



Impacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos*

Recibido: 25 de febrero de 2013. • Aceptado: 24 de septiembre de 2013.

Impact of Oil Spills on the Mechanical Properties of Sandy Soils

Impact des déversements d'hydrocarbures sur les propriétés mécaniques des sols sablonneux

Impacto de derrames de petróleo sobre as propiedades mecánicas dos solos arenosos

*María Fernanda Serrano Guzmán^a
Luz Marina Torrado Gómez^b
Diego Darío Pérez Ruiz^c*

** Artículo asociado a la investigación sobre evaluación de las variaciones en las propiedades mecánicas de los suelos afectados por derrames de productos de la industria del petróleo.*

a PhD en Ingeniería Civil, con énfasis ambiental. Directora General de Investigaciones. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga. Comentarios a: mariaf.serrano@upb.edu.co

b Coordinadora de Laboratorios de Ingeniería Civil. Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga. Comentarios a: luz.torrado@upb.edu.co

c PhD en Ingeniería Civil. Director del Departamento de Ingeniería Civil e Industrial. Pontificia Universidad Javeriana de Cali. Comentarios a: diegoperezr@gmail.com

Resumen. La contaminación de suelos, debida a derrame accidental de productos químicos, es una amenaza permanente producida por el desarrollo económico y social de las comunidades. Particularmente, los derrames de hidrocarburos son comunes durante los procesos de producción de crudo, así como también durante su comercialización, transporte y almacenamiento en sitios de acopio y distribución. Surge entonces la iniciativa de evaluar las variaciones en las propiedades mecánicas de los suelos afectados por derrames de productos químicos de la industria del petróleo. Para esta investigación se seleccionó al aceite como contaminante, y una matriz de suelo arenoso, como medio poroso, que fue saturado con agua mediante bombeo de flujo ascendente, a una razón de 12 ml min⁻¹. Se procedió a la toma de muestras en intervalos de tiempo definidos, utilizando recipientes de 30 cm³. En las muestras, se determinaron las concentraciones de aceite y grasa. Posteriormente, las muestras de suelo se sometieron a caracterización mecánica y los resultados se compararon con el comportamiento de la muestra de suelo no afectada por derrame de crudo. Se concluye que la gravedad específica, el porcentaje de absorción y la capacidad de compactación del suelo arenoso contaminado disminuyeron con respecto a los valores del suelo no alterado, mientras que se observa un ligero aumento en la resistencia al corte.

Palabras clave. Derrame de hidrocarburos; Variaciones de las propiedades mecánicas de los suelos; Contaminación de suelos; Suelos arenosos; Proceso de producción de crudo; Líquidos de fase no acuosa.

Abstract. Soil contamination due to involuntary leakage of different products, is a permanent threat caused by economic and social development of communities. In particular, oil spills are common during the oil production process as well as during marketing, transport and storage of collection and distribution sites. There arises the initiative of evaluating changes in the mechanical properties of soils affected by spills of oil industry. For this study were selected the oil as a contaminant, and a sandy soil matrix, such as porous medium saturated with water that was pumped upflow at a rate of 12 ml min⁻¹. We proceeded to sampling at defined time intervals, using 30 cm³ containers, samples whose fat and oil content were determined. Then soil samples were subjected to mechanical characterization and the results compared with the behavior of the soil sample unaffected by the oil spill. It is concluded that the specific gravity, the percentage of absorption and capacity of polluted sandy soil compaction, down with respect to values of undisturbed soil, while there was a slight increase in cutting resistance.

Keywords. Oil spills; Changes in the mechanical properties of soils; Soil contamination; Sandy soils; Oil production process; Light Non-Aqueous Phase Liquids.

Résumé. La contamination des sols due à la marée noire accidentelle de produits chimiques, est une menace permanente causée par le développement économique et social des communautés. En particulier, les de déversement d'hydrocarbures sont communs au cours du processus de production de brut, ainsi que lors de la commercialisation, le transport et le stockage dans des lieux de collecte et de distribution. Apparaît alors l'initiative d'évaluer des variations des propriétés mécaniques des sols touchés par les déversements de produits chimiques de l'industrie pétrolière. Pour cette étude, a choisi l'huile comme un contaminant, et une matrice de sol sablonneux comme milieu poreux saturé d'eau par pompage d'écoulement ascendant à un taux de 12 ml min⁻¹. Nous avons procédé à l'échantillonnage à des intervalles de temps définis, en utilisant 30 cm³ conteneurs. Dans les échantillons, les concentrations de graisse et d'huile ont été déterminées. Ensuite, des échantillons de sol ont été soumis à la caractérisation mécanique, et les résultats ont été comparés avec le comportement de l'échantillon de sol non affectée par déversement de pétrole. Il est conclu que la gravité spécifique, le pourcentage d'absorption et la capacité de compactage du sol sablonneux contaminé ont diminué par rapport aux valeurs du sol non modifié, tout en observant une légère augmentation de la résistance de coupe.

