MOVILIDAD DE NUTRIENTES EN SUELOS I: Medición del coeficiente de Dispersión hidrodinámica

L.B. Di Pietro, G. Mazzei de Planas, G. Novas

LAQUIGE (CONICET) J.R. de Velasco 847 - 1414 Buenos Aires

RESUMEN

Se diseñó y construyó un equipo de laboratorio para estudiar el desplazamiento miscible de distintas sustancias en columnas de suelo de longitud variable. El mismo permite regular la velocidad de flujo de alimentación, la inyección de nutrientes y el contenido de humedad de la muestra.

Con el equipo diseñado se midió el coeficiente de dispersión hidrodinámica, D, de una columna de arena y del horizonte A de un argiudol de Pergamino, inyectando anión cloruro como trazador con el método de impulso instantáneo. Se analizaron las curvas de elución y se estudió el ajuste de las mismas con las resoluciones numéricas halladas por Brenner de la ecuación de transporte miscible en variables adimensionalizadas.

NUTRIENTS DISPLACEMENT IN SOILS I: Measurement of Hydrodynamic dispersion coefficient

ABSTRACT

In order to measure the miscible displacement of some nutrients in soil columns of different lengths, a laboratory apparatus was outlined and built ad hoc. This equipment allows a good control of injection rate, adding of nutrients and control of moisture content in the sample.

Hydrodynamic dispersion coefficient. D. was measured in a sand column and in an A horizon of an Argiudoll soil at Pergamino (Pcia. de Buenos Aires) adding a chloride tracer with the method of instant impulse.

Breakthrough curves were analyzed and their fitting with the numerical values found by Brenner of the miscible transport equation in addimensional variables, was studied.

INTRODUCCION

La cuantificación del transporte de sustancias químicas en medios porosos tales como el suelo, es importante para su aplicación en diversas disciplinas como son la absorción cromatográfica, la salinización y desalinización de suelo por efectos del agua de riego, la contaminación de napas por uso de pesticidas, movilidad de fertilizantes e interacción de trazadores, entre otros.

La migración de elementos involucra procesos fisicoquímicos de diversa naturaleza. Los solutos que se desplazaon en un fluido a través del medio poroso lo hacen por flujo masal y por difusión. El flujo en una columna de suelo es errático y varía en magnitud y dirección debido a la compleja geometría del medio (Kirkham, 1972). El soluto, a su vez, se dispersa en el fluído desplazado. Scheideggar (1961) llamó a este fenómeno dispersión hidrodinámica, para diferenciarlo de la difusión, la cual es causada por el movimiento térmico aleatorio de las moléculas del soluto, mientras que la dispersión es debida al flujo errático del fluído en el medio poroso. La distribución de solutos se ve afectada además por reacciones químicas, fenómenos de absorción, fijación y precipitacion.

A partir de los trabajos de Nielsen *et al.* (1961, 1962), Biggar *et al.* (1962, 1963) Elrick *et al.* (1966), Rose *et al.* (1971) se obtiene abundante información experimental sobre el desplazamiento miscible de solutos en columnas de suelo. Para interpretar los resultados experimentales se han propuesto diferentes modelos. Boast (1973) realiza una recopilación de los mismos que tienen en cuenta aspectos parciales del proceso y muestra como éstos pueden combinarse en uno que sintetiza todos los fenómenos involucrados.

Sine *et al.* (1978) basándose en consideraciones teóricas elabora un modelo general de desplazamiento miscible de solutos en medios porosos. En esencia ambos son semejantes. La expresión matemática del mismo es:

$$\rho \frac{\partial S}{\partial T} + \Theta \frac{\partial C}{\partial T} = \Theta D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - q \frac{\partial C}{\partial X} - Q$$

Siendo X y T: coordenadas espaciales y temporales respectivamente.
C: concentración de soluto por unidad de volumen.
S: cantidad de soluto absorbido por unidad de masa de suelo seco.
ρ: densidad aparente del suelo.
Θ: contenido de humedad volumétrica.
D: coeficiente de dispersión hidrodinámica.
q: flujo en la dirección O – X.
Q: velocidad de extracción irreversible (precipitación, inmovilización).

Existen numerosas soluciones analíticas de la ecuación para distintas condiciones iniciales y de contorno, tales como las propuestas por Selim *et al.* (1976), Cameron *et al.* (1977), Sine *et al.* (1979), entre otros.

