

## ESTIMACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN MEDIOS FRACTURADOS A PARTIR DE LA DENSIDAD DE FRACTURAS

Mauro Sánchez, Fluquer Peña, Gerson Cotrina, Víctor Vargas, Yeslin Olarte

mauro.sanchez@us.mwhglobal.com, fpena@ingemmet.gob.pe, gcotrina@hydrogeo.com.pe, vvargas@ingemmet.gob.pe, yolarte@hydrogeo.com.pe

### INTRODUCCIÓN

Los medios con porosidad por fracturas pueden definirse como una matriz poco permeable atravesada por una densidad de fracturas hidráulicamente conductivas. La mayor parte del flujo circula sólo por algunas de estas fracturas, característica que marca el comportamiento del medio fracturado. Por esta condición, es importante caracterizar las fracturas para comprender la dinámica de los flujos de agua subterránea a través de ellas. Lamentablemente, no existe una metodología ampliamente aceptada para ello, en este contexto, el objetivo principal del presente trabajo es poner en consideración una metodología para caracterizar los medios fracturados.

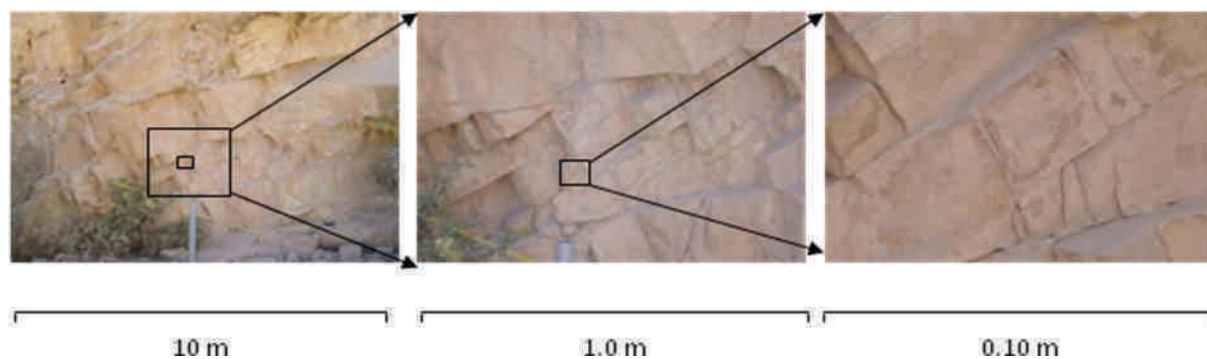
La metodología se basa en definir una relación entre la conductividad hidráulica del macizo rocoso calculada con ensayos de permeabilidad y el dimensionamiento de las fracturas contenidas en dicho macizo rocoso, utilizando fotografías con campos visuales horizontales de 10, 1 y 0.1 m. Los parámetros analizados fueron longitud total de fracturas ( $L = \sum li$ ), Intensidad de fracturas ( $I = \sum li/A$ ) y densidad de fracturas [ $D = (1/A)\sum(li/2)^2$ ] (Samaniego, et.al., 2003).

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que la densidad de fracturas (D) elimina el efecto del área, es decir, la densidad se mantiene constante con el cambio de área, por lo tanto se utilizó este parámetro para establecer la relación entre conductividad hidráulica y densidad de fracturas ya que nos permite extrapolar los resultados obtenidos de las fotografías, hacia extensiones mayores del macizo rocoso en donde no haya sufrido cambios estructurales significativos.

### METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Usando la metodología descrita por Samaniego et.al., (2003), se debe calcular la longitud, intensidad y densidad de fracturas de la siguiente forma:

- ✓ Seleccionar afloramientos de rocas libres de vegetación, con un mínimo de intemperismo y donde se observan planos de falla con un grado de fracturamiento moderado a intenso.
- ✓ En los afloramientos se procede a tomar fotografías orientadas con campos visuales que permiten cubrir, en la horizontal, una longitud aproximada de 10, 1, y 0.1 m (fotos 1, 2 y 3). Las fotografías de escalas menores deben estar incluidas en el campo visual de la fotografía de escala mayor.