Mots-clés. Déversement d'hydrocarbures; Variations des propriétés mécaniques des sols; Contamination des sols; Sols sablonneux; Processus de production de brut; Liquides en phase non aqueuse.

Resumo. A contaminação do solo devido ao derrame acidental de substâncias químicas, é uma ameaça permanente causada pelo desenvolvimento econômico e social das comunidades. Em particular, derramamentos de petróleo são comuns durante o processo de produção de petróleo, bem como durante a comercialização, transporte e armazenamento de coleta e locais de distribuição. Surge então a iniciativa de avaliar mudanças nas propriedades mecânicas dos solos afetados por vazamentos de produtos químicos da indústria de petróleo. Para esta investigação foram selecionados óleo como um contaminante, e matriz de solo arenoso como meio poroso saturado com água, que foi bombeado a uma taxa de fluxo ascendente, de 12 ml min⁻¹. Procedeu-se a amostragem em intervalos de tempo definidos, utilizando-se containers com 30 cm³. Nos exemplos, a concentração de óleo e gordura. Em seguida, as amostras de solo foram submetidas a caracterização mecânica e os resultados foram comparados com o comportamento da amostra de solo afetada pelo derramamento de óleo. Conclui-se que a gravidade específica, a percentagem de absorção e capacidade de compactação do solo arenoso contaminado diminuída em relação aos valores do solo não perturbado, enquanto que houve um ligeiro aumento da resistência ao corte.

Palavras-chave. Derramamento de óleo; Variações das propriedades mecânicas dos solos; Contaminação do solo; Solos arenosos; Processo de produção de óleo; Líquidos de fase não aquosa.

Introducción

El desarrollo de las comunidades implica el consumo de recursos naturales, siendo el suelo uno de los más afectados. En los últimos años ha aumentado el interés en evaluar la calidad y la salud del recurso suelo, debido a que es un componente fundamental de la biósfera, del que se obtienen alimentos, insumos para la industria y recursos energéticos (Revelli et ál., 2010). Se evidencia, además, que el consumo de hidrocarburos es una necesidad sentida de la población, por cuanto en la mayoría de actividades económicas se requieren derivados de los mismos. La producción de hidrocarburos y sus subproductos requiere la ocupación de grandes extensiones de tierra, así como también la instalación de redes para el transporte de estos fluidos (crudos o procesados). Para el caso de Colombia, los derrames de hidrocarburos, voluntarios o por atentados, son en ocasiones comunes y tienden a afectar las capas del suelo, pudiendo llegar a afectar las capas subterráneas; sin embargo, este fenómeno se puede extrapolar a nivel mundial.

Estos derrames de hidrocarburos, accidentales o provocados, afectan tanto el suelo como el agua, así como también causan una alteración a la calidad del paisaje (Celis, 2009). El compromiso y la responsabilidad de los explotadores y productores, al igual que el temor por las sanciones económicas por incumplimiento de los planes de manejo ambiental, obliga a que se destinen cantidades significativas de dinero para la remediación de zonas afectadas.

Evidentemente, al presentarse un derrame de crudo en el suelo, se produce un impacto negativo en las condiciones naturales del terreno; por ello, es necesario conocer las propiedades mecánicas que se afectan durante estos derrames para definir si se requiere una intervención o remediación inmediata o si el tratamiento de recuperación de suelo puede posponerse.

Así mismo, es importante el definir ecuaciones de transporte con las cuales se pueda predecir el tiempo en el cual un contaminante alcance determinada longitud (Serrano et ál., 2012). Lo

anterior, porque la movilidad de la contaminación por efecto de un derrame, varía dependiendo de la naturaleza química del compuesto y de las propiedades del suelo (Fine et ál., 1997; Khamchyan et ál., 2006; Serrano et ál., 2012) o de las características fisicoquímicas de la interfase agua-suelo, en las cuales la afinidad del compuesto por el suelo, dependerá particularmente de las características químicas del mismo (Carcione et ál., 2003), las que finalmente entran a regir sobre el mecanismo de detección que debiera emplearse en función de la fase predominante de dicho compuesto en el medio poroso (Moran et ál., 2007).

