



MUSEO
MUSEO
MUSEO

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

El museo de Geología está estructurado en tres secciones principales: Mineralogía, Petrología y Paleontología.

La sección de Mineralogía expone muestras representativas de los principales grupos de minerales, entre ellos elementos nativos, sulfuros y compuestos similares, óxidos e hidróxidos, halógenos, carbonatos, sulfatos, fosfatos, boratos y nitratos, vanadatos, arseniatos, wolframatos y silicatos de diversos países y en una se exponen minerales de la región de Moa.

La sección de Petrología expone los principales grupos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Una muestra importante lo constituye la asociación ofiolítica de la región Moa-Baracoa, por ser éste uno de los macizos ofiolíticos más grandes del mundo por el grado de aflorabilidad de las rocas ultramáficas. A partir de este sustrato rocoso se originan las cortezas de intemperismo ferroniquelíferas.

La sección de Paleontología expone un conjunto de fósiles que se disponen de forma consecutiva, de las épocas geológicas más viejas hasta el presente, apoyados con ilustraciones gráficas de algunos momentos que caracterizan un determinado período del desarrollo evolutivo, tanto de la flora como de la fauna existentes en el mismo.

**ESPERAMOS
TU VISITA**

Dependencias empíricas entre parámetros colectores e hidrodinámicos en un acuífero cársico

Ing. Rosa M. Valcarce Ortega
Ing. Jacqueline González

Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría»

RESUMEN: Las correlaciones estadísticas establecidas entre parámetros colectores e hidrodinámicos obtenidos de la interpretación de registros geofísicos de pozo en el acuífero cársico Cuenca Sur de La Habana, demuestran que aún en condiciones hidrogeológicas complejas es posible establecer dependencias estadísticas y que la resistencia transversal de las rocas, al ser un parámetro integral, ofrece los mejores valores de correlación con las propiedades hidrodinámicas del acuífero.

ABSTRACT: This paper shows the statistical relations between collector and hydrodynamical parameters obtained from well logs in boreholes of a karstic aquifer in South Basin of Havana. The best relations were found between transversal resistivity and hydrodynamical parameters.

El establecimiento de correlaciones empíricas entre parámetros colectores e hidrodinámicos resulta de gran importancia en el estudio integral de los acuíferos y en la investigación y monitoreo de la contaminación de las aguas subterráneas. Un factor importante en este análisis es el tipo de permeabilidad existente en el acuífero.

En muchos casos, para acuíferos desarrollados en materiales no consolidados que pueden ser considerados como capas homogéneas e isotrópicas, la relación entre la permeabilidad y los parámetros colectores y/o geofísicos puede ser expresada por simples relaciones matemáticas. En contraste con esto, para acuíferos desarrollados en rocas fisuradas o en rocas cársicas la permeabilidad se caracteriza por una gran heterogeneidad que hace muy difícil la selección de un modelo de interpretación, y muy compleja la determinación de relaciones entre parámetros hidrogeológicos y geofísicos.

Consideraciones teóricas

La ley de Darcy establece que:

$$Kf = Vf/GI \quad (1)$$

donde: Kf , es la conductividad hidráulica de Darcy; Vf , la velocidad de filtración del agua subterránea; y GI , el gradiente hidráulico.

Puede demostrarse además, la relación existente entre la permeabilidad absoluta y la conductividad hidráulica a través de:

$$Kf = (g/\gamma)k \quad (2)$$

donde: g , es la aceleración de la gravedad; γ , la viscosidad cinemática del fluido; y k , la permeabilidad absoluta, total o intrínseca (Pérez, 1982).

Es decir, la conductividad hidráulica depende de las características del medio y del fluido y es una función de la permeabilidad total, la cual es una medida de la mayor o menor facilidad con que el fluido circula a través del medio poroso.

A partir de la interpretación del método de dilución de sal en los pozos o método de resistivimetría con salinización (Grinbaum y Kobr, 1992) puede calcularse:

$$Vf = Vd/\alpha \quad (3)$$

donde: Vd es la velocidad aparente del agua subterránea (velocidad de dilución del electrolito en la cara, obtenida a partir de la interpretación del método de dilución de sal) y α es el coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico.