Fotos 1, 2 y 3: Ejemplo de las fotografías tomadas en campo para este estudio. Cada fotografía fue tomada dentro de la que abarca la mayor área. Nótese que en cada imagen aparece, indicada con un rectángulo, el área que cubre la fotografía de acercamiento siguiente

- ✓ En un papel transparente colocado sobre las fotos se debe trazar manualmente las fracturas que se puedan observar con claridad y luego proceder a medir la longitud de cada una de ellas (figuras 1, 2 y 3).
- ✓ Con los datos de longitudes de cada fotografía, se calculan los siguientes parámetros: Longitud total de fracturas ( $L = \sum li$ ), Intensidad de fracturas ( $I = \sum li/A$ ) y Densidad de fracturas [ $D = (1/A)\sum(li/2)^2$ ].

$A = 7.22 \text{ m}^2$ ,  
 $L = 66.91 \text{ m}$ ,  
 $I = 9.27$ ,  
 $D = 0.88$

$A = 0.94 \text{ m}^2$ ,  
 $L = 12.59 \text{ m}$ ,  
 $I = 13.40$ ,  
 $D = 0.56$

$A = 0.12 \text{ m}^2$ ,  
 $L = 2.73 \text{ m}$ ,  
 $I = 23.79$ ,  
 $D = 0.75$



Figuras 1, 2 y 3: Ejemplo de trazas de fractura. En cada caso se debe dibujar manualmente cada una de las trazas de fractura usando papel transparente colocado sobre la fotografía y se mide su longitud y área para cada fotografía

- ✓ Si graficamos los valores calculados para cada parámetro con respecto al área (figuras 4, 5 y 6), veremos que la densidad es el único parámetro que no sufre variación significativa con el cambio de área, por lo cual, usaremos dicho parámetro para establecer una relación con la conductividad hidráulica y poder extrapolar los resultados para áreas mayores a las analizadas.

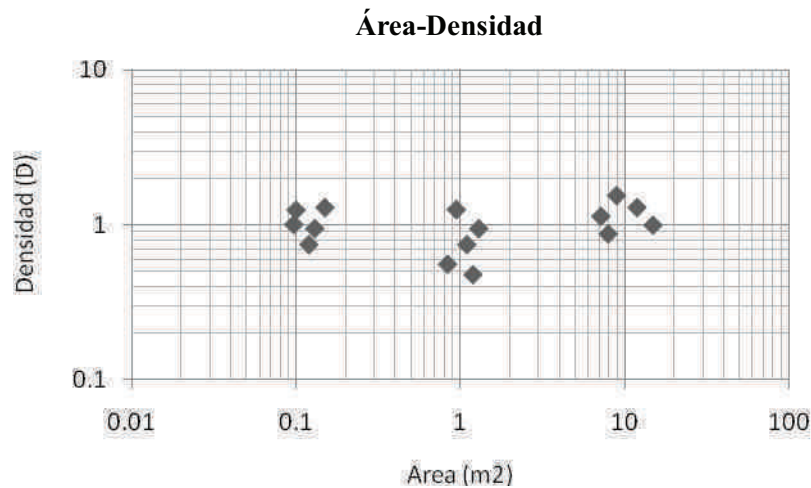


Figura 4: Gráfico logarítmico de densidad de fractura versus área. Nótese que existe un valor máximo de la densidad que tiende a la horizontal con el cambio de área

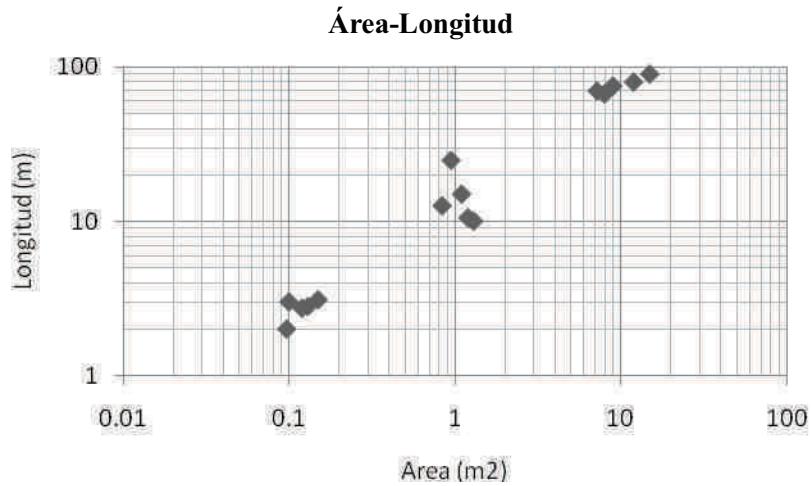


Figura 5: Gráfico logarítmico de longitud de fractura versus área. Nótese la variación ascendente con el cambio de área