En este artículo se evalúan las variaciones mecánicas de suelos arenosos expuestos a derrame de aceite. En el trabajo se concluye que la gravedad específica, el porcentaje de absorción y la capacidad de compactación son los parámetros mecánicos mayormente afectados, por lo cual el porcentaje de afectación sería una variable a considerar en el caso de establecer sanciones ambientales, así como también de definir criterios de remediación de suelos.

1. Clasificación de *Light Non-Aqueous Phase Liquids* LNAPLs

Los posibles contaminantes en el suelo pueden ser clasificados según diferentes propiedades, siendo la clasificación más sencilla, aquella realizada según la densidad de los compuestos (Serrano et ál., 2012). Se encuentran entonces los reconocidos NAPLs (*Non-Aqueous Phase Liquids*, por sus siglas en inglés), sustancias que no son solubles en agua o que tienen una solubilidad baja.

Los NAPLs pueden dividirse en compuestos más densos que el agua DNAPLs (*Dense Non Aqueous Phase Liquids*, por su descripción en inglés) o menos densos que el agua LNAPLs (*Light Non-Aaqueous Phase Liquids*, por su descripción en inglés), como el aceite utilizado en los experimentos de este trabajo.

Tanto los DNAPLs como los LNAPLs, son considerados por algunos investigadores como inmóviles (Serrano-Guzmán, 2008; Oostro et ál., 2005; Whelan y otros, 1994).

Ante un derrame de estos compuestos, los DNAPLs pueden desplazarse hasta el fondo de una capa confinante de un acuífero (Brousseau et ál., 2003; Jalbert & Dane, 2001), en tanto que los LNAPLs pueden viajar en la dirección que se desplacen las aguas subterráneas.

Los LNAPLs son los responsables de los problemas ambientales que afectan a la industria de los hidrocarburos y están presentes en las distintas partes del proceso productivo, desde la refinería, incluyendo la distribución, almacenamiento y estaciones de servicio (Celis, 2008).

En ambos casos, los compuestos deben vencer la altura crítica para penetrar en zona vadosa o en medio saturado (Serrano et ál., 2012; Serrano et ál., 2010; Celis, 2008).

1.2 Estudios previos sobre las propiedades mecánicas de suelos afectados por derrames de hidrocarburos

Los derrames durante la producción o durante la distribución del petróleo y sus derivados, bien sea originados de manera involuntaria o forzosa, liberan una buena cantidad de contaminantes orgánicos con alto contenido de compuestos polares (Serrano et ál., 2009), los cuales intervienen negativamente en el suelo. Este hecho se complica porque la mayoría del transporte de los subproductos se hace enterrando las tuberías, pudiendo adicionalmente contaminar los depósitos de

agua subterránea. La presencia de derrames, así como de otros contaminantes, genera altos costos por recuperación y remediación de los suelos tanto para las empresas como para la comunidad en general (Gong et ál., 2008).

Son numerosos los sitios contaminados por derrames de hidrocarburos y su recuperación implica altos costos (Gong et ál., 2008). Teniendo en cuenta que no se han estandarizado los métodos para hacerlo, se encuentran diferentes procedimientos que son válidos en la forma como se realizan para cada medio poroso (Pons-Jiménez et. ál., 2011).

Los análisis de hidrocarburos alifáticos, por ejemplo, pueden ser utilizados para seguir los derrames de hidrocarburo y determinar información relacionada con la fuente de contaminación y con la extensión de esta contaminación (Wang et ál., 1999, Zhu et ál., 2005), pruebas que también pueden realizarse por el método Soxhlet, que permite determinar el contenido de grasas y aceites. Ambos métodos brindan una aproximación cercana sobre las concentraciones de productos derivados del petróleo en medio poroso y los resultados coadyuvan al conocimiento de las condiciones de transporte en dicho medio.

Los derrames incontrolados de combustibles causan deterioro de la calidad del ambiente, especialmente en lo relacionado a impactos negativos a las propiedades del suelo y agua, como resultado de afectaciones a la estabilidad química intrínseca (Luthy et ál., 1997) y a la pérdida de capacidad de degradación de los diferentes microorganismos presentes en estos medios (Alexander, 1999; Eibes et ál., 2006; Serrano et ál., 2009); así como también pueden causar variaciones en la diversidad microbial (Saadoun, 2002; Maliszewska-Kordybach & Smreczak, 2003; Gianfreda et ál., 2005).