Resulta evidente entonces que al estudiar correlaciones empíricas entre Vd y parámetros geofísicos y/o colectores puede establecerse la relación que existe entre la permeabilidad absoluta y tales parámetros en el acuífero.

La literatura destaca que, en general, no puede establecerse una relación única entre la porosidad y la permeabilidad intrínseca. Los investigadores han introducido en sus experimentos características más complejas como: la forma de los granos, la tortuosidad, la relación entre el volumen y la superficie de las partículas, etcétera. En algunos casos, sin embargo, pueden existir relaciones más simples entre la porosidad y la permeabilidad, pero estas son empíricas y válidas sólo para las formaciones geológicas en que fueron determinadas, por lo que no pueden aplicarse universalmente.

Willie y Rose (1950) proponen una relación empírica más general:

$$k = c(\phi)^x / (S_w)^y \quad (4)$$

donde: ϕ es la porosidad de la roca; S_w , la saturación de agua irreducible; y c, x, y , coeficientes empíricos.

En base a esta expresión general varios investigadores han propuesto distintas relaciones empíricas con las que se puede estimar la permeabilidad intrínseca a partir de la porosidad y la saturación de agua irreducible. Tal es el caso de las ecuaciones de Tixier, de Timur, de Coates Dumanoir, etc. (Schlumberger, 1988). Vale decir que estas expresiones fueron desarrolladas para rocas con porosidad intergranular.

En realidad, el establecimiento de correlaciones empíricas entre la permeabilidad y parámetros colectores (porosidad, saturación de agua irreducible, arcillosidad) o entre la permeabilidad y parámetros geofísicos (factor de formación de la resistividad, resistividad de las capas, resistencia transversal del corte, intensidad gamma natural) no resulta una tarea sencilla. No obstante, la literatura especializada (Kelly *et al.*, 1984; Reinhard *et al.*, 1985; Mazac *et al.*, 1987 y Kelly *et al.*, 1989) reporta algunos resultados satisfactorios al explorar correlaciones entre parámetros geofísicos e hidrodinámicos, aún en condiciones hidrogeológicas complejas.

A partir de la experiencia de estos investigadores se desarrollaron modelos de correlación lineal simple entre V_d y el factor de resistividad de las rocas (F), V_d y la porosidad (ϕ), V_d y contenido de arcilla (Car). Todos estos parámetros fueron determinados a partir de la interpretación de registros geofísicos de pozo, en el acuífero cársico Cuenca Sur de La Habana. También se exploró la correlación entre V_d y el parámetro de arcillosidad relativa (Ruiz y Kobr, 1988), definido como $Car/(Car + \phi)$, y la correlación lineal entre V_d y la resistencia eléctrica transversal de intervalos cuasihomogéneos (R_T).

La porosidad de las rocas fue calculada según la ecuación de Archie; la arcillosidad, a partir de la interpretación del registro gamma natural (Ruiz y Kobr, 1988).

En los trabajos de campo se utilizó la estación húngara de métodos geofísicos en pozos K-1500. Las características técnicas de los equipos utilizados en los diferentes métodos son las siguientes:

- Cavernometría: Sonda KM-2, ruso-húngara.
Escala horizontal: 25 mm/cm.
- Intensidad gamma natural: Sonda KRGN-3-120-43s, húngara.
Escala horizontal: 1 ó 2 μ /h/cm.
- Resistividad eléctrica aparente: Sonda potencial de longitud 0,41 m; Sonda gradiente de longitud 1,64 m, ambas checas.
Escala horizontal: 5 ó 50 ohm-m/cm.
- Resistivimetría: Sonda AQUALOG, checa.
Escala horizontal: 1 ó 2 ohm-m/cm.
- La escala vertical para todos los registros fue de 1:200.

Resultados

La Cuenca Sur de La Habana, donde se ubican los pozos estudiados (Figura 1), constituye un acuífero desarrollado en rocas carbonatadas carsificadas. Las pruebas de hipótesis de estabilidad de la correlación fueron verificadas en todos los casos para un 95 % de probabilidad.

Los resultados obtenidos para el pozo I-II-21K se ofrecen en la Tabla 1.



FIGURA 1. Ubicación del área de estudio.

