

PREDICCIÓN DEL TIEMPO DE TRANSPORTE DE UN CONTAMINANTE EN SUELO ARENOSO

TRAVEL TIME PREDICTION OF CONTAMINANT TRANSPORT IN SANDY SOIL

María Fernanda Serrano-Guzmán

Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Colombia) • mferrano@upb.edu.co

Juan Carlos Forero Sarmiento

Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Colombia) • juan.forero@upb.edu.co

Diego Alejandro Guzmán Arias

Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (Colombia) • diego.guzman@upb.edu.co

Diego Darío Pérez Ruiz

Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia) • diegoperezr@gmail.com

Resumen

La mayoría de las actividades antrópicas, en razón de las cuales se ha generado el desarrollo de la humanidad, ocasionan impactos negativos en el ambiente; como ejemplo se pueden citar la agricultura, la ganadería, la explotación minera y la extracción de crudo. Este estudio se centra en la determinación del tiempo de viaje de un producto de la industria del petróleo: el aceite para carros, el cual puede afectar el suelo cuando se presenta un derrame involuntario del mismo. En este trabajo experimental se emplearon columnas de acrílico con cuatro muestreadores espaciados 15 cm y una bomba multipunto con la que se inyectaron los fluidos. La muestra de suelo, de naturaleza arenosa, fue saturada con un trazador salino para disminuir las variables a controlar en el medio; esto se hizo por cuanto era conocido que la presencia de aire podía favorecer el desplazamiento de la fase gaseosa del aceite que se estaba utilizando. Una vez comprobado que el medio estaba saturado completamente, se procedía a inyectar el aceite, en un flujo ascendente, y a intervalos de cinco minutos se tomaron muestras cada uno de los muestreadores, por un intervalo de cuatro horas.

Como resultado, los hallazgos de este estudio hacen una aproximación a los valores de dispersividad de 1.27 m²/día para un medio con una gradación entre el tamiz No. 4 y el No. 50, en donde el tiempo de viaje estimado fue de 8.8 días. Así mismo, para un medio con gradación No. 50 a No. 200, el valor de la dispersividad fue de 0.7411 m²/día y el tiempo de viaje estimado fue de 8.9 días. Los valores de dispersividad encontrados permiten inferir que a medida que el tamaño del grano disminuye, lo hace

también la capacidad de los fluidos para desplazarse en el medio y por ello el mayor tiempo de recorrido. El procedimiento establecido en este trabajo puede utilizarse para otro tipo de compuestos, aunque la técnica debe mejorarse para llevarla al campo. Así mismo, es recomendable continuar el estudio para verificar las aproximaciones realizadas.

Palabras clave: suelo arenoso, tiempo de viaje, transporte de contaminantes

Abstract

A great number of human activities, such as agriculture, ranching, mining and oil extraction, are responsible for the human development, cause negative environmental impacts. This study focuses on travel time determination expending by some product coming from petroleum industry: car's oil, which can affect the ground when a spill occurs. Plexiglass columns, with four experimental sampling ports located each 15 cm, and a multipoint pumping were used in this experiment. The sandy soil was saturated with a saline tracer to control the variables that could affect the contaminant transport due to air presence where gaseous phase of could move into them. Once saturated conditions were confirmed, the oil was injected in an upward flow, at sample intervals of five minutes during four hours.

The findings provide an approximation of dispersivity equivalent to $1,27\text{m}^2/\text{day}$, when soils had a gradation between the sieve No. 4 and No. 50; the travel time in this case was 8.8 days. Likewise, for a medium with gradation between sieve No. 50 and No. 200, the dispersivity value was $0.741\text{m}^2/\text{day}$ and the travel time was 8.9 days. These results allow inferring that in the way as the grain size decreases, so does the ability to move fluid in the environment and therefore the greater travel time. The procedure established in this experimental work can be used for other types of compounds, although the technique must be improved before be used in the field. It is also recommended further study to confirm the approximations made.

Keywords: contaminant transport, sandy soil, travel time

Introducción

La cobertura vegetal y las capas del subsuelo pueden afectarse por diferentes actividades antrópicas, tales como prácticas agrícolas y mineras no adecuadas y por vertimientos de residuos líquidos y sólidos a cielo abierto, los cuales impactan negativamente el ambiente. Algunas de estas acciones pueden incluso causar degradación del suelo y disminución de la capacidad de regeneración biológica y del rendimiento de los cultivos, así como también, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y pérdida de las propiedades mecánicas del suelo afectado (Serrano y Restrepo, 2006).