Ante la presencia de aceite, por ejemplo, un suelo arenoso saturado por este tipo de derrame tiende a perder fricción (Evgin & Das, 1992) y parámetros como la permeabilidad y la compactación sufren variaciones cuyos comportamientos están asociados a la saturación del aceite en el medio (Alsanad et ál., 1995; Alsanad et ál., 1997). En cuanto a la compresibilidad y la capacidad de deformación del suelo, Aiban (1998) encontró que estos parámetros variaban cuando la temperatura a la cual se sometía el suelo, era superior a la temperatura ambiente y que los parámetros de resistencia al corte no eran sensibles a la temperatura de ensayo, cuando las muestras estaban compactadas a su máxima densidad seca. Además, Shin & Das (2001) encontraron que suelos arenosos con concentraciones de aceites superiores hasta del 6% pueden reducir drásticamente la capacidad de carga de los suelos.

Estudios similares sobre las variaciones mecánicas en los suelos han sido adelantados en suelos finos. Es así como, las arcillas y los limos, ante la presencia de aceite sufren un aumento en la capacidad de compresión por la presencia del fluido en los intersticios del suelo, haciéndose necesario incluso el uso de factores de corrección para tomar en cuenta el cambio en el índice de compresión (Meegoda, Ratnaweera, 1994). Se destaca, que las alteraciones en el comportamiento mecánico están condicionadas al tipo de suelo y a las concentraciones de las distintas sustancias.

2. Materiales y métodos

La matriz de suelo arenosa fue ajustada para tamaño de grano comprendido entre 0,075 mm y 0,30 mm. Durante las pruebas se utilizó una bomba de jeringuilla y una columna de acrílico de 60 cm de longitud y 10 cm de diámetro interior, con recipientes de muestra espaciados cada 15 cm. Las etapas relevantes seguidas durante los ensayos se describen a continuación.

2.1 Selección de la muestra de suelo y del tipo de aceite utilizado en el estudio

El material granular, extraído de río, inicialmente es lavado utilizando el tamiz No. 200, labor con la cual se eliminan las partículas deleznable.

Posteriormente, se seca al horno a una temperatura de 100°C durante 24 h y se tamiza a los tamaños adecuados para este estudio. Para ello, se utiliza el material que pasa por el tamiz no. 50 y se retiene en el No. 200, garantizando así partículas entre 0.075 mm y 0.30 mm. El material seleccionado se almacena finalmente en un recipiente hermético.

En cuanto al aceite utilizado correspondió al aceite de carro, por cuanto los derrames ocasionados con relación a este producto, son comunes en el medio.

2.2 Saturación del medio poroso

El presente estudio busca determinar las variaciones en las propiedades mecánicas que pueden sufrir los suelos arenosos saturados, afectados por derrames de aceite. Por lo tanto, se procede entonces a realizar la saturación de la muestra de suelo inyectando agua, en flujo ascendente, a una razón de 12 ml min⁻¹. Este es el caudal mínimo que tiene la bomba y con el uso del mismo, se pretende que no se presente flujo preferencial en la columna, ni arrastre de partículas finas a lo largo de la columna de suelo. Para verificar si la columna está saturada, es necesario utilizar una solución salina de concentración 0.1M de cloruro de sodio (NaCl) y verificar la concentración de este trazador, en intervalos de 15 min, mediante la toma de muestras de agua (30 cm³) y posterior medición de la concentración utilizando un conductímetro, en cada uno de los recipientes de muestra. Se considera que la columna se encuentra saturada, cuando la concentración de salida y la de entrada son iguales.

2.3 Inyección del aceite

Una vez se comprueba que el suelo está saturado, se procede al lavado con agua limpia y posteriormente a la inyección del aceite, manteniendo durante la prueba el menor flujo permisible en la bomba utilizada con el fin de evitar la presencia de flujo preferencial. En este caso, las muestras de agua-aceite, son colectadas en los recipientes de muestra utilizando unos tubos de ensayo. Al igual que durante el proceso de saturación, la inyección de aceite finaliza cuando la concentración de salida es igual a la de entrada, o se obtiene un valor cercano.

2.4 Mediciones en el suelo contaminado

Una vez se finaliza la toma de muestras de agua-aceite, se realizan los ensayos correspondientes a las mediciones en los parámetros mecánicos de interés, los cuales se ejecutaron según las normas ASTM y AASHTO correspondiente para cada prueba (Véase Tabla 1).

