

Aproximación a los conceptos de permeabilidad, dispersividad y porosidad eficaz mediante un ensayo de columna lisimétrica

Aproximation to permeability, dispersivity and porosity concepts with a lisimetric column

J. Temiño, R. Vicente y I. Muñoz

Dpto. de Geología, Univ. de Alcalá, Nal. II, km. 33,600 Alcalá de Henares-28871 (Madrid).

ABSTRACT

A practice of laboratory has been realized in order to characterize hydrogeological concepts from a detrital material (sand) through an experiment using a big lisimetric column. We want to get the student used to face up to a real fact in groundwater dynamic and movility of contaminants, by control of the basic parameters in hidogeology (permeability, dispersion, dispersivity and porosity).

Key words: *lisimetric column, sand, permeability, dispersion, dispersivity and porosity*

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1467-1469

ISSN:0213683X

Introducción y objetivos

En este artículo, se exponen resumidamente el fundamento teórico, el material utilizado y el desarrollo de una práctica de laboratorio realizada por los autores con alumnos de la asignatura de Geoquímica de cuarto curso de la licenciatura de Ciencias Químicas de la Universidad de Alcalá. La práctica pretende acercar a los alumnos a la comprensión de los principales aspectos que condicionan la dinámica del agua subterránea y la movilidad en ella de los contaminantes.

La práctica consiste básicamente, en la caracterización de la permeabilidad (k), dispersión longitudinal (D), dispersividad longitudinal (α), y porosidad eficaz (m_e) de una muestra de arena, mediante un ensayo en columna lisimétrica de gran tamaño. Aunque la práctica plantea algunos inconvenientes de orden logístico (fundamentalmente, el disponer de una columna lisimétrica y el control continuo del ensayo durante más de 24 horas), resultó muy eficaz para cubrir los objetivos previstos, pudiendo ser muy útil en otras asignaturas universitarias (hidrogeología, hidrogeoquímica, etc.) e incluso en los últimos cursos de bachillerato y en COU.

Desarrollo y datos del ensayo

La práctica consiste en ensayar una muestra de material detrítico suelto (arena en este caso) que colocada en el interior de un cilindro con base finamente enrejillada (columna lisimétrica), permite el flujo verti-

cal a velocidad constante del agua a su través, funcionando como un permeámetro de carga constante (Fig. 1). La introducción, a partir de un momento dado, de una disolución acuosa que contenga un ion trazador (Cl^- en este caso), permite estudiar la dispersión de dicho ion al atravesar la arena de la columna, controlando el incremento progresivo de la concentración del ion a la salida de la columna (Tabla I y Fig. 2). La elección de Cl^- como trazador se debe tanto a sus características no reactivas con el material ensayado, como a su fácil análisis cuantitativo mediante valoración volumétrica.

En primer lugar se rellenó parte de la columna lisimétrica con una arena eólica del entorno del VRSU de Cantalejo (Segovia), compactándola manualmente, hasta alcanzar 135 cm de altura. A continuación, se pasó a saturar la arena introduciendo agua destilada por la base; el proceso de saturación debe realizarse muy lentamente para evitar la formación de burbujas de aire. Seguidamente, se procedió a introducir agua destilada por la parte alta de la columna, que quedaba permanentemente estabilizada por el flotador de entrada a 8,4 cm por debajo del borde superior de la columna y se colocó la salida del tubo de desagüe a 19,8 cm bajo dicho borde superior de la columna (Fig. 1). De esta manera, se alimenta un flujo descendente con un gradiente hidráulico estable durante todo el ensayo. En estas condiciones se mantuvo el movimiento de agua destilada durante 24 horas, para lavar la arena y estabilizar el flujo dentro de la columna. El caudal de salida (medido con una probeta) al concluir el lavado era de 9,4

cm^3/min , por lo que se prepararon 25 l de disolución del trazador (más del volumen que se necesitaría durante el tiempo de duración del ensayo) para realizar la práctica. Se permitió el desagüe de la columna hasta quedar saturada la arena en su borde superior y se tapó la salida del agua para anular el flujo. Inmediatamente después se sustituyó, con mucho cuidado, la entrada de agua por la disolución del ion trazador, de tal manera que el contacto agua destilada-trazador fuera neto en la parte superior de la arena. Finalmente se destapó el desagüe de la columna, permitiendo el flujo en las mismas condiciones que las 24 horas anteriores (pero ahora introduciendo la disolución en vez de agua destilada) y dio comienzo el control del ensayo (tiempo=0).