Teniendo en cuenta que la composición del suelo es variada en textura, acomodación de grano y tamaños, porcentaje de sólidos y de vacíos saturados o no con agua, los contaminantes en el suelo pueden

transportarse en fase gaseosa, fase acuosa, permanecer adsorbidos al suelo, o aislados si no encuentran afinidad con la química del suelo (Carcione et al., 2003; Serrano et al., 2010). Las anteriores propiedades de movilidad están asociadas con las propiedades químicas de los compuestos. Este artículo se centra en la propuesta de ecuaciones para determinar el tiempo en el cual un derrame de un contaminante alcanza una extensión conocida, todo ello con fines de remediación posterior del medio afectado. El contaminante objeto de estudio es el aceite que es un derivado del petróleo.

Características de los compuestos presentes en el suelo

Existen diferentes tipos de compuestos y la clasificación más sencilla puede darse en términos de la densidad de los mismos. Los compuestos más densos que el agua se conocen como DNAPLs (Dense Non

Aqueous Phase Liquids), los cuales se presentan en el subsuelo haciendo parte de la fase gaseosa de éste y pueden movilizarse con el agua subterránea (Serrano-Guzmán, 2011; Serrano et al., 2010; Serrano-Guzmán, 2008; Brusseau et al., 2003; Jalbert y Dane, 2001). Aquellos menos densos que el agua, se les conocen como LNAPLs, son hidrofóbicos y en algunos estudios han sido catalogados como inmóviles (Serrano-Guzmán, 2008; Ostrom et al., 2005). Ante un derrame de estos compuestos, los DNAPLs pueden desplazarse hasta el fondo de una capa confinante de un acuífero, en tanto que los LNAPLs pueden moverse con las aguas subterráneas. En ambos casos, los compuestos deben vencer la altura crítica para atravesar la zona vadosa o el medio saturado.

Cuando ocurre un derrame, la fase libre que alcanza el nivel freático puede acumularse; dependiendo de la solubilidad del compuesto, puede permanecer el contaminante en los depósitos de agua subterránea. Sin embargo, es de destacar que en todas las formas en que se presenta el químico en el medio poroso, puede migrar según la dirección del flujo de agua subterránea, en forma paralela a la pendiente que lleve el nivel freático o descender hasta las capas confinantes de los acuíferos. La distribución de esta contaminación dentro del suelo se ve significativamente afectada por las variaciones que presente la litología del medio y por las fluctuaciones del nivel freático (Lee et al., 2001). En conclusión, la dinámica del agua subterránea favorece el desplazamiento de estos contaminantes y la formación de extensiones de contaminación que ocupan grandes volúmenes de acuíferos, aumentando con ello el riesgo de afectación hacia otros receptores (Serrano-Guzmán, 2011).

Relevancia de los estudios de transporte de contaminantes en suelos

La complejidad y la diversidad de la matriz porosa y las comunidades microbianas asociadas a la misma, así como la naturaleza compleja de crudos y sus derivados dificultan la selección de alternativas de remediación. Existe una gran preocupación por la recuperación de suelos contaminados, razón por la cual se estudian diferentes alternativas de remediación, como es el caso de la bioremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, para cuyo estudio normalmente se utilizan equipos especializados de cromatografía a nivel de laboratorio y bioindicadores, a nivel de campo,

ambas estrategias con el fin común de identificar el nivel de toxicidad del medio y la capacidad de regeneración biológica (Maila y Cloete, 2005). Se debe considerar que las estrategias de remediación sean acordes al tipo de compuestos que hay en el medio, ya que en ocasiones algunos tratamientos de tipo biológico afectan de manera negativa la respuesta de los bioindicadores que se utilizan (Maila y Cloete, 2005; Siciliano et al., 1997; Margesin y Schinner., 1997) y adicionalmente, la matriz de suelo puede contener microorganismos que atacan y mineralizan compuestos orgánicos utilizando éstos para su supervivencia retardando con ello las acciones remediativas (Mikkonen et al., 2012; Robertson y Grossman, 2007). Además del tratamiento biológico, puede utilizarse extracción de vapor, oxigenación, barreras física, entre otros procedimientos.