Tabla 1. Normas técnicas para la evaluación de las propiedades

Prueba Mecánica	Norma Técnica utilizada
Límite Líquido	AASHTO T 89-02 y ASTM D 4318- 00
Límite plástico	AASHTO T 90-00 (2004) y ASTM D 4318-00
Gravedad específica y absorción de agregados finos	ASTM C 127 – 88 y AASHTO T 85 – 91 (2004)
Permeabilidad de suelos carga constante	AASHTO T 215 – 70 (2003) y ASTM D 2434 – 68 (2000)
Ensayo normal de compactación (Próctor)	AASHTO T 99 – 01 y ASTM D 698 – 00
Método de corte directo	ASTM D 3080 – 98 y AASHTO T 236 – 03

Fuente: Normas ASTM y AASHTO

Cada medición sigue un método de trabajo que se resume a continuación:

- El límite líquido es el contenido de humedad con el cual una masa de suelo, colocada en un recipiente en forma de cuchara (aparato de Casagrande), se separa con un ranurador. Posteriormente, se deja caer desde una altura fija (normalmente no mayor de 1 cm) y se presenta un cierre de la ranura, luego de 25 golpes de la cuchara contra una superficie lisa. Para este ensayo, aproximadamente se utilizan 10 gr de suelo, mientras que para la determinación del límite plástico se requieren 20 gr. El límite plástico, definido como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro de suelo se rompe al momento del amasado a un diámetro alrededor de 3 mm, es un método cualitativo en el que la destreza del operario define el contenido con el cual el suelo se torna quebradizo.
- La gravedad específica del suelo se determina utilizando un picnómetro que ha sido calibrado previamente, al interior del cual se introduce una masa de suelo de aproximadamente 100 gr, y posteriormente se agrega agua; terminado este proceso se procede a verter la muestra en un recipiente y llevarla al horno para un proceso de secado por 24 horas, tiempo después del cual se toma el peso seco y se registran los datos correspondientes. Se destaca, que cuando se hace la prueba en suelo contaminado es necesario agitar y rotar el picnómetro con el fin de mezclar el agua con el suelo ya que éste, al impregnarse de hidrocarburo, adquiere propiedades impermeables.
- Para el ensayo de Próctor modificado se utiliza una muestra de suelo de aproximadamente 7 kg, la cual debe estar seca en el horno por 24 horas. Con el suelo contaminado, el secado debe llevarse a cabo en una hornilla por cuanto sus propiedades combustibles pueden ocasionar un accidente si se somete a secado al horno. Una vez el material está seco, se procede a introducirlo en un molde, compactarlo en cinco capas, cada una con 55 golpes. Se pesa el cilindro, se empieza añadiendo agua a un porcentaje del 4% del peso inicial de la muestra. Se repite este procedimiento hasta que se establezca el peso de la muestra.
- El ensayo de carga constante se inicia con la saturación de la muestra de suelo vigilando que se establezca la condición de flujo. Se ubica un recipiente en la salida del permeámetro y se registra el tiempo necesario para almacenar entre 750- 900, así mismo se registra la temperatura del agua. El ensayo se repite por lo menos tres veces, en todo momento manteniendo un volumen constante de agua.

- El ensayo de corte se requiere una masa de suelo de aproximadamente 7 kg. La muestra se acondiciona a la humedad óptima del ensayo de Próctor realizado previamente y luego de compactarla en capas de 55 golpes, se procede a extraer las muestras para el ensayo de corte, utilizando un peso que corresponda a esfuerzo σ de 0.5, 1 y 2, Kg/cm² y se procede a realizar el ensayo tomando nota de las lecturas arrojadas de deformación en el dial de la máquina. Cuando se produce la falla, la muestra se retira de la caja y se toma una muestra del suelo para determinar la humedad en ese punto.

3. Resultados y discusión

3.1 Proceso de saturación de la columna

Se comprobó que la muestra de suelo estaba saturada al momento de iniciar la inyección de aceite, condición fundamental para la realización del estudio. El comportamiento de la curva de salinidad de todos los recipientes de muestra tuvo una tendencia similar, con un desfase que corresponde al tiempo que tarda el trazador en desplazarse a través del medio poroso. La columna se saturó de manera homogénea, lo cual garantizó que la inyección del aceite se hiciera en un medio completamente saturado. A medida que se realizaba la inyección del aceite, se observó que el agua era desplazada por el aceite.

3.2 Variaciones en las propiedades mecánicas del suelo

Cada suelo tiene una capacidad de respuesta a la acumulación de contaminantes. Por tal razón, la repercusión de los hidrocarburos sobre el mismo va a depender del tipo de suelo (Gutiérrez & Zavala, 2002). En este estudio, se compararon las propiedades mecánicas del suelo ajustado con las propiedades mecánicas luego de la inyección de aceite en el suelo saturado.

