



# EVOLUCIÓN DE LA COMPRESIBILIDAD EN EL TIEMPO DE UN SUELO ARCILLOSO CONTAMINADO CON DIÉSEL

---

Evolution of the compressibility over time of a clay soil  
contaminated with diesel

Laura Yessenia Cabello Suárez<sup>1</sup>, María de la Luz Pérez Rea<sup>1</sup>, Christian Eduardo  
Hernández Mendoza<sup>2</sup>, Eduardo Rojas<sup>1</sup>, Roberto Galaviz González<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro

<sup>2</sup>Conacyt, Universidad Autónoma de Querétaro,  
División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería.

Autor de correspondencia  
cabello.lauray@gmail.com

**RESUMEN****ABSTRACT**

El problema de los suelos contaminados se ha agudizado en los últimos años, debido al gran incremento de accidentes por derrames, fugas y tomas clandestinas de hidrocarburos, los cuales han dañado al ambiente. Estos fenómenos modifican las propiedades del suelo tanto físicas, químicas y biológicas, así como también afectan las aguas subterráneas, ya que en los suelos arenosos, limosos o una combinación de ellos, el contaminante llega fácilmente a los mantos acuíferos. Contrario al caso de las arcillas, el contaminante queda atrapado dentro de los vacíos del suelo.

En México se han llevado a cabo distintos estudios sobre los cambios en las propiedades físicas y mecánicas, causados por la presencia de algún contaminante, de suelos finos. Estos contaminantes producen a su vez alteraciones en sus propiedades ingenieriles tales como características de deformabilidad, resistencia al corte y permeabilidad. Dicha información no se puede generalizar ya que cada región posee una diversidad en climas y tipología de suelos. En este trabajo se presenta una comparativa de la compresibilidad de un suelo arcilloso (CH) contaminado con diésel. La compresibilidad se presenta a distintos tiempos de envejecimiento: nulo (cero), uno y tres meses después de la contaminación. Estos valores se obtuvieron a partir de ensayos edométricos. Se estableció un contenido de diésel del 12.37% en su peso seco del suelo. Los resultados muestran una reducción del 17% en el coeficiente de compresibilidad conforme avanza el tiempo de envejecimiento, provocando que el suelo contaminado sea menos compresible que el suelo natural.

**Palabras clave**

Suelo contaminado, diésel, coeficiente de compresibilidad, contaminante, geotecnia ambiental

The problem of contaminated soils has been aggravated in recent years due to the large increase in accidental spills, leaks, and clandestine taps, which damage the environment. This phenomenon generates a change in physical, chemical, mechanical and biological properties of soils, as well as affections to groundwater. For example, in sandy and silty soils or a combination of them, the contaminant reaches easily the aquifer. Instead, in the case of clays, most of the contaminant remains trapped within the soil voids.

In México, studies have been carried out on the modification of physical and mechanical properties due to the presence of some pollutants in fine soils. These pollutants cause changes in the engineering properties of soils such as compressibility, strength, and permeability. However, this information cannot be generalized because each region has diversity in soil type. In this paper a comparative study in the compressibility of a clayey (CH) contaminated with diesel is performed. The compressibility at different aging times: null (zero), one, and three months after the soil was contaminated is presented. These values were obtained from oedometric tests. The content of diesel was established at 12.37% with respect to the dry mass of the soil. The results showed a 17% reduction in the coefficient of compressibility as the aging time progressed, causing the contaminated soil to be less compressive than the natural soil.

**Keywords**

Contaminated soil, diesel, coefficient of compressibility, contaminant, environmental geotechnics.

**INTRODUCCIÓN**

La actividad de exploración, perforación, refinación y transformación del petróleo causa contaminación terrestre y marina. Estas actividades



producen pérdida de la diversidad biológica y de ecosistemas que sirven de sostén al equilibrio ecológico, alteración del estado físico y químico de los suelos y del aire, así como degradación de la calidad del agua. Los hidrocarburos representan una fuente importante de contaminación en México, ya que este país es uno de los principales productores y exportadores de petróleo y sus derivados (Jacott *et al.*, 2011). En los últimos años ha existido un incremento en accidentes relacionados con hidrocarburos, los cuales han sucedido por accidentes carreteros, fugas en los tanques de almacenamiento o líneas de conducción y tomas clandestinas (Alvarez *et al.*, 2002). En cuanto a esto, la pluma de contaminación también depende de la composición química del contaminante y de las propiedades del suelo (Khamehchiyan *et al.*, 2007).

Al respecto, el petróleo y sus derivados han contaminado al medioambiente específicamente a los suelos, provocando una alteración en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Fallah *et al.*, 2015). Cuando los suelos son arenosos, limosos o una combinación de ellos, el contaminante llega fácilmente a los acuíferos. Contrario al caso de las arcillas, el contaminante queda atrapado dentro de los vacíos del suelo. Por lo que el comportamiento del suelo, ante la presencia de algún fluido, dependerá de la estructura del suelo y su mineralogía, así como también de las propiedades fisicoquímicas del fluido: la concentración de electrolitos, el tipo de iones y valencia, la absorción de aniones, el pH, la constante dieléctrica y la temperatura, entre otros factores (Meegoda y Ratnaweera, 1994).

Las interacciones fisicoquímicas en los suelos han sido expresadas cualitativamente por la teoría de la doble capa difusa. La reducción de ésta produce una estructura floculada, mientras que un aumento da como resultado una estructura dispersa. Este cambio en la estructura del suelo causa alteraciones en sus propiedades de ingeniería, tales como deformabilidad, resistencia al corte, permeabilidad, y potencial de expansión (Meegoda y Ratnaweera, 1994). Singh *et al.* (2008) observan que, entre más pequeña sea la

partícula de suelo, más sensibilidad tendrá para interactuar con el contaminante.