Esta variedad de opciones requiere el conocimiento de la extensión de la contaminación y del tiempo en el cual es alcanzada esta contaminación, con el fin de tomar acciones mitigadoras de los impactos negativos en el suelo. Surge entonces el interés, por establecer un procedimiento con el cual se determine el tiempo de desplazamiento de compuestos derivados de crudo del petróleo, entendiendo que una causa común de alteración en el suelo es por derrames, en ocasiones involuntarios, de estos fluidos y que la presencia de hidrocarburos, compuestos con densidad menor que la del agua, tiende a disminuir la disponibilidad de nutrientes para suelos agrícolas (Serrano y Restrepo, 2006) y puede disminuir la oportunidad de uso del suelo para otras aplicaciones industriales o comerciales.

Características de los aceites

Los aceites cumplen la función de reducir la fricción y facilitar el movimiento entre las partes mecánicas de los equipos, disminuyendo la ocurrencia de deformaciones por calentamiento interior. Es de destacar, que en la actualidad existe una amplia oferta de aceites y que su producción para el 2006 alcanzó 38.5 millones de toneladas métricas (Rizvi, 2009).

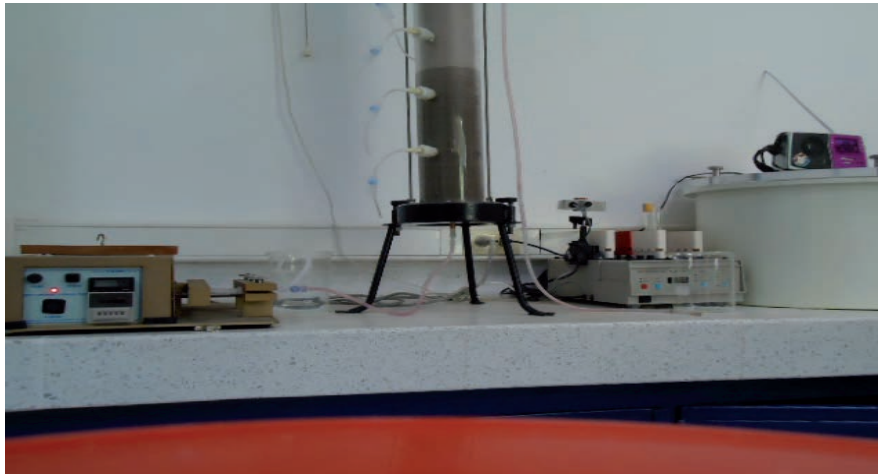
El aumento del parque automotor, situación común a nivel mundial, está aumentando la posibilidad de contaminación del ambiente por la necesidad del uso de los aceites; es decir, derrames involuntarios de los proveedores o de los productores pueden impactar directamente al suelo y al agua.

Equipo y metodología

En este estudio se emplearon columnas de acrílico (plexiglass) de longitud 60 cm y diámetro interior de 10 cm, las cuales estaban provistas de muestreadores con conexión NPT de diámetro de $\frac{3}{4}$ ", los cuales estaban espaciados cada 15 cm, de una bomba

multipunto y de recipientes para recolección de muestras (Figura 1). Los experimentos se llevaron a cabo en forma saturada para disminuir las variables a controlar durante los mismos, ya que la presencia de aire podría favorecer el desplazamiento de la fase gaseosa del aceite que se estaba utilizando. La metodología detallada fue:

Figura 1. Equipo de bombeo durante la inyección de la solución salina



Preparación de la muestra de suelo

La muestra de suelo arenosa fue lavada y el material utilizado correspondió al pasante del tamiz No. 4 y retenido en el tamiz No. 200. El objetivo del lavado es la remoción de impurezas, escombros y desechos que pudieran estar presentes en la arena. La matriz porosa utilizada correspondió a dos tipos de suelo arenoso trabajados por Duarte (2010) y Prieto (2011) bajo la dirección de la Ing. María Fernanda Serrano Guzmán.