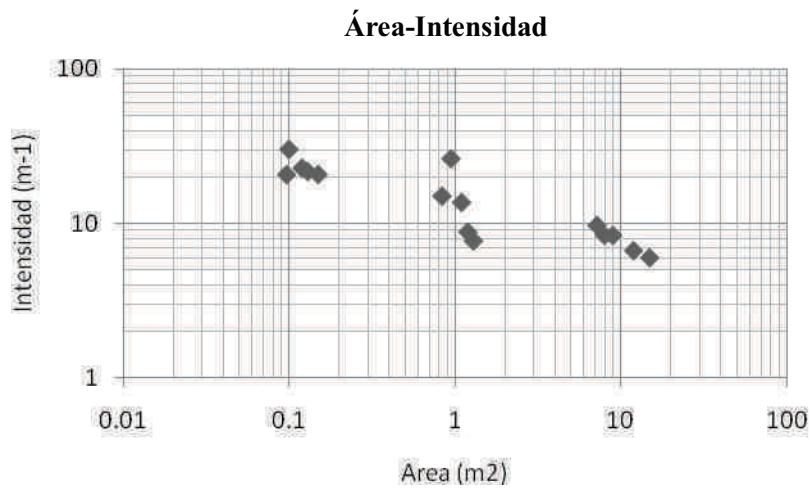


Figura 6: Gráfico logarítmico de intensidad de fractura versus área. Nótese la variación descendente con el cambio de área

- ✓ Finalmente, se estableció una escala de correlación (figura 7) entre la conductividad hidráulica calculada mediante ensayos de permeabilidad y la densidad de fracturas obtenida por el análisis de fotografías convencionales. Para ello se utilizó el diagrama de permeabilidad versus longitud de fracturas para una superficie de 10 m<sup>2</sup>, establecidas según Zimmermann (2000). Con los datos calculados, se elaboró un gráfico de caracterización hidrogeológica (figura 8).

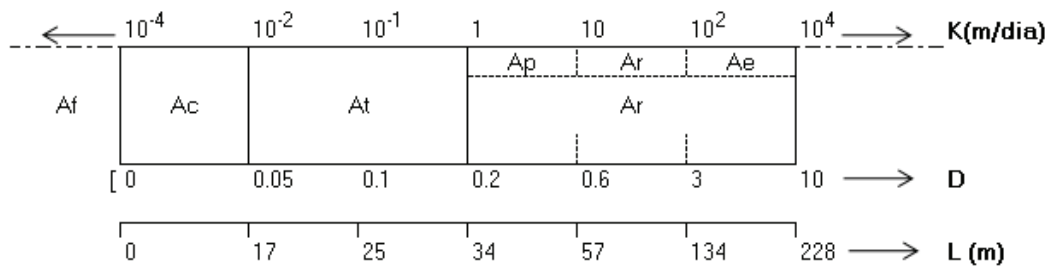


Figura 7: Escala de correlación entre conductividad hidráulica, longitud y densidad de fracturas en una superficie de 10 m<sup>2</sup>