El ensayo fue controlado durante 28 horas, según se muestra en la Tabla I, midiendo el caudal y la conductividad del efluente, a la vez que se iban tomando y almacenando en frigorífico, 100 cm^3 de muestra. En función de los datos de conductividad medidos, se seleccionaron 19 muestras (una de ellas, de la disolución inyectada), en las que se valoró la concentración del ion Cl^- (Tabla I) con AgNO_3 (0,005N) y KCrO_4 como indicador.

Se ha corregido el tiempo de muestreo a la salida del desagüe restándole el tiempo que ha tardado el fluido muestreado en recorrer el espacio entre la base de la arena y la salida del desagüe. En este caso, se ha considerado, a efectos prácticos, un tiempo de tránsito de una hora, ya que la cámara basal de la columna y el tubo de desagüe tienen un volumen de 560 cm^3 y el caudal

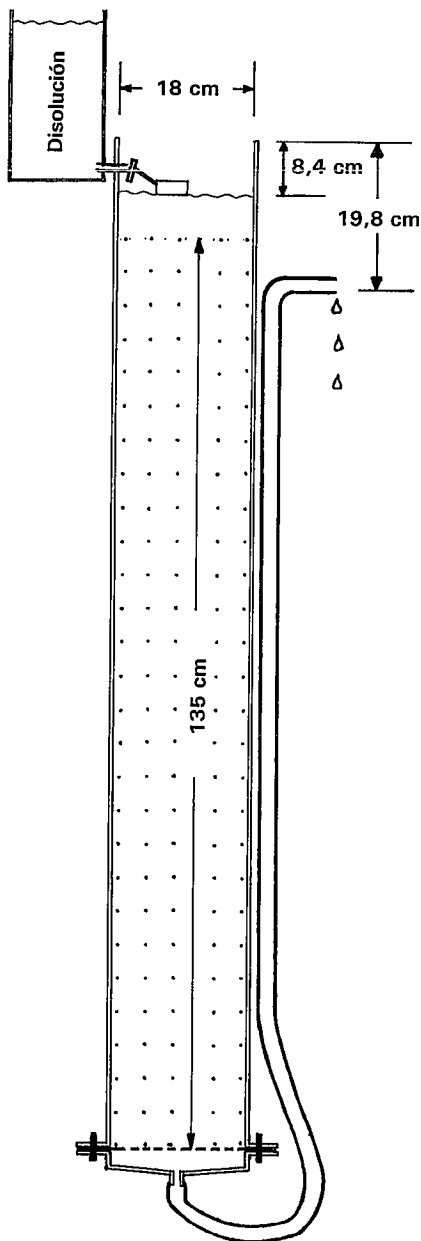


Fig. 1.- Columna lisimétrica.
Fig. 1.- Lisimetric column.

de flujo ha oscilado entre 9,4 y 10,1 cm³/min (Tabla I).

Fundamento teórico e interpretación

Los conceptos teóricos, que a continuación se detallan, se pueden consultar en Freeze and Cherry (1982), Custodio y Llamas (1983) y Domenico and Schwartz (1990), entre otros.

Permeabilidad: El movimiento del agua subterránea a través de medios porosos está regido por la ley de Darcy:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

$$V_R = (k \cdot i) / m_e \quad (2)$$

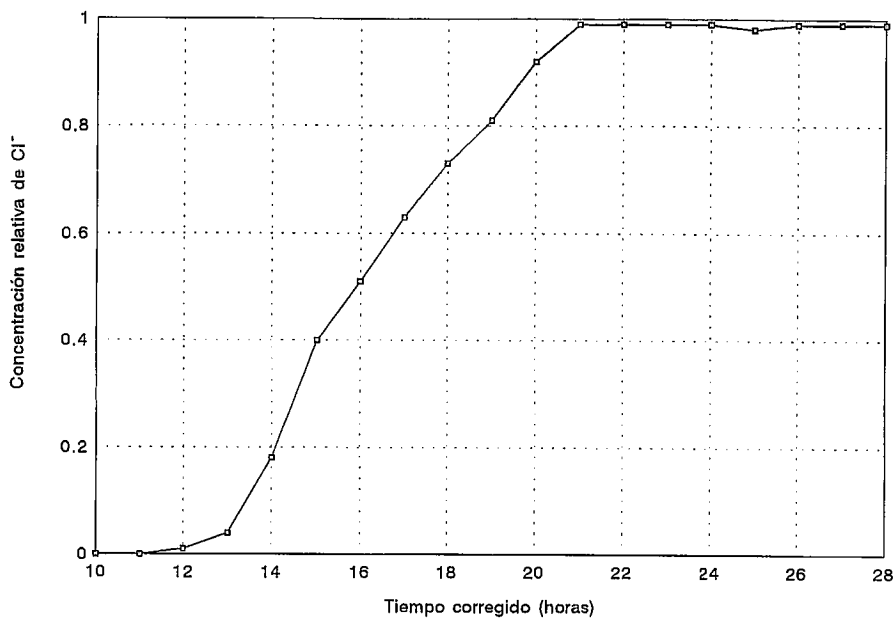


Fig. 2.- Representación gráfica de la concentración relativa del Cl⁻ frente al tiempo corregido (en horas).