Posteriormente, la muestra de suelo en estado seco se separó de manera que cumpliera la gradación del tamiz No. 4 al No. 50 y del tamiz No. 50 hasta el No. 200, condiciones ajustadas por conveniencia para el manejo a nivel experimental. Cada una de estas muestras se introdujo en las columnas de acrílico y se compactaron con pisón de mano. Las etapas seguidas se describen a continuación:

Calibración del estado saturado de la muestra de suelo contenida en la columna de advección

Cada muestra de suelo arenosa fue introducida a la columna con la ayuda de un embudo y un

tubo, buscando disminuir la emisión de material fino que pudiera ocasionar flujo preferencial en las paredes de la columna. Para verificar la saturación de la columna de advección, se utilizó un trazador conservativo (Cloruro de Sodio) con una concentración de 0.1 M. Cuando la concentración de salida de la columna y la de entrada eran iguales, se consideraba que la muestra estaba completamente saturada en este caso, con una solución salina. Durante la inyección de la solución se van tomando muestras de agua a través de los muestreadores dispuestos para ello. El intervalo de tiempo de muestreo era de cinco minutos, para un total de cuatro horas.

Seguimiento a la movilidad del aceite en la columna de advección

Finalizada la verificación de la condición saturada de ambos medios porosos, se procede a la inyección del aceite utilizando el mismo procedimiento de inyección de la solución salina, previa limpieza de la matriz porosa de los residuos de NaCl. Entonces, se establece un periodo de muestreo y de recolección de muestras en cada muestreador, utilizando los recipientes colectores de muestra (figura 2), a los cuales

con antelación se les adicionó una gota de ácido sulfúrico H_2SO_4 y, posteriormente, se envió al laboratorio de aguas para el análisis de Grasas y Aceites (GyA).

Figura 2. Recolección de muestras de inyección de aceite



Identificación de los parámetros necesarios para determinar la Dispersividad del medio poroso

Cuando el reporte de GyA es recibido, se procede a determinar la Dispersividad (D_L) del medio, variable que se debe determinar para comprender la movilidad de cualquier compuesto en el suelo. Por lo anterior, se emplea la ecuación (1), en la que se determina la D_L con el volumen de poros estimado cuando la concentración es 16% y 84% de la concentración inicial (Fetter, 1999):

$$(1) \quad D_L = \left(\frac{v_x t}{L} \right) (J_{0.84} - J_{0.16})^2$$

Donde:

v_x es la velocidad lineal

t el tiempo

L es la longitud de la columna base del experimento

y J (ecuación 2 y ecuación 3), son valores que se determinan partiendo del número total de poros U .

$$(2) \quad J_{0.84} = \frac{U-1}{U^2}$$

para $C/Co = 0.84$, en donde Co es la concentración inicial

$$(3) \quad J_{0.16} = \frac{U-1}{U^2}$$

para $C/Co = 0.16$, en donde Co es la concentración inicial

El valor de U se determina con la ecuación (4).

$$(4) \quad U = \frac{v_x t}{L}$$

Análisis de resultados

Para cada muestra de suelo se determinó el coeficiente de Dispersividad D_L . El D_L permite utilizar las ecuaciones de transporte de contaminante para predecir el tiempo en el cual se alcanzarán valores determinados de contaminación. Se observa que para diferentes gradaciones, los valores de dispersividad cambian, ratificando con ello que la litología afecta la movilidad de los compuestos.

Coefficiente de dispersividad para suelo arenoso con gradación pasa No.4 y retenido No. 50

Para determinar el D_L de este suelo se partió del conocimiento de v_x estimada en 0.02546 cm/seg, porosidad $n=0.1$, y la longitud (L) del medio 60 cm. Los cálculos correspondientes para la determinación de la D_L son:

El valor de C_1/Co aproximado a 0.16 se obtuvo a los a los 25 minutos de iniciado el experimento. Para

$$D_L = \frac{0.02546 \frac{cm}{seg} * 60cm}{8} (0.136 - (-0.455))^{\frac{1}{2}} = 0.1469 \frac{cm^2}{seg} = 1.27 \frac{m^2}{dia}$$

Coefficiente de dispersividad para suelo arenoso con gradación pasa No.50 y retenido No. 200

Para determinar el D_L de este suelo se partió del conocimiento de v_x estimada en 0.02546 cm/seg, porosidad $n=0.1$, y la longitud (L) del medio 60 cm. Los cálculos correspondientes para la determinación de la D_L son:

El valor de C_1/Co aproximado a 0.16 se obtuvo a los a los 40 minutos de iniciado el experimento. Para este

$$D_L = \frac{0.02546 \frac{cm}{seg} * 60cm}{8} (0.2201 - (0.0184))^{\frac{1}{2}} = 0.08574 \frac{cm^2}{seg} = 0.7411 \frac{m^2}{dia}$$