Los suelos arenosos se caracterizan por tener un buen drenaje y un tamaño de partícula homogéneo. Ante un derrame de hidrocarburo, los rasgos hidromórficos más característicos se asocian a las impregnaciones en forma de nódulos amiboidales que se observaron en las muestras de suelo analizadas. Se destaca además que las características de alta capacidad de drenaje de estos suelos no favorecen la retención del hidrocarburo.

Sin embargo, estas pruebas preliminares muestran que existen variaciones en la muestra de suelo analizada, como se registra en la Tabla 2.

3.3.1 Límites de Atterberg o de consistencia

Este tipo de mediciones surgieron inicialmente para suelos cohesivos (Bowles, 1992); sin embargo, aunque la matriz de suelo era de tipo no cohesivo, se decidió realizar este ensayo por cuanto se observó agrupación de los granos por acción del aceite, lo cual cualitativamente podía afectar estas propiedades.

Se encontró dificultad para realizar estas mediciones y obtener la fracción bajo la malla No. 40, así como también durante el mojado previo al ensayo, ya que el suelo con aceite presentó un

comportamiento hidrofóbico, lo cual era de esperarse, hecho que no facilitó la afinidad por el agua. Por la situación descrita anteriormente, se considera que el material alterado continuaba siendo no líquido, no plástico.

Tabla 2. Resultados de pruebas para determinar las variaciones en las propiedades mecánicas en la muestra de suelo no contaminada y contaminada

Ensayo mecánico	Muestra no contaminada	Muestra contaminada
Módulo de finura	2,22	6,58
Límites de Atterberg o de consistencia	No líquido, no plástico	No líquido, no plástico
Gravedad específica bulk (g cm-3)	2,63	2,55
Gravedad específica en condiciones saturado superficie seca (g cm-3)	2,65	2,59
Gravedad específica aparente (g cm-3)	2,7	2,65
Permeabilidad del suelo cm seg-1	0,0027	0,0079
Densidad máxima g cm-3	1,83	1,61
% Humedad óptima	13,5	13,7
% Absorción	1	0,01
ϕ (grados)	41,6	41,8
Corte directo(kg cm-2)	0,173	0,175

Fuente: Elaboración propia a partir de la investigación.

3.3.2 Gravedad específica

La gravedad específica, en su definición básica, se calcula considerando el cociente entre el peso del volumen unitario de cualquier material y el peso del volumen unitario de agua a 4°C. A nivel de geotécnica, se utilizan la gravedad específica bulk, la gravedad específica en condiciones saturado superficie seca y la gravedad específica aparente. En todos los casos, el valor obtenido en la muestra contaminada, fue inferior a la muestra inalterada, lo cual puede explicarse por cuanto el porcentaje de vacíos, que inicialmente estaba con agua y aire, pasó a estar ocupado por aceite y, en menor proporción, por el agua retenida en los intersticios del suelo, cambiando de esta forma el peso resultante de la masa de suelo ensayada (Bowles, 1992). Los resultados indican entonces una disminución en este parámetro haciendo el suelo más liviano y favoreciendo la porosidad y la permeabilidad el medio.

3.3.3 Permeabilidad del suelo y absorción

La matriz de suelo se compone de una serie de partículas discretas, con poros interconectados que permiten que el agua fluya al interior de la masa de suelo. La permeabilidad en la muestra contaminada con aceite fue mayor por cuanto la impregnación de la matriz de suelo con el aceite, permite el encapsulamiento de gránulos de suelo y aumenta la posibilidad de flujo de agua a través del medio poroso. Asimismo, los resultados de absorción son consistentes, ya que la matriz de suelo

encapsulada por el aceite, pierde capacidad de absorción. Esto ratifica el cambio en el módulo de finura del suelo, que fue explicado anteriormente.

3.3.4 Densidad máxima

Al añadir agua a un suelo seco (muestra inalterada) se forman películas de agua adsorbida alrededor de la partícula de suelo. A medida que aumenta el espesor de la película de agua, las partículas tienden a unirse, aumentando con ello la densidad para un contenido de humedad dado. En el caso de suelo contaminado con aceite, éste forma una capa que no permite esa adición de las partículas, siendo ésta la posible justificación del descenso en la densidad máxima en la muestra de suelo ensayada. A largo plazo, una disminución en la densidad del suelo puede ocasionar que los depósitos de agua subterránea se contaminen por la facilidad en el transporte de contaminantes en este tipo de medios, ya que tienen más espacios vacíos disponibles para la movilidad de los contaminantes.