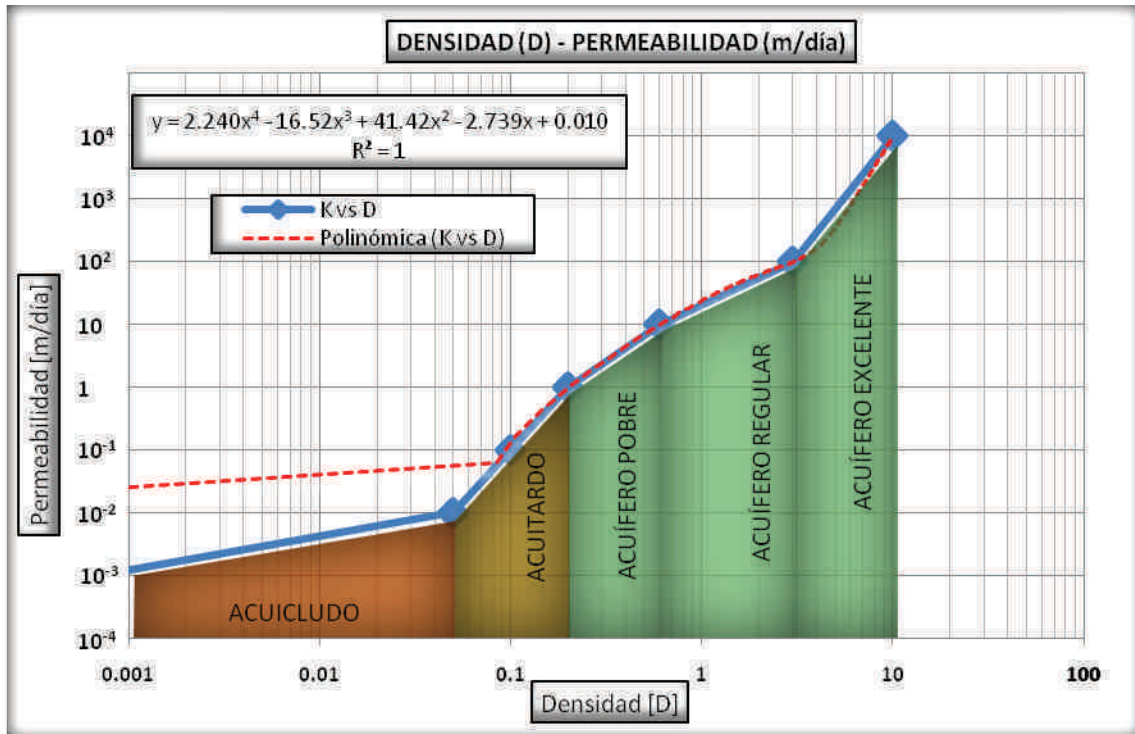


Figura 8: Diagrama de cálculo de la permeabilidad (K) en una red estocástica de fracturas en función de su densidad de fracturamiento (D). Obsérvese la curva y ecuación potencial que correlacionan las dos variables

## CONCLUSIONES

La conductividad hidráulica, expresada en m/día, será el promedio aritmético de los resultados obtenidos para las tres fotografías analizadas con el gráfico de permeabilidad vs densidad.

Para calcular la conductividad hidráulica se puede usar como referencia la ecuación polinomial de cuarto grado que se observa en la figura 8. Esta ecuación fue generada a partir de la línea de tendencia que mejor se ajusta al modelo propuesto.

Conociendo el comportamiento de un objeto a una escala determinada, la autosimilaridad permite extrapolar dicho comportamiento a una escala distinta. En el caso de la conductividad hidráulica, conociendo la distribución de fracturas en una escala, podemos determinar este parámetro en otra o todas las escalas en las cuales el objeto presenta autosimilaridad, incluyendo aquellas escalas que no podemos observar o medir por ser demasiado pequeñas o demasiado grandes.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, esta metodología nos permite extrapolar los resultados de la permeabilidad (obtenidos de las imágenes) a toda la unidad litológica-geológica.

Se aconseja que los valores obtenidos por este método, tomarlos como datos cualitativos referenciales, no reemplaza a los obtenidos mediante pruebas hidráulicas directas. Es útil para caracterizar y establecer zonas preferentes de infiltración, pero no para utilizar como valor absoluto.

## REFERENCIAS

- Nieto-Samaniego A., et al., 2003. Estimación de densidades, distribuciones de longitud y longitud total de fracturas; un caso de estudio en la Falla de Los Planes, La Paz, B.C.S. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVI, num. 1, 2003, p 1-9.
- Zimmermann, G., Burkhardt H. y Engelhard, L., 2003. Scale Dependence of Hydraulic and Structural Parameters in the Crystalline rock of the KTB. Pure appl. Geophys, vol 160, 2003.