Ejemplo de aplicación para determinar el tiempo de movilidad en un suelo afectado por un derrame del 10% de la concentración inicial, conociendo la dispersividad D_L

Para determinar el tiempo que tarda un derrame de aceite en desplazarse en un medio poroso se debe despejar el tiempo de la ecuación (5).

$$(5) \quad C_o(L, t) = \frac{C}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{L-v_x t}{2\sqrt{D_L t}}\right)$$

Esta ecuación es utilizada cuando se tiene una fuente de contaminación continua, en donde la concentración varía en función de la longitud y del tiempo

este caso, el valor de U_1 , según la ecuación (4), es de 0.636 volúmenes de poro, valor para el cual el $J_{0.16} = -0.455$.

El valor de C_2/Co aproximado a 0.84 se obtuvo a los 240 minutos de iniciado el experimento. Para este caso, el valor de U_2 , según la ecuación (4), es de 6.111 volúmenes de poro, valor para el cual el $J_{0.84} = 0.136$.

Conocidos $J_{0.16}$ y $J_{0.84}$ se procede a calcular D_L con la ecuación (1):

caso, el valor de U_1 , según la ecuación (4), es de 1.018 volúmenes de poro, valor para el cual el $J_{0.16} = 0.0184$.

El valor de C_2/Co aproximado a 0.84 se obtuvo a los a los 160 minutos de iniciado el -experimento. Para este caso, el valor de U_2 , según la ecuación (4), es de 3.055 volúmenes de poro, valor para el cual el $J_{0.84} = 0.2201$.

Conocidos $J_{0.16}$ y $J_{0.84}$ se procede a calcular D_L con la ecuación (1):

(Fetter, 2001). Aplicando las variables conocidas en esta ecuación, a saber longitud, velocidad, D_L y concentración esperada, mediante aproximaciones sucesivas se despeja el valor de t. Para el caso del suelo en la gradación No. 4 a No. 50, se llega a un valor de β 0.9064, así:

$$0,10 * C = \frac{C}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{L-v_x t}{2\sqrt{D_L t}}\right)$$

$$0,2 = \operatorname{erfc}\left(\frac{L-v_x t}{2\sqrt{D_L t}}\right) \cdot \text{De la Tabla 1 se obtiene el valor de } \beta \text{ para } 0,2$$

$$0.9064 = \frac{200m - 22.01 \frac{m}{d} * t}{2\sqrt{1.27 \frac{m^2}{d} * t}}$$

Tabla 1. Función error complementaria

para valores de $\beta = \frac{L-v_x t}{2\sqrt{D_L t}}$

β	erfc (β)
0	1
0,05	0,94362802
0,1	0,88753708
0,15	0,83200403
0,2	0,77729741
0,25	0,72367361
0,3	0,67137324
0,35	0,62061795
0,4	0,57160764
0,45	0,52451828
0,5	0,47950012
0,55	0,43667663
0,6	0,39614391
0,65	0,35797067
0,7	0,32219881
0,75	0,28884437
0,8	0,25789904
0,85	0,22933194
0,9	0,20309179
0,95	0,17910919
1	0,15729921