TABLA 1. Resultados del análisis de correlación estadística en el pozo I-II-21K (N = 93)

Ecuación	r	Análisis de la correlación
$V_d = 15,96\phi + 13,04$	0,44	Estable
$V_d = -3,46 \log(Car) + 13,06$	-0,49	Estable
$V_d = -3,48 \log(Car / (Car + \phi)) + 14,46$	-0,49	Estable
$\log(V_d) = 0,36\phi + 1,12$	0,49	Estable
$\log(V_d) = -0,087 \log(Car) + 1,12$	-0,56	Estable
$\log(V_d) = -0,081 \log(Car / (Car + \phi)) + 1,2$	-0,56	Estable

r: coeficiente de correlación lineal.
N: número de intervalos estudiados.

De los resultados se desprende que el aumento de la porosidad del colector influye en el aumento de la velocidad de filtración del agua subterránea y que el crecimiento de la arcillosidad provoca una disminución de la velocidad del flujo subterráneo. Es decir, que el incremento de la intensidad gamma natural refleja, en gran medida, un acrecentamiento del contenido de arcilla y una disminución de la permeabilidad del colector.

Al aplicar el Análisis Euclidiano de Agrupación sobre las variables: resistividad eléctrica (R_T); factor de formación de la resistividad (F); porosidad (ϕ); intensidad gamma natural (Ig); contenido de arcilla (Car), fue posible separar dos grupos, uno con elevada porosidad y baja arcillosidad (grupo A) y otro con porosidad media y elevada arcillosidad (grupo B) ver Tabla 2.

TABLA 2. Valores medios de los grupos definidos a partir del Análisis Euclidiano de Agrupación para el pozo I-II-21K

Grupo	N	Rt(ohm-m)	F	ϕ (%)	Ig (μ / h)	Car (%)
A	67	127	6	30	4	9
B	26	461	24	11	6	39

En las Tablas 3 y 4 aparecen los resultados de la evaluación para cada grupo de la relación entre la velocidad de dilución y las propiedades colectoras de las rocas.

TABLA 3. Resultados del análisis de correlación estadística para el grupo A del pozo I-II-21K (N = 67)

Ecuación	r	Análisis de la correlación
$V_d = 20,68\phi + 11,14$	0,64	Estable
$V_d = -3,68 \log(Car) + 12,29$	-0,61	Estable
$V_d = -3,64 \log(Car / (Car + \phi)) + 13,89$	-0,63	Estable
$\log(V_d) = 0,45\phi + 1,09$	0,62	Estable
$\log(V_d) = -0,085 \log(Car) + 1,11$	-0,63	Estable
$\log(V_d) = -0,083 \log(Car / (Car + \phi)) + 1,15$	-0,65	Estable

Evidentemente, la estimación de la porosidad según la ecuación de Archie resulta efectiva para el grupo A, dada la alta correlación que existe entre este parámetro y la velocidad de dilución.

En el caso del grupo B no existe correlación entre V_d y la porosidad de Archie, o sea, en este grupo el comportamiento de los parámetros hidrodinámicos está de-

terminado fundamentalmente por la arcillosidad relativa, lo que se corrobora con la correlación obtenida entre V_d y $\log(Car / (Car + \phi))$.

TABLA 4. Resultados del análisis de correlación estadística para el grupo B del pozo I-II-21K (N = 26)

Ecuación	r	Análisis de la correlación
$V_d = 13,14\phi + 14,58$	0,11	No existe
$V_d = -8,51 \log(Car) + 11,49$	-0,44	No estable
$V_d = -41,44 \log(Car / (Car + \phi)) + 9,47$	-0,77	Estable
$\log(V_d) = 0,10\phi + 1,17$	0,05	No existe
$\log(V_d) = -0,14 \log(Car) + 1,11$	-0,42	No estable
$\log(V_d) = -0,67 \log(Car / (Car + \phi)) + 1,08$	-0,70	Estable

Al tener en cuenta los resultados de otros investigadores (Kelly *et al.*, 1984; Reinhard *et al.*, 1985) se estudió la correlación estadística entre la resistencia transversal de intervalos cuasihomogéneos y la velocidad de dilución promedio de estos. Para el pozo I-II-21K se definieron ocho intervalos cuasihomogéneos (Figura 2). La correlación entre los dos parámetros que se analizan resulta estable para un 95 % de probabilidad.