Todas ellas implican conocer la relación entre S y C, la función Q y el valor del parámetro D en función de Θ.

La relación entre S y C y la función Q dependen del soluto y del suelo.

El parámetro D (Θ) depende del suelo exclusivamente.

Con el objeto de modelar el desplazamiento de distintos nutrientes en suelos se desarrollaron una serie de experiencias en columnas de suelo.

El objeto de este primer trabajo ha sido:

– diseñar y construir un equipo de laboratorio que permita estudiar el desplazamiento miscible de distintas substancias en columnas de suelo no disturbado,

medir el coeficiente de dispersión hidrodinámica en suelos.

MATERIALES Y METODOS

Aparato utilizado

Se diseñó un equipo de laboratorio para el estudio de procesos de desplazamiento miscible en suelos que permiten trabajar con columnas de suelo no disturbado de longitud variable. Un esquema del mismo puede observarse en la **Figura 1**. Consta de un soporte cribado A que sostiene a la columna B. Esta es un cilindro de PVC de 11 cm de diámetro, intercambiable, en la que se ubica el suelo ajustado por un o–ring de neoprene. La columna es conectada al sistema de alimentación a través de un tubo fijado en un agujero de la tapa de aluminio C mediante un trozo de tubo de caucho de silicona. Las superficies superior e inferior de la muestra están recubiertas con una malla metálica y un filtro microporoso. El sistema de alimentación consta de dos partes:

a) un sistema regulador de caudal formado por un bidón, un cilindro de plástico acrílico (D) y un regulador de goteo (E),
b) un sistema de inyección formado por una bureta (F) conectada al sistema de alimentación mediante un empalme "Y".

El sistema de extracción consta de dos tubos de caucho de silicona. Uno de ellos se conecta a la línea de vacío y el otro permite, mediante la apertura de la llave (G), extraer la solución eluyente.

El contenido de agua en la muestra se controla con un manómetro a mercurio intercalado entre la bomba de vacío y el sistema.

La alimentación se realiza con agua a velocidad regulada. El trazador se inyecta en determinado instante y luego se continúa con flujo regulado. La solución eluyente es recogida en tubos de ensayos aforados a 10 ml que se colocan en forma sucesiva.

El sistema permite trabajar con cualquier soluto y con columnas de suelo de distintas alturas. La tensión se puede regular desde saturación hasta 0,8 atm de succión.

Suelos

Se extrajeron cilindros de suelo no disturbado de

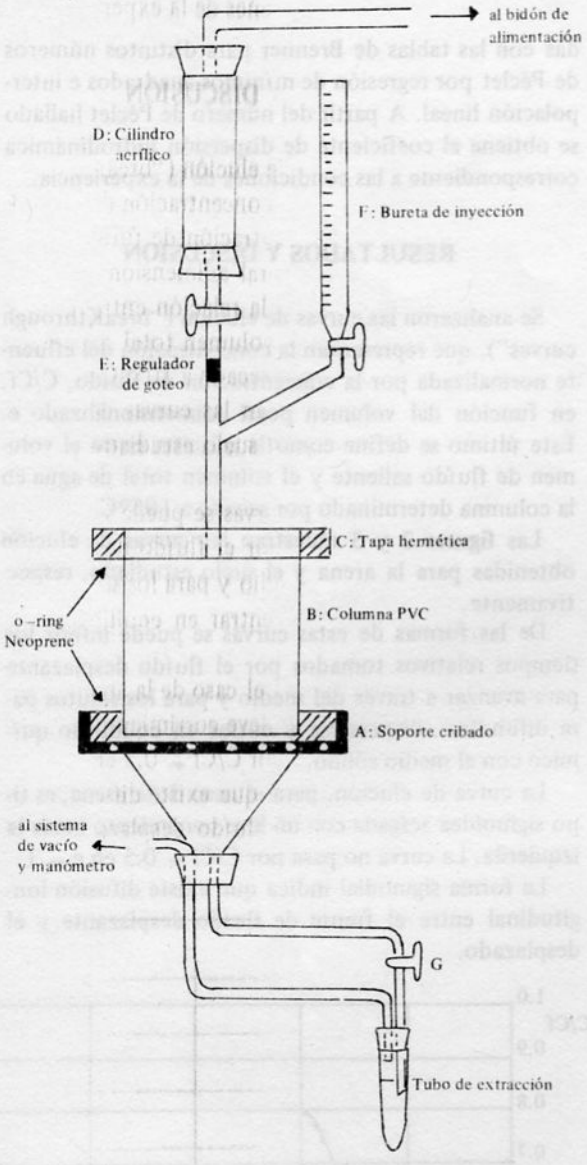

Fig. 1: Aparato para medición de desplazamiento miscible en columnas de suelo.