3.3.5 Resistencia al corte y ángulo de fricción

La resistencia al corte de un suelo está influenciada por factores ambientales, por los cambios en los contenidos de agua y por la presión de poros instantánea que desarrolle el suelo, la cual, a su vez, depende de cuán llenos estén los vacíos y de cuán rápido esa presión de poros pueda disiparse.

En este caso, el suelo fue afectado por una inyección de aceite, lo cual cambia la capacidad de retener agua y su humedad; sin embargo, no se evidencian variaciones significativas en la resistencia al corte ni en el ángulo de fricción interna y se mantiene la condición de suelo frágil que se rompe con un esfuerzo bajo.

Conclusión

Las propiedades del suelo pueden variar ante la presencia del agua o de cualquier otro compuesto. La comparación entre la muestra no contaminada y la muestra contaminada evidencia una tendencia decreciente de la gravedad específica y de la densidad máxima de los suelos alterados con aceite. Sin embargo, la permeabilidad del medio aumentó, pudiendo explicarse este hecho por el agrupamiento temporal de los granos por la película de aceite que los envuelve. Se debe profundizar en el análisis de las variaciones de estas propiedades mecánicas, tanto en este tipo de suelos como en otras estructuras porosas, por lo cual en la actualidad, el grupo de investigación está adelantando estudios similares en otros tipos de suelos con el fin de determinar el porcentaje de afectación del suelo ante el derrame, criterio que puede ser útil para la toma de decisiones y cobros por daños ambientales.

Bibliografía

1. Aiban S.A. (1998, 153-161). *The Effect of Temperature on the Engineering Properties of Oil-Contaminated Sands*. Environmental International. 24, 1.
2. Alsanad, H.A., W.K. Eid. & N.I. Ismael. (1995, 407-412). *Geotechnical Properties of Oil Contaminated Kuwait Sand*. J. Geotech. Eng. 121.

3. Alsanad, H.A. & N.F. Ismail. (1997, 290-293). *Aging Effect on Oil Contaminated Kuwait sand*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 123.
4. Alexander M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation*. San Diego: Academic Press, Inc.
5. Baran S., J.E. Bielinska, P. Oleszczuk. (2004, 221-232). *Enzymatic Activity in an Airfield Soil Polluted with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. Geoderma 118.
6. Bowles J. (1992). *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. Ediciones Lerner, Bogotá, Colombia: Editorial Mc Graw Hill.
7. Brusseau M.L., N.T. Nelson & M.S. Constanza-Robinson. (2003, 138-147). *Partitioning Tracers Tests for Characterizing Immiscible-Fluid Saturations and Interfacial Areas in the Vadose Zone*. Vadose Zone Journal 2.
8. Carcione J.M., G.Seriani. & D. Gei. (2003, 177-191). *Acoustic and Electromagnetic Properties of Soils Saturated with Salt Water and NAPL*. Journal of Applied Geophysics 52, 4.
9. Celis H. (2008, septiembre). Contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos líquidos livianos en fase no acuosa. Ciencia Ahora 22. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
10. Eibes G., T. Cajthaml., M.T. Moreira., G. Feijoo., J.M. Lema. (2006). *Enzymatic Degradation of Anthracene, Dibenzothiophene and Pyrene by Manganese Peroxidase in Media Containing Acetone*. Chemosphere 64, 408-414.
11. El-Sayed A.A H., A.M. Shibl. & M. Ramadan. (1995, noviembre 2-5). *Laboratory Study of Crude Oil Biodegradation under Saudi Environmental Conditions*. The Fourth Saudi Engineering Conference. King Abdul Aziz University. Jeddah, Arabia Saudita 5, 251-258.
12. Evgin, E. & B. M. Das. (1992). *Mechanical Behavior of Oil Contaminated Sand*. Environmental Geotechnology. Usmen & Acar (eds). Balkema, Rotterdam.
13. Fetter C.W. (2000, 450). *Contaminant Hydrogeology*. Segunda Edición, Waveland Press, INC., Illinois.
14. Fine P., E.R. Graber. B. Yaron. (1997, febrero). *Soil Interactions with Petroleum Hydrocarbons: Abiotic Processes*. Institute of Soils and Water. Soil Technology 10, 133-153.
15. Gianfreda L., M.A. Rao., A. Piotrowska., G. Palumbo, C. Colombo. (2005). *Soil Enzyme Activities as affected by Anthropogenic Alterations: Intensive Agricultural Practices and Organic Pollution*. Science Total Environmental 341, 265-279.
16. Gong Z., Li Peijun., B.M. Wilke., Kasseem A. (2008). *Effects of Vegetable Oil Residue after Soil Extraction on Physical-Chemical Properties of Sandy Soil and Plant Growth*. Journal of Environmental Sciences 20, 1458-1462.
17. Gutiérrez Ma. Del C. & J. Zavala C. (2002, abril-junio). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. Terra Latinoamericana, Universidad Autónoma Chapingo. 20, 2.
18. Jalbert M. & J. H. Dane. (2001). *Correcting Laboratory Retention Curves for Hydrostatic Fluid Distributions*. Soil Science Society of America Journal 65, 648-654.
19. Khamchayan M., A. H. Charkhabi. & M. Tajik. (2007, febrero). *Effects of Crude Oil Contamination on Geotechnical Properties of Clayey and Sandy Soils*. Engineering Geology 89, 3-4, 220-229.
20. Labud V., C. García, T. Hernández. (2007). *Effect of Hydrocarbon Pollution on the Microbial Properties of a Sandy and a Clay Soil*. Chemosphere 66, 1863-1871.
21. Maliszewska-Kordybach B., B. Smreczak. (2003). *Habitat Function of Agricultural Soils as affected by Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contamination*. Environmental International 28, 719-728.
22. Meegoda, N.J. & P. Ratnaweera. (1994). *Compressibility of Contaminated Fine-Grained Soils*. Geotechnical Testing Journal 17, 1, 101-112.
23. Moran M., J. S. Zagorski. & P.J. Squillage. (2007). *Chlorinated Solvents in Groundwater of the United States*. Environmental Science and Technology 41, 1, 74-81.