En la Figura 3 aparecen los resultados obtenidos para 18 intervalos al extender el estudio a seis pozos del acuífero. Se destaca la existencia de una correlación lineal inversa, estable para un 95 % de probabilidad, entre la resistencia transversal y la velocidad del agua subterránea.

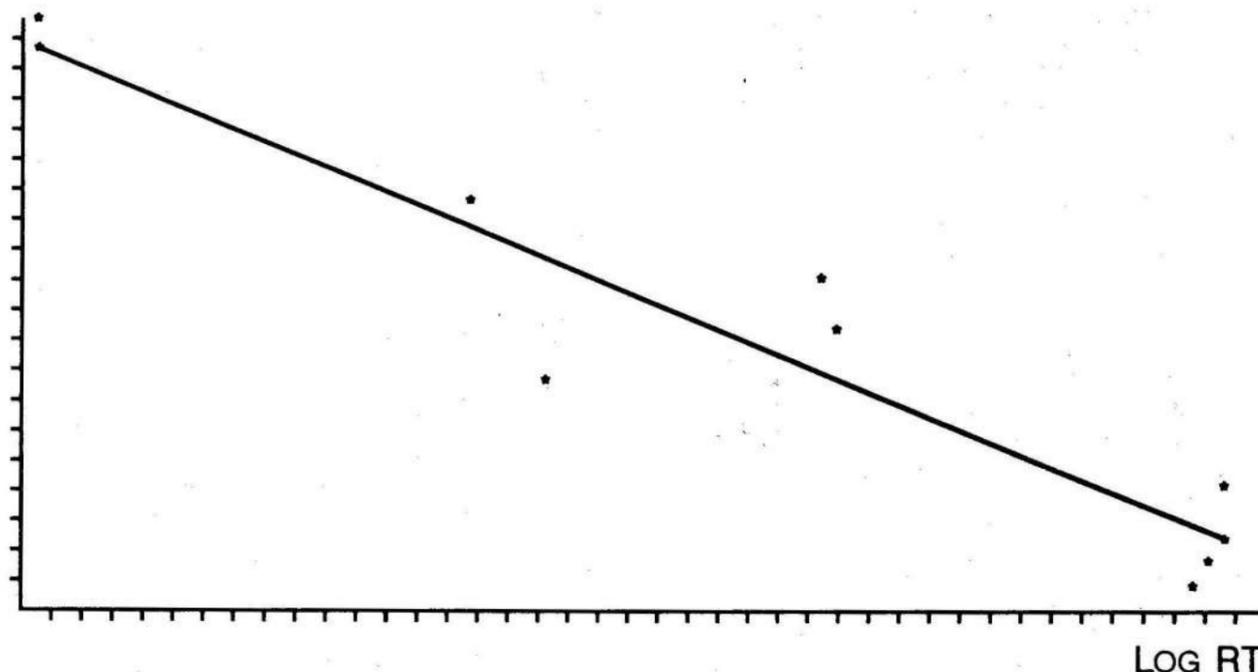


FIGURA 2. Correlación estadística entre el logaritmo de la resistencia transversal y la velocidad de dilución de intervalos cuasihomogéneos para el pozo I-II-21K.

