcciones medias de anomalías: N30E y N150E y otra dirección menos evidente N74E (Fig 3). La densidad de fracturación parece aumentar hacia el Norte, pero no se han logrado definir zonas con distinta densidad de fracturación, debido a las reducidas dimensiones del área de aplicación de esta técnica en comparación con el tamaño de celda del mallado de muestreo.

Se ha observado una gran coherencia entre los resultados obtenidos mediante la aplicación de las metodologías de carácter estructural y las de tipo geoquímico (Figs. 2 y 3).

**Discusión y conclusiones**

La simulación del medio hidrogeológico consiste en reproducir las propiedades hidráulicas, definidas por las fracturas existentes, en la zona de estudio. Para ello, se simula la red de fracturación mediante discos que representan las familias direcciones en las que se han clasificado las fracturas medidas. En el modelo de Cacas (1990), la orientación de cada familia de fallas se representa mediante la orientación de los discos, la densidad de fracturación mediante el número de discos por unidad de volumen, y las longitudes de las trazas de las fallas mediante el radio de los discos.

En la (Fig. 4) se representan las tres familias de fracturas obtenidas y la distribución de frecuencias de la densidad de fracturación de cada familia, expresada por el número de fracturas por superficie. Su simulación requiere la generación de 42337 discos en un volumen de 1.5 x 1.5 x 0.5 km. Para ampliar las posibilidades de simula-

ción se ha realizado un filtrado de las fracturas ponderando las familias que presentan una mayor probabilidad de ser hidráulicamente conductoras. Para ello, se ha utilizado la información aportada por el análisis poblacional de fallas, la emanometría y las observaciones realizadas en la cantera relativas a la apertura de las fallas, presencia de agua, y rellenos fisurales.

En este sentido, se les ha asignado más peso a las direcciones asociadas a esfuerzos distensivos, y dentro de éstas, a las que coinciden con el campo regional de esfuerzos más recientes. También se han ponderado las familias coincidentes con las direcciones de las anomalías de radón y con las direcciones de las venas y diques medidos. Esto ha modificado la importancia de cada familia a simular, que se traduce en la densidad relativa de los discos que representan a cada una (Fig. 4E). Como resultado, se ha conseguido una reducción del 23% en el número de discos a simular.

Los resultados obtenidos en el proceso de simulación deberán ser calibrados mediante ensayos hidrodinámicos realizados a escala local para determinar la validez del modelo y su sensibilidad a las hipótesis barajadas en el proceso de filtrado. Esto será objeto de una posterior investigación que ya se ha iniciado (proyecto HIDROBAP), y que permitirá identificar la relación existente entre las propiedades hidráulicas del macizo, el esquema de esfuerzos, la emanometría y sus características mineralógicas y texturales.

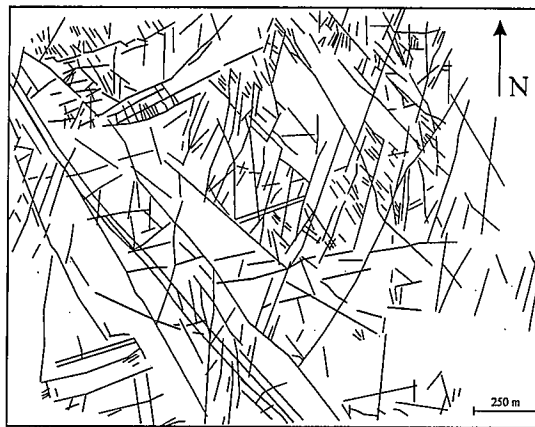
#### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) que financió los trabajos de campo y una beca de formación al primer autor. También agradecemos la desinteresada colaboración de la compañía Ferymag S.A. responsable de la explotación de la cantera estudiada, al permitirnos la entrada y la aplicación de las técnicas descritas en este artículo.

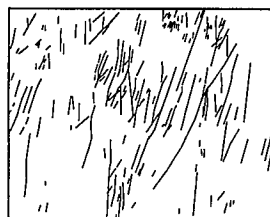
#### Referencias

Andersson, J.; Nordqvist, R.; Nyberg, G.; Smellie, J.; Tirén, S. (1991) *SKB TR*, 91-24: 134pp.

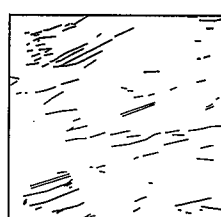
#### TRAZAS DE FRACTURAS



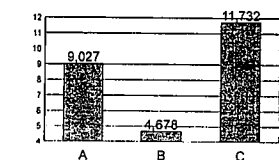
A) CLASE N172E-N52E



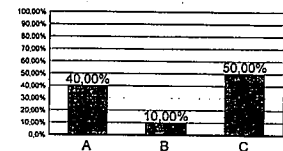
B) CLASE N52E-N105E



D) DENSIDAD DE TRAZAS (TRAZAS/M<sup>2</sup>)



E) DENSIDAD RELATIVA DE DISCOS A SIMULAR (%) DESPUES DEL FILTRADO



C) CLASE N105E-172E

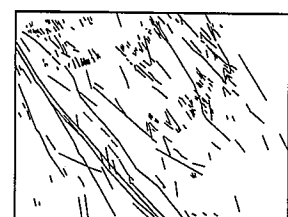


Fig. 4.- Clasificación de las trazas de las fallas en tres familias (A, B, C). Densidad superficial de trazas estimada en cada familia (D), y densidad superficial de discos estimada tras el filtrado (E).

Fig. 4.- Fault traces classification in three different sets (A, B, C). Surface density of the fault sets (D), and relative estimated disk density in the model after filtering (E).

Bott, M.H.P. (1959) *Geol Mag.*, 96: 109-117.  
 Cacas, M.C.; Ledoux, E.; de Marsily, G. y Tillie, B. (1990) *Water Resour.*, 26  
 Carey, E. y Brunier, M.B. (1974) *C.R. Acad.Sc. Paris*, 279: 891-894.  
 Card, J.W.; Bell, K. (1982) *Journal of geochemical Exploration* N°17: 84 pp.  
 De Vicente, G. (1988) *Tesis Doctoral*. Univ. Complutense Madrid.: 308 pp.  
 De Vicente, G.; Giner, J.L.; Muñoz Martín, A.; González Casado, J.M. y Lindo, R. (1996) *Tectonophysics* (aceptado, en prensa).  
 Ericsson, L.; Ronge, B. (1986) *SKB TR* 86-19: 75pp.  
 Geier, J.E.; Axelsson, C.L.; Hássler, L. y Benabderrahmane, A. (1992) *SKB TR*, 92-07: 138 pp.

Fuentes, C. (1994) *Informe final de beca*. C.S.N Madrid: 250 pp.  
 Henou, B. (1986) BRGM  
 La Pointe, P.R.; Wallmann, P. y Follin, S. (1995) *SKB TR*, 95-15: 141 pp.  
 Lindbom, B. y Boghammar, A. (1992) *SKB TR*, 92-11: 162 pp.  
 Mazadiego, L.F. (1994) *Tesis Doctoral*. E.T.S.I. Minas Madrid: 600 pp.  
 Norman, S. (1992) *SKB TR*, 92-08: 128 pp.  
 NWWA (1987) *Proceedings of the NWWA conference*, B. Graves (Ed.), Somerset, New Jersey: 336 pp.  
 Reches, Z.; Baer, G. y Hatzor, Y. (1992) *Jour. Geophys. Res.*, 97 (B7):12481-12493.