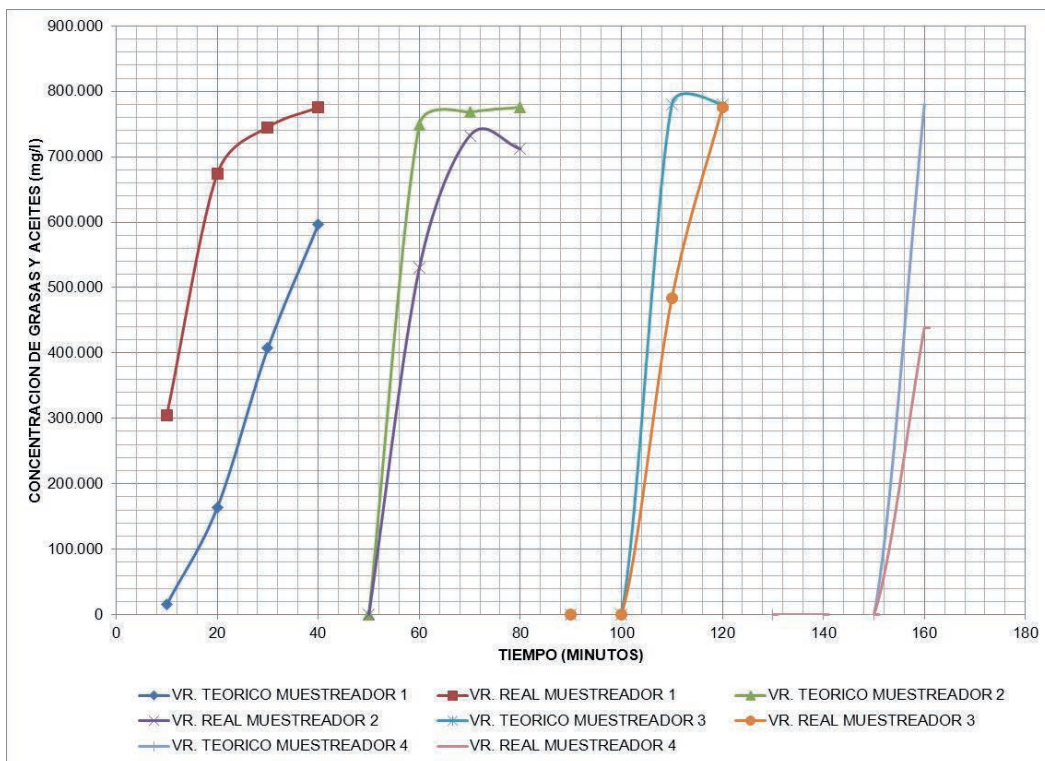
Conocido el valor de β , mediante aproximaciones sucesivas de la ecuación (5) se obtiene que el contaminante se tarda 8.8 días en alcanzar un 10% de la contaminación, en una extensión de 200m. En el caso de suelo con gradación No. 50 a 200 se obtiene que para una Dispersividad de 0.7411 m²/día el mismo compuesto, en ese medio poroso se tardará 8.9 días.

Discusión de resultados

El entendimiento de la movilidad del flujo subterráneo y el transporte de contaminantes en el subsuelo están asociados con la existencia de espacios que permitan el libre paso de los contaminantes a través del medio. En esencia, la dispersividad permite conocer la capacidad de distribución horizontal de los contaminantes en el medio geológico, para así entender el comportamiento del subsuelo.

Teniendo en cuenta que no se han realizado estudios similares que permitan comparar los resultados aquí encontrados, los hallazgos de este estudio hacen una aproximación a los valores de dispersividad de 1.27 m²/día y 0.7411 m²/día en medios arenosos con gradación entre el tamiz No. 4 y el No. 50 y entre el tamiz con gradación No. 50 a No. 200, respectivamente.

Figura 3. Valor teórico y valor real de concentraciones medidas en la columna



Comparando los valores medidos (reales) de concentraciones de grasa y aceite en cada muestreador y los valores teóricos calculados según la ecuación 5 y la D_L encontrada, se observa que en los muestreadores 2 y 3 hay una mayor aproximación entre la ecuación teórica y la experimental (figura 3). Adicionalmente, teniendo en cuenta que en las vecindades del muestreador 1 se hacía la inyección de fluidos, se observan las mayores diferencias entre ambas curvas, situación que puede explicarse por el impacto que puede darse en la acomodación de los granos para que se permita el movimiento del fluido que se estaban inyectando.

Conclusión

Las pruebas de este estudio se desarrollaron en un medio saturado al cual se le inyectó un contaminante menos denso que el agua. Con la información recuperada se determinó la dispersividad del medio poroso encontrándose que para una matriz de suelo con gradación entre el tamiz No. 4 y el No. 50 y el tamiz No. 50 y el 200, los valores de dispersividad fueron $1.27 \text{ m}^2/\text{d}$ y $0.7411 \text{ m}^2/\text{d}$, respectivamente.

Los valores de dispersividad encontrados permiten inferir que a medida que el tamaño del grano disminuye, lo hace también la capacidad de los fluidos para desplazarse en el medio. Este puede explicarse por cuanto en los medios más finos, se requiere un mayor recorrido del fluido para atravesar una mayor superficie específica. El procedimiento establecido en este trabajo puede utilizarse para otro tipo de compuestos y la técnica debe mejorarse para llevarla al campo. Así mismo, es recomendable continuar el estudio para verificar las aproximaciones realizadas.

Agradecimiento

Se agradece el apoyo en financiación del estudio por parte del Ecopetrol ICP y la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y la Dirección General de Investigaciones de la UPB, según convenio de colaboración 003 de 2009. Se agradece a los ingenieros Diego A. Duarte e Iván Dario Prieto Orostegui, por su colaboración en el trabajo experimental.