24. Oostrom M., M.D. White, R. J. Lenhard, P.J. Van Geel. & T.W. Wietsma. (2005). *A Comparison of Models Describing Residual NAPL Formation in the Vadose Zone*. Vadose Zone Journal 4, 163-174.
25. Pons-Jiménez M., A. Guerrero-Peña, J. Zavala-Cruz, A. Alarcón. (2011). Extracción de hidrocarburos y compuestos derivados del petróleo en suelos con características físicas y químicas diferentes. *Universidad y Ciencia, Trópico Húmedo* 27, 1-15.
26. Revelli G.R., R. C. Gagliardi, O. A. Sbodio. & E. J. Tercero. (2010). Propiedades físico químicas en suelos predominantes del noroeste de Santa Fe y sur de Santiago del Estero, Argentina, *Ciencia y suelo* 28, 2, 123-130.
27. Rizvi Syed Q. A. (2009, marzo). *A Comprehensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection and Design*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. Baltimore, 674.
28. Saadoun L. (2002). *Isolation and Characterization of Bacteria from Crude Petroleum Oil Contaminated Soil and their Potential to degrade Diesel Fuel*. Journal Basic Microbiology 42, 420-428.
29. Serrano A., M. Tejada., M. Gallego., J.L. González. (2009). *Evaluation of Soil Biological Activity after a Diesel Fuel Spill*. Science of the Total Environment 407, 4056-4061.
30. Serrano-Guzmán, M.F., D.D. Pérez Ruiz, A. Puppala, I. Padilla. (2010). CWR: Alternativa para detección de NAPLs. *Puente Revista Científica* 5, 25-35.
31. Serrano-Guzmán, M.F., J. C. Forero-Sarmiento., D. A. Guzmán-Arias., D.D. Pérez Ruiz. (2012, enero a junio). Predicción del tiempo de transporte de un contaminante en suelo arenoso. *Revista de Educación en Ingeniería* 7, 13, 74-82.
32. Serrano-Guzman M.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 Mayagüez.
33. Shin, E.C. & B.M. Das. (2001). *Bearing Capacity of Unsaturated Oil-Contaminated Sand*. International Journal Offshore Polar Engineering 11, 220-227.
34. Wang, Z., M. Fingas, D.S. Page. (1999). *Oil Spill Identification*. Journal Chromatography A 843, 369-411.
35. Whelan M.P., E.A. Voudrias. & A. Pearce. (1994). *DNAPL Pool Dissolution in Saturated Porous Media: Procedure Development and preliminary Results*. Journal of Contaminant Hydrology 15 (3), 223-237.
36. Zhu Y, H. Liu, H. Cheng, Z. Xi, X. Liu, X. Xu. (2005). *The Distribution and Source Apportionment of Aliphatic Hydrocarbons in Soils from the Outskirts of Beijing*. Organic Geochemical 36, 475-483.