5 cm de profundidad y 11 cm de diámetro. Se utilizó el horizonte A de un argiudol típico de Pergamino y columnas de arena armadas en laboratorio. Las características de los mismos se resumen en la **tabla 1**.

Medición del coeficiente de dispersión hidrodinámica

a) Descripción de la experiencia

Se colocaron las columnas en forma vertical y se alimentaron con un flujo continuo de agua a velocidad regulada durante 24 horas para asegurar un régimen de flujo constante. La succión se mantuvo en 0.3 atm midiéndose con el manómetro de Hg incorporado al sistema de vacío. El trazador utilizado fué 15 ml de Cl_2Ca de concentraciones , 159.1 mg Cl^-/ml para la arena y 320 mg Cl^-/ml para el suelo.

La inyección fue de tipo "impulso". No es instantanea pero duró aproximadamente 20 segundos. La solución eluyente se recogió en forma continua en tubos de ensayo aforados a 10 ml hasta aproximadamente 5 volúmenes porales en arena y 2 en suelo.

En el eluyente se determinó la concentración de Cl^- por titulación con SO_4Ag_2. Se obtuvieron así las curvas de concentración de soluto en el fluído saliente en función del volumen poral de solución desplazada.

b) Análisis de los resultados

Para las mencionadas condiciones S = O y Q = = 0), por lo tanto la ecuación general de desplazamiento miscible se reduce a

$$\frac{\partial C}{\partial T} + \frac{U\ \partial C}{\partial X} = \frac{D\ \partial^2 C}{\partial X^2}$$

TABLA 1: Características del material utilizado.

MATERIAL	gl/cm³ ∂op Densidad Aparente	% Porosidad Total	% Θ Saturación Vol.	% Θ trabajo Vol.	ml V poral	U cm/h
ARENA	1.54	41	32.1	17.4	60.1	0.77
SUELO A–arg. típico	0.93	65	42.7	36.8	131.1	0.63

siendo $U = q/\Theta$: velocidad media intersticial del flujo y las condiciones iniciales y de contorno son:

1) $C = Co$ Para todo X y $T = 0$

2) $\frac{\partial C}{\partial X} = O$ en $X = L$, $T > 0$

3) $UC - D\frac{\partial C}{\partial X} = UC\,f$, para $T\ 0$ y $X = 0$

siendo L: longitud de la columna.

Cf: concentración de solutos en el fluído desplazante.

Brenner (1962) resuelve numéricamente la ecuación para las condiciones especificadas anteriormente.

El mencionado autor reescribe la ecuación en variables adimensionalizadas resultando

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{4}\frac{\partial^2 c}{\partial^2 x}$$

siendo $c = \frac{C - Cf}{Co - Cf}$ $X = \frac{x}{L}$, $t = \frac{UT}{L}$

$P = \frac{UL}{4D}$ número de Péclet

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se expresan en términos de la concentración de eluyente adimensionalizada. Se comparan las curvas obtenidas con las tablas de Brenner para distintos números de Péclet por regresión de mínimos cuadrados e interpolación lineal. A partir del número de Péclet hallado se obtiene el coeficiente de dispersión hidrodinámica correspondiente a las condiciones de la experiencia.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se analizaron las curvas de elución ("breaKthrough curves"), que representan la concentración del efluente normalizada por la concentración de fluído, C/Cf, en función del volumen poral adimensionalizado **e**. Este último se define como la relación entre el volumen de fluído saliente y el volumen total de agua en la columna determinado por secado a 105°C.

Las **figuras 2 y 3** muestran las curvas de elución obtenidas para la arena y el suelo estudiado, respectivamente.

De las formas de estas curvas se puede inferir los tiempos relativos tomados por el fluído desplazante para avanzar a través del medio y para los solutos para difundirse, dispersarse y entrar en equilibrio químico con el medio sólido.

La curva de elución, para el caso de la arena, es tipo sigmoidea sesgada con un leve corrimiento hacia la izquierda. La curva no pasa por $C/Cf = 0.5$ en $e = 1$.