Referencias

- Brusseau M.L., Nelson, N.T. and Constanza-Robinson, M.S. (2003). Partitioning tracers tests for characterizing immiscible-fluid saturations and interfacial areas in the Vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 2, 138-147.
- Carcione J.M., Seriani, G. y Gei, D. (2003). Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. *Journal of Applied Geophysics*, 52(4), 177-191.
- Duarte, D. A. (2010). Estudio de movilidad de LNAPLs en un sistema saturado unidimensional: caso suelo arenoso entre tamiz no. 4 a No. 50, Trabajo de grado de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Fetter C.W. (2001). *Contaminant Hydrogeology*. (2da. Edición). Illinois: Waveland Press, INC.
- Jalbert, M. y Dane, J.H. (2001). Correcting laboratory retention curves for hydrostatic fluid distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 648-654.
- Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Lee, K. K., Lee, S.Y. y Lee, M.H. (2001). Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 50(1-2), 139-158.
- Maila, M. y Cloete, T.E. (2005). The use of biological activities to monitor the removal of fuel contaminants—perspective for monitoring hydrocarbon contamination: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 55(1), 1–8
- Margesin, R. y Schinner, F. (1997). Bioremediation of diesel-oil contaminated alpine soil at low temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 47(4), 462–468.
- Mikkonen, A., Hakala, K. P., Lappi, K., Kondo, E., Vaalama, A., Suominen, L. (2012). Changes in hydrocarbon groups, soil ecotoxicity and microbiology along horizontal and vertical contamination gradients in an old landfarming field for oil refinery waste. *Environmental Pollution*, 162, 374-380
- Oostrom, M., White, M.D., Lenhard, R. J., Van Geel, P.J., y Wietsma, T.W. (2005). A comparison of models describing residual NAPL formation in the Vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 4(1), 163-174.
- Prieto, Ivan Dario (2011). Estudio de movilidad de LNAPLs en un sistema saturado unidimensional: caso suelo arenoso entre tamiz N°. 50 a N°. 200. Trabajo de grado de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

- Rizvi Syed Q. A. (2009). *A comprehensive review of lubricant chemistry, technology, selection, and design*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, Baltimore: ASTM International.
- Robertson, G.P. y Groffman, P.M. (2007). Nitrogen transformation. Biochemistry and Ecology. Springer, New York.
- Serrano, J. H. y Restrepo D.. (2006), Protección ambiental y producción mas limpia. Parte 1 y 2. Editorial Academia.
- Serrano-Guzmán, Maria F. (2008), *Detection and Monitoring of DNAPLs in the subsurface under transient conditions using Cross Well Radar*, PhD. *Dissertation*. Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayaguez.
- Serrano-Guzmán, M.F., Perez Ruiz, D.D., Puppala, A., Padilla. I. (2010). CWR: alternativa para detección de NAPLs. *Puente Revista Científica*, 5(2), 25-35.
- Serrano-Guzmán, M.F. (2011). Propiedades dieléctricas de suelos afectados por NAPLs, Ponencia en Jornada de Investigación, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.
- Siciliano, S.D., Germida, J.J., Headley, J.V. (1997). Evaluation of prairie grass species as bioindicators of halogenated aromatics in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 16, 521–527.

Sobre los autores

Maria Fernanda Serrano Guzman

Ingeniera Civil de la UIS Bucaramanga. Especialista en Gerencia de Proyectos de Construcción de la UIS Bucaramanga. Especialista en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Magíster en Ingeniería en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico, Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico. Desde el año 2009, es la Directora General de Investigaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana. Docente Titular de la Facultad de Ingeniería Civil.

Juan Carlos Forero Sarmiento

Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander. Especialista en Vías Terrestres de la Universidad Pontificia Bolivariana. Magister en Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de

Santander. Docente de Planta de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Diego Alejandro Guzman Arias

Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander. Magister en Ingeniería Civil de la Universidad de Los Andes. Docente de Planta de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Diego Dario Perez Ruiz

Ingeniero Civil de la Universidad del Cauca. Magister en Transporte de la Universidad del Cauca. Magister en Recursos Hídricos de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Doctor en Ingeniería Civil de la Universidad de Texas en Arlington. Actualmente director del Departamento de Ingeniería Industrial y Civil de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.