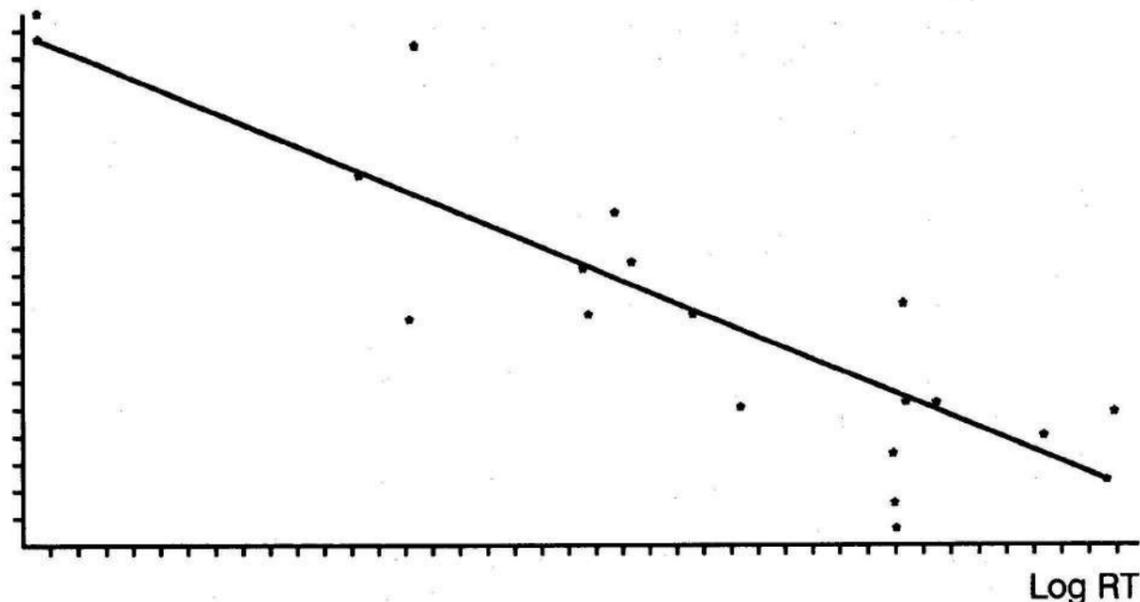


FIGURA 3. Correlación estadística entre el logaritmo de la resistencia transversal y la velocidad de dilución de intervalos cuasihomogéneos para 6 pozos del acuífero.

CONCLUSIONES

El estudio de dependencias estadísticas entre la velocidad del flujo del agua subterránea y las propiedades colectoras obtenidas de la interpretación de registros geofísicos en pozos del acuífero cársico estudiado permite afirmar que:

- Aún en condiciones hidrogeológicas complejas, existen determinadas relaciones entre los parámetros colectores e hidrodinámicos que no son relaciones universales, sino dependencias empíricas, particulares para cada situación concreta, que son de gran utilidad práctica para el estudio integral de los acuíferos en la protección y monitoreo de las aguas subterráneas.
- La variación de la porosidad y la arcillosidad condiciona el comportamiento de los parámetros hidrodinámicos del colector.
- Para colectores con alto contenido de arcilla, el parámetro de arcillosidad relativa es el que define el comportamiento de la velocidad del flujo de agua subterránea.
- Al ser la resistencia transversal de las capas un parámetro integral, capaz de reflejar la heterogeneidad y la anisotropía del medio geológico, resulta un parámetro geoelectrónico de gran utilidad para el estudio de las propiedades hidrodinámicas de acuíferos de estructura compleja como es el caso de los acuíferos cársicos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFONSO, J.: *Estadística en las ciencias geológicas*, 2t., ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1989.
- ESCARTÍN, E. y W. RODRÍGUEZ: *Manual del usuario del sistema MULVAR*, 78 pp., Dpto. de Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1988.
- GRINBAUM, I.I.: *Métodos geofísicos para determinar la filtración en los poros de las rocas*, 120 pp., Nedra, Moscú, 1965 (en ruso).

KELLY, W.E. y P.F. REITER: «Influence of anisotropy on relations between electrical and hydraulic properties of aquifers», *Journal of Hydrology*, no. 74, pp. 311-321, 1984.

KELLY, W.E.; T. GORMAN y B. CURTIS: «Relationships between the unsaturated electrical and saturated hydraulic properties of soils», *Journal of Hydrology*, no. 109, pp. 115-123, 1989.

KOBR, M.: *Poder de resolución de los métodos geofísicos en las calas hidrogeológicas e ingeniero geológicas*, 134 pp., IMTA, Ciudad México, 1992.

KOBR, M.; M. STANISLAV y Z. ANTONIN: «Testificaciones geofísicas no convencionales aplicadas a la hidrodinámica de acuíferos», *Tecnología del agua*, pp. 62-71, febrero, 1993.

MARES, S.: *Interpretación compleja de carotaje en las investigaciones hidrogeológicas e ingeniero geológicas*, Texto de la Facultad de Ciencias Naturales, 110 pp., Universidad de Carlos, Praga, 1985.

MAZAC, O. y W.E. KELLY: «Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies», *Journal of Hydrology*, no. 93, pp. 163-176, 1987.

PÉREZ, F.D.: *Hidráulica subterránea*, 424 pp., Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, 1982.