La forma sigmodial indica que existe difusión longitudinal entre el frente de fluído desplazante y el desplazado.

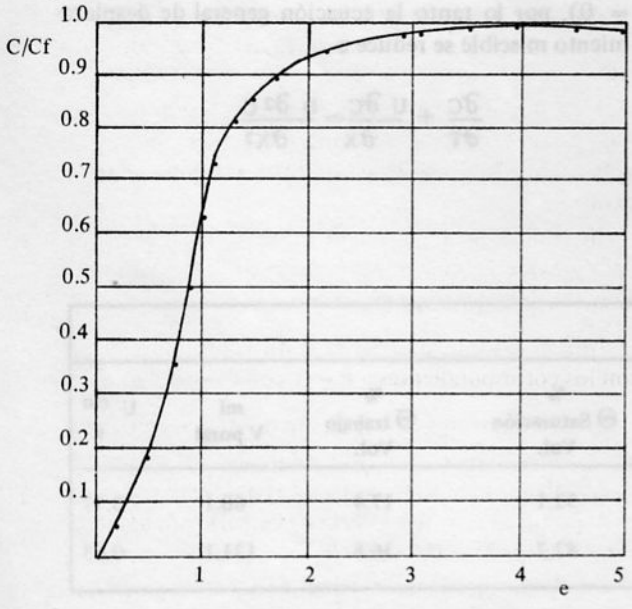

Fig. 2: Curva de elución de Cl^- en la columna de arena.

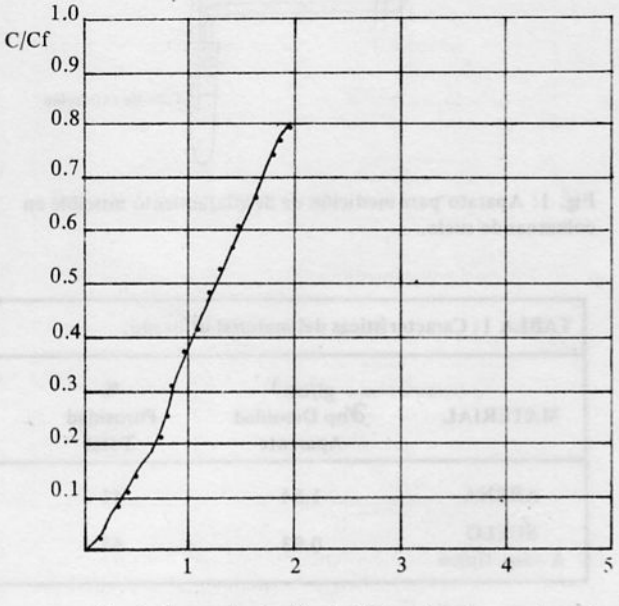

Fig. 3: Curva de elución de Cl^- en la columna de suelo.

El corrimiento hacia la izquierda indica que hay fracción del volumen total de poros que no contribuye al volumen efluente medido. Esto se explica porque la experiencia no se realizó en saturación. Por lo tanto hay poros vacíos de fluído. Este efecto es pequeño. Se define el "holdback" $H = \int_0^1 C/Cf$ de como el area por debajo de la curva de elución entre: $O < e < 1$. Si calculamos H para la arena, resulta