Fig. 2.- Graphical representatin of relative concentration of Cl⁻ versus modified time (in hours).

donde, Q= caudal [L³/T] que fluye a través de una sección A,
A= sección circular de la columna [L²], 254,47 cm² en nuestro caso,
k= permeabilidad del terreno [L/T],
i= gradiente hidráulico (adimensional),
V_R= velocidad del agua subterránea [L/T],
m_e= porosidad eficaz (adimensional).

Considerando el ensayo de columna como realizado en un permémetro de carga constante, con gradiente hidráulico (i)= [(19,8 cm - 8,4 cm)/135 cm]= 0,084, y aplicando la ley de Darcy (1):

Para Q= 9,4 cm³/min k= 0,44 cm/min

Para Q= 10,1 cm³/min k= 0,47 cm/min

Se puede considerar por tanto, una permeabilidad media de 0,455 cm/min.

Dispersión longitudinal:

La dispersión es el proceso de mezcla experimentalado por dos fluidos miscibles (en este caso agua destilada y disolución) al moverse a través del complicado entramado de poros de la arena ensayada. La velocidad a través de los poros no es homogénea, sino mayor en la parte central de ellos y menor en sus laterales (debido al rozamiento con los granos). El efecto final es que la salida del frente de contaminación, que era neto en la parte alta de la columna, no se produce bruscamente, sino gradualmente (Tabla I).

Simultáneamente al efecto de la dispersión, se produce un efecto de difusión molecular en el frente de avance de la disolución, no obstante si la velocidad media del agua es mayor de 4 cm/h, el efecto de la difusión es despreciable respecto a la dis-

persión (Custodio & Llamas, 1983). En estas condiciones, el ensayo de columna es adecuado para el cálculo de la dispersión en la dirección del flujo (dispersión longitudinal).

Para el análisis de dicha dispersión, deben expresarse las concentraciones del ion trazador a la salida de la columna en forma de concentraciones relativas (Tabla I), siendo

$$C_R = \frac{C - C_0}{C_n - C_0} \quad (3)$$

donde, C_R= concentración relativa del ion (adimensional).

C= concentración medida a la salida de la columna en cada momento [M/L³],

C_n= concentración en la disolución a la entrada de la columna [M/L³],

C₀= concentración en el agua de la columna en la que se produce la dispersión [M/L³].

La dispersión se visualizará, por lo tanto, como una variación temporal de la C_R a la salida de la columna, desde 0 (antes de la llegada del frente de dispersión, es decir, sin trazador) hasta 1 (una vez que ha pasado el frente de dispersión y, por tanto, llega la concentración total del trazador inyectado) (Fig. 3). Cuanto mayor sea el efecto de la dispersión, mayor será el tiempo en que C_R del trazador pase de 0 a 1, pudiéndose calcular la dispersión longitudinal a partir de la desviación típica de la curva C_R-tiempo, que teóricamente debe de ser simétrica respecto a C_R= 0,5. El valor de la desviación típica en el intervalo C_R entre 0,159 y 0,5 ha de ser teóricamente equivalente al que se obtenga entre 0,5 y 0,841, y es:

| tiempo (h) | t. corregido (h) | conductividad (μS/cm) | caudal (cm³/min) | Cl⁻ (mg/l) | C _R |
|------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------|----------------|
| 0 | | | | | |
| 4 | 3 | 60 | 9,4 | | |
| 7 | 6 | 55 | 9,4 | | |
| 9 | 8 | 53 | 9,4 | | |
| 10 | 9 | 54 | 9,4 | 5 | 0,01 |
| 11 | 10 | 53 | 9,4 | 5 | 0,01 |
| 12 | 11 | 53 | 9,4 | 3 | 0,00 |
| 13 | 12 | 55 | 9,5 | 5 | 0,01 |
| 14 | 13 | 88 | 9,5 | 11 | 0,04 |
| 15 | 14 | 192 | 9,5 | 40 | 0,18 |
| 16 | 15 | 308 | 9,6 | 87 | 0,40 |
| 17 | 16 | 388 | 9,6 | 111 | 0,51 |
| 18 | 17 | 449 | 9,6 | 136 | 0,63 |
| 19 | 18 | 505 | 9,6 | 156 | 0,73 |
| 20 | 19 | 561 | 9,8 | 174 | 0,81 |
| 21 | 20 | 611 | 9,8 | 196 | 0,92 |
| 22 | 21 | 646 | 9,8 | 210 | 0,99 |
| 23 | 22 | 653 | 10,0 | 211 | 0,99 |
| 24 | 23 | 657 | 10,0 | 211 | 0,99 |
| 25 | 24 | 661 | 10,0 | 211 | 0,99 |
| 26 | 25 | 661 | 10,1 | 209 | 0,98 |
| 27 | 26 | 661 | 10,1 | 212 | 0,99 |
| 28 | 27 | 661 | 10,1 | 212 | 0,99 |
| Disol. inyectada | | 645 | | 213 | |

Tabla I. Resultados del ensayo de columna lisimétrica, utilizando Cl⁻ como trazador.