Principios/Aplicaciones de la interpretación de registros, 197 pp., Schlumberger, Educational Services, 1988.

REINHARD, K.F. y W.E. KELLY: «The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposits», *Journal of Hydrology*, no. 79, pp. 215-229, 1985.

RODRÍGUEZ, W. y R. VALCARCE: *Manual del usuario del sistema SAICAR*, 90 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1992.

RUIZ, J. y M. KOBR: *Métodos geofísicos en pozos*, 417 pp., ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1988.

VALCARCE, R.M. et al.: *Manual del usuario del sistema HIDROG*, 30 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1992.

VALCARCE, R.M.: *Métodos geofísicos en pozos para el estudio de acuíferos cársicos*, Tesis de Maestría, 74 pp., Dpto. Geofísica, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1995.

Evaluación del coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico (α) para la interpretación del método de dilución de sal

Ing. Rosa M. Valcarce Ortega
Ing. Jacqueline González Espinosa
Ing. Hilda Irene Maceira García

Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría»

RESUMEN: Se expone una metodología para evaluar el coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico de forma continua a lo largo de una cala, empleando los resultados del método de resistividad con salinización de ensayos hidrogeológicos, y de la interpretación de registros geofísicos en pozos convencionales que reflejen las propiedades colectoras de las rocas. La aplicación de esta metodología permite evaluar con mayor precisión la relación entre la velocidad de filtración aparente medida en el pozo y la velocidad de filtración real del agua subterránea en las rocas.

ABSTRACT: This paper shows a methodology to evaluate the coefficient of distortion of hydrodynamical field continually in the well; from results of hydrogeological tests and the interpretation of conventional well logs that reflect the collector properties of rocks. This methodology lets to evaluate with high accuracy the relation between the values of velocity flow of groundwater measure in the well and the real values of velocity flow of groundwater.

La Geofísica de Pozo abarca una serie de métodos especiales que permiten solucionar la tarea de la dinámica del agua en los pozos y evaluar las propiedades de filtración de las rocas. Estos métodos tienen la ventaja de poder determinar con elevada precisión y a diferentes intervalos a lo largo de la cala, el gasto parcial de horizontes individuales, la velocidad de filtración del agua subterránea, el coeficiente de filtración y la transmisividad del acuífero.

Las pruebas hidrogeológicas en general, brindan un valor promedio de estos parámetros para todo el espesor del acuífero, y nos permiten estudiar la variación de los mismos a lo largo del pozo, lo cual resulta de gran importancia en el estudio detallado de las características hidrogeológicas del acuífero y en el monitoreo de la contaminación de las aguas. Debe destacarse también el relativo bajo costo de los métodos geofísicos en pozos en comparación con las pruebas hidrogeológicas.

Para el estudio del flujo horizontal en un pozo se puede emplear el método de dilución del líquido contaminado, el cual permite determinar la velocidad de filtración del agua subterránea (Kobr *et al.*, 1993). El fundamento del método se basa en investigar la variación de la concentración de un indicador con el tiempo, lo cual es una función de la velocidad de filtración del agua subterránea. Como indicador puede emplearse el cloruro de sodio (método de resistividad con salinización), un colorante (método de fotometría) o un material radiactivo que no sea absorbido y que tenga un período de desintegración adecuado (método de trazador radiactivo).

Para la evaluación de los parámetros hidrodinámicos en este trabajo se empleó el método de resistividad con salinización, o método de dilución de sal.

A partir de la interpretación del método de resistividad con salinización es posible calcular la velocidad de dilución del electrolito en la cala (Ginbaum, 1965). La relación entre esta velocidad y la velocidad de filtración del agua subterránea en las rocas es igual a:

$$V_f = \frac{V_d}{\alpha} \quad (1)$$

donde: V_d es la velocidad de dilución del electrolito en la cala; V_f , la velocidad de filtración del agua subterránea en el acuífero; α , el coeficiente de distorsión del campo hidrodinámico, o lo que es lo mismo, relación entre la velocidad de filtración en el pozo y en la roca.

El parámetro α puede variar en un rango relativamente amplio, entre 0,5 y 4, y es necesario realizar un amplio análisis con el objetivo de determinar su valor óptimo en las diferentes situaciones hidrogeológicas e hidrodinámicas que pueden presentarse en la práctica.