$$H = \int_0^1 0.62\ e\ de = 0.31$$

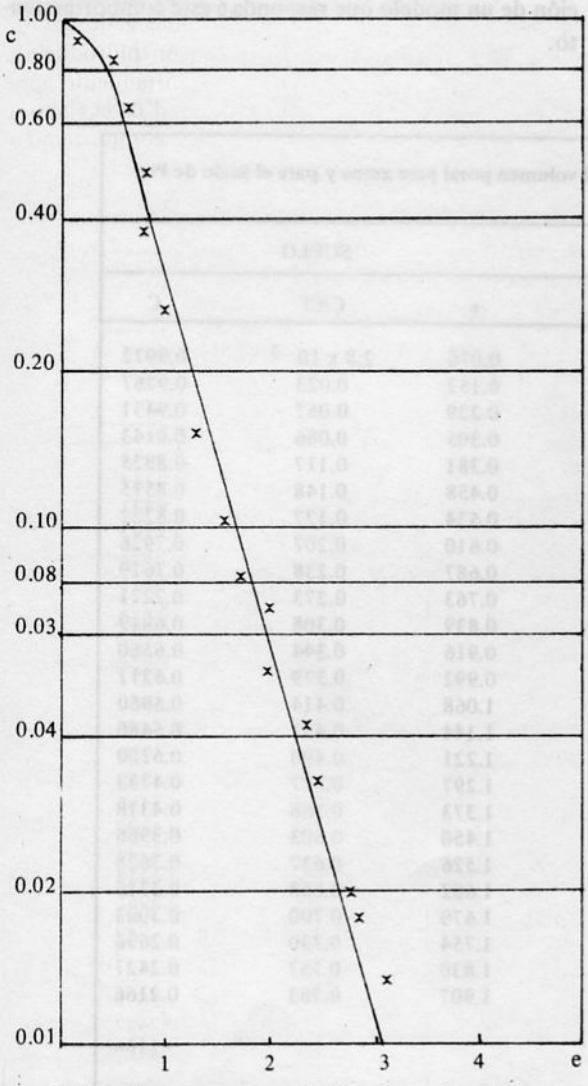

Fig. 4: Logaritmo de la concentración adimensionaliza en función del volumen poral. Datos experimentales y curva de Brenner.

Realizando la aproximación del primer tramo de la curva por una recta. Para el caso de un flujo ideal tipo pistón, H = O. En ese caso no existe interacción entre el soluto y el sólido. Para la arena el valor 0,31 indica que tal interacción podría existir aunque es muy leve.

Resultados similares para un suelo arenoso de Oakley fueron obtenidos por Nielsen (1962). La forma de la curva más o menos semejante a una sigmoidea depende de la distribución de velocidades microscópicas y tal distribución a su vez es función de la secuencia de tamaño de poros con que se encuentra el flujo y de la tortuosidad media. La curva de la arena, muy semejante a una sigmoidea, indica una pequeña dispersión de velocidades alrededor de la media o sea poca dispersión hidrodinámica.

Realizando un análisis similar para la curva del horizonte A del suelo de Pergamino, se observa que es más convexa en el tramo hasta e = 1 y que presenta un corrimiento hacia la derecha. Lo primero se interpreta como una mayor dispersión de velocidades intersticiales que en el caso anterior indicando además la presencia de dispersión hidrodinámica.

El corrimiento hacia la derecha que presenta indica la posibilidad de existencia de algún proceso químico o físico que produce retención del fluído o del soluto en la columna retrasando la elución.

H para este caso resulta igual a 0,19 indicando que la interacción sólido–soluto es muy pequeña por lo que se infiere que la retención es del fluído como un todo.

Para calcular el coeficiente de dispersión hidrodinámica se calcularon las concentraciones adimensionales c del eluyente. Estos datos se resumen en la **tabla 2**.

Se realizó una regresión de mínimos cuadrados con cada una de las soluciones numéricas presentadas por Brenner para distintos números de Péclet.

Para el caso de la arena se obtuvo una correlación con los correspondientes a P = 1 con $r^2 = 0.998$.

En la Figura se muestra la curva teórica calculada por Brenner para P = 1 y los resultados experimentales calculados para la columna de arena.

A partir de P = UL/4D se calculó D para la arena obteniéndose D = 0.96 cm^2/h.

En el caso del suelo ninguna de las soluciones numéricas de Brenner ajusta bien con los resultados ex-

perimentales encontrándose que los mismos se encuentran en la zona de $P \longrightarrow 0$. La curva de mejor ajuste $P = 0.2$ subestima los valores en todo el rango.

Estimando D con $P = 0.2$ se obtiene $D = 4.1$ cm^2/h, indicando un coeficiente de dispersión hidrodinámica muy alto.

Sin embargo la pobreza del ajuste al modelo indicado la presencia de algún fenómeno no considerado en el mismo.

Este fenómeno también se detecta a través de la curva de elución y está evidenciado en el corrimiento hacia la derecha de la misma.

CONCLUSIONES

El equipo diseñado resulta adecuado para el análisis de experiencias de desplazamiento miscible de nutrientes en columnas de suelo no disturbado.

El comportamiento diferencial de la evolución de Cloruro en columna de arena y una de suelo no disturbado se pudo analizar a través de las curvas de elución. El modelo de Brenner resulta adecuado para la medición del coeficiente de dispersión hidrodinámico en arena, pero no explica el comportamiento en el suelo. Esto último implica la necesidad de la elaboración de un modelo que responda a este comportamiento.