Table I. Results of the practice with a lisimetric column, using Cl⁻ as non-reactive ion.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2Dl t_{0.5}}{V_R^2}} \quad (4)$$

donde, σ = desviación típica,
 D = dispersión longitudinal [L²/T]
 V_R = velocidad del flujo en la columna [L/T]
 t_{0.5} = tiempo transcurrido desde la inyección del trazador y la salida de su C_R = 0,5 por la base de la arena de la columna [T].

El momento en que C_R = 0,5, corresponde a aquel en el que saldría el ion por la base de la arena si no existiera dispersión, y, por lo tanto, caracteriza la velocidad media del flujo en la columna conforme a la ecuación:

$$W_k = \frac{l}{t_{0.5}} \quad (5)$$

donde, l = longitud de arena en la columna [L]

En el ensayo realizado, l = 135 cm (Fig. 1) y t_{0.5} = 15,9 h (Fig. 3); por lo tanto, V_R = 135 cm / 15,9 h = 0,14 cm/min

Conocido t_{0.5} y V_R, se puede obtener la dispersión longitudinal (D) a partir de la desviación típica (σ) de la curva de la figura 3:

σ (entre 0,159 y 0,5) = 15,9h - 13,9h = 2h = 120 min

σ (entre 0,5 y 0,841) = 19,2h - 15,9h = 3,3h = 198 min

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (4) y despejando D, se obtiene que, para σ = 120 min D₁ = 0,148 cm²/min para σ = 198 min D₂ = 0,403 cm²/min

Dispersividad longitudinal: La dispersión de un ion en un medio dado no es una constante, sino que varía al hacerlo la velocidad de flujo. El parámetro que define las características dispersivas intrínsecas del terreno en la dirección del flujo es la dispersividad longitudinal (α_l), tal que:

$$D_l = V_R \alpha_l \quad (6)$$

Sustituyendo los valores de V_R y D₁ calculados anteriormente y despejando α_l en la ecuación (6), se obtiene que:

para D₁ = 0,148 cm²/min α_l = 1,1 cm

para D₂ = 0,403 cm²/min α_l = 2,9 cm

Estos valores de dispersividad son muy parecidos a los obtenidos en arenas eólicas similares (Temño y Bustamante, 1993; Temño, 1994).

Porosidad eficaz: Conociendo la permeabilidad de la arena (0,455 cm/min), el gradiente hidráulico (0,084) y la velocidad media del trazador durante el ensayo (0,14 cm/min), se puede obtener la porosidad eficaz de la arena (m_e) a partir de la ecuación (2)

$$m_e = 0,27 = 27\%$$

Consideraciones finales

Se han expuesto los criterios básicos para el estudio de algunos aspectos que condicionan la dinámica del agua subterránea y la movilidad de contaminantes a través de una práctica de laboratorio, que, si bien supone una cierta dificultad por la construcción de la columna y el control continuo del ensayo durante más de 24 horas, los resultados obtenidos tienen un elevado interés didáctico por varios motivos:

* Los alumnos se enfrentan a un hecho real, que incrementa su interés y receptividad.

* El ensayo de columna les ayuda a asimilar y manejar con soltura algunos de los parámetros básicos en hidrogeología e hidrogeoquímica.

* Es un método en el que se pueden integrar trabajos tan básicos y diversos como: muestreo de material en campo, técnica de muestreo y conservación de muestras de agua, control de ensayos en laboratorio mediante diversos parámetros químicos (conductividad, valoración de Cl⁻, pH, etc) y otros (granulometría).

* Por último, se aprende a caracterizar y asumir los errores propios en la interpretación del ensayo y los derivados de ser un caso real (errores en las valoraciones, no estabilización del flujo, etc).

Referencias

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, 2350 pp.
 Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley and sons (eds). 824 pp.
 Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1982). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. 640 pp.
 Temño, J. (1994). *Tesis Doctoral*, Univ. de Alcalá.
 Temño, J. y Bustamante, I. (1993). *Geogaceta*, 13: 122-124.