TABLA 2. Concentración de eluyente en función del volumen poral para arena y para el suelo de Pergamino.

ARENA			SUELO		
e	C/Cf	c	e	C/Cf	C
0.164	2.27×10^{-4}	0.9970	0.076	2.8×10^{-3}	0.9972
0.327	0.037	0.9628	0.152	0.023	0.9767
0.491	0.182	0.8183	0.229	0.057	0.9431
0.656	0.356	0.6441	0.305	0.086	0.9143
0.820	0.508	0.4920	0.381	0.117	0.8825
0.984	0.629	0.3711	0.458	0.148	0.8515
1.147	0.740	0.2595	0.534	0.177	0.8222
1.311	0.815	0.1847	0.610	0.207	0.7926
1.475	0.862	0.1376	0.687	0.238	0.7619
1.639	0.895	0.1048	0.763	0.273	0.7271
1.803	0.917	0.0833	0.839	0.308	0.6919
1.967	0.930	0.0700	0.916	0.344	0.6560
2.131	0.944	0.0557	0.992	0.379	0.6212
2.295	0.956	0.0437	1.068	0.414	0.5860
2.459	0.966	0.0344	1.144	0.451	0.5486
2.623	0.984	0.0277	1.221	0.490	0.5100
2.787	0.977	0.0227	1.297	0.527	0.4733
2.951	0.982	0.0178	1.373	0.568	0.4318
3.115	0.986	0.0143	1.450	0.603	0.3966
3.279	0.988	0.0112	1.526	0.637	0.3628
3.443	0.990	0.0091	1.602	0.668	0.3316
3.606	0.992	0.0074	1.679	0.700	0.3003
3.770	0.994	0.0059	1.754	0.730	0.2696
3.934	0.995	0.0046	1.830	0.757	0.2427
4.098	0.996	0.0035	1.907	0.783	0.2166
4.262	0.997	0.0026			
4.426	0.998	0.0017			
4.590	0.999	0.0009			
4.754	0.999	0.0003			
4.918	0.999	0.0002			

REFERENCIAS

Biggar, J.W. y D.R. Nielsen (1962), "Miscible Displacement II: Behaviour of Tracers", Soil Sci Soc of Am Proc. 26: 125-128.

Biggar, J.W. y D.R. Nielsen (1963), "Miscible Displacement V: Exchange processes" Soil Sci Soc of Am Proc 27: 623-627.

Boast C.W. (1973) "Modeling the movement of chemicals in soils by water" Soil Sci 115 (3): 224-230.

Brenner, H. (1962). "The diffusion model of longitudinal mixing in beds of finite length. Numerical values" chemical Engineering Science 17. 229-243.

Cameron D.R. y A. Kute (1977), "Convective – Dispersive Solute Transport with a combined equilibrium and kinetic adsorption model" W.R. Research 13 (1): 183-188.

Erick D.E., K.T. Ehrk y H.K. Kupp (1966), "Applications of miscible displacement Techniques to soils" W.R. Research 2 (4). 717-724

Kirkham D. y W.L. Powers (1972), "Miscible Displacement", in Advanced Soil Physics, J. Wiely, U.S.A. 534 pp.

Nielsen D.R. y J.W. Biggar (1961), "Miscible Displacement in Soils I: Experimental Information", Soil Sci Soc of Am Proc 25 (1): 1-5.

Nielsen D.R. y J.W. Biggar (1962), "Miscible Displacement III: theoretical Considerations" Soil Sci Soc of Am Proc 26: 216-221.

Rose D.A. y J.B. Passioura (1971), "The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion". Soil Sci 111: 252-257.

Selim H. M. y R.S. Mansell (1976). "Analytical solution of the equation for transport of reactive solutes through soils". W.R. Research 12 (3): 528-532.

Scheidegger A.E. (1961)' "General theory of dispersion in porous media". J. Geophys. Res. 66: 3273-3278.

Sine L. y J.P. Agneessens (1978). "Modelisation de la migration d' elements dans les sols I: Theories mathematiques en absence de reaction d'echarge". Pedologie 28. 349-371

Sine L. y J.P. Agneessens (1979), "Modelisation de la migration d'elements dans les sols III: Solutions Analytiques generales". Pedologie 29 (3): 359-366.