## Antecedentes

Los suelos reaccionan ante la presencia de un líquido distinto al agua y en función de la mineralogía del suelo. Las arcillas con una gran cantidad de mineral montmorillonita serán potencialmente más sensibles a la adsorción e interacción con los contaminantes que la illita y kaolinita (Singh *et al.*, 2008). Una cuestión importante que se debe de tomar en cuenta es que los efectos causados por la contaminación del suelo son, en general, a largo plazo, y en ocasiones las consecuencias no se detectan de inmediato, por lo que los riesgos potenciales pueden tardar décadas en manifestarse con efectos de gran magnitud (Rahman *et al.*, 2011). Al respecto, diversos estudios han evaluado cómo los contaminantes, en especial el petróleo y sus derivados, afectan al suelo. Dichas investigaciones buscan, de esta manera, recuperar los sitios contaminados, dejándolos en estado de servicio para la sociedad por medio de técnicas de remediación ambientales del suelo o, en su caso, para poder estimar los asentamientos diferenciales en una obra civil que pudieran originarse debido a una contaminación del subsuelo.

Meegoda y Ratnaweera (1994) investigaron la compresibilidad en suelos tipo caolín contaminados con distintos fluidos orgánicos: propanol y glicerol, y encontraron que, además de la naturaleza del líquido presente en los poros, la constante dieléctrica y la viscosidad del fluido repercuten en la magnitud del índice de compresibilidad del suelo contaminado. Por otro lado, Singh *et al.* (2008) propusieron una ecuación modificada para predecir el índice de compresibilidad de un suelo contaminado. Para ello realizaron una serie de experimentos en dos tipos de arcilla secas: de alta y baja compresibilidad (CH y CL), cada una fue sometida a distintas concentraciones (3%, 6% y 9%) de petróleo, diésel, gasolina y keroseno. Los resultados muestran para ambos casos un incremento en el índice de compresibilidad

conforme se aumenta el contaminante al suelo, a excepción de cuando al suelo se le aplica keroseno, asimismo, se observa una disminución en el valor del coeficiente de consolidación del suelo contaminado. Ur-Rehman et al. (2007) compararon las propiedades geotécnicas de una arcilla no contaminada y contaminada (con petróleo), mostrando en los resultados que la segunda se comporta como un material con menos cohesión debido a la formación de aglomerados. Por consiguiente, el suelo contaminado mostrará afectación en su plasticidad y capacidad de intercambio catiónico (CEC). Adicionalmente indican que el índice de compresibilidad del suelo contaminado se incrementa al triple por efecto de la creación de una estructura abierta hecha por petróleo.

Izdebska y Trzcinski (2008), a través del software STIMAN, realizaron un análisis cuantitativo de fotografías en microscopio de un barrido de una arcilla formado bajo un glacial y causado por la contaminación *in situ* del diésel. Los resultados muestran cambios en su microestructura; aumentaron el empaquetamiento de partículas y el tamaño de los mesoporos. Finalmente, concluyen que la arcilla contaminada con diésel se vuelve más isotrópica y que los cambios que existen pueden deberse a una reducción en las fuerzas de atracción entre las partículas de suelo y el fluido, ya que el fluido es caracterizado por una constante dieléctrica más baja que la del agua.

Kermani y Ebadi (2012) estudiaron una arcilla con humedad natural, contaminada con petróleo, y con un envejecimiento de tres meses

ensayándola en concentraciones de 0%, 4%, 8% y 12%. Los resultados, respecto a los límites de consistencia del suelo contaminado, permiten observar que estos se incrementan conforme se va añadiendo la concentración de petróleo. En cuanto al índice de compresibilidad, éste aumenta con el incremento del contaminante, provocando que el suelo se comprima más en comparación con el suelo sin contaminar, por lo que se concluye que este comportamiento se atribuye al efecto de lubricación que tiene el petróleo en la partícula de arcilla.

En referencia a lo anterior no se ha profundizado tanto en la influencia que tiene el contaminante sobre el suelo, en términos de asentamiento ya que, de acuerdo con la literatura, los autores se enfocan más en la influencia que tiene el suelo químicamente que en la conductividad hidráulica (Singh et al., 2008).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de ensayos edométricos hechos a una arcilla de alta compresibilidad (CH) seca, tanto contaminada, con un contenido de diésel de 12.37%, como sin contaminar. Se analiza el cambio en el valor del coeficiente de compresibilidad del suelo natural respecto al contaminado a diferentes tiempos de envejecimiento: nulo (cero), uno y tres meses.

## METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se extrajeron muestras alteradas de suelo arcilloso de alta



**Figura 1.** Localización geográfica del sitio de extracción del suelo en estudio (Google Earth, 2017)



compresibilidad (CH) a una profundidad de 2.50 m, la extracción del material se hizo a través de un pozo a cielo abierto (PCA), procedimiento descrito en la norma mexicana NMX-C431-ON-NCCE-2002. El predio se ubica en el fraccionamiento Santa Fe, municipio de Corregidora, Querétaro, sus coordenadas geográficas son  $100^{\circ} 26' 50.55''\text{O}$  y  $20^{\circ} 35' 10.65''\text{N}$ . Cabe mencionar que dicho predio no se encuentra contaminando por ningún líquido ni sustancia, por lo que la extracción de material se realizó en su condición natural.

### **Determinación del coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ )**

El coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ) representa la pendiente del tramo virgen en una curva de compresibilidad del suelo, la cual está construida por el esfuerzo aplicado (Log P) versus la relación de vacíos (e). Un  $C_c$  alto caracteriza al suelo como muy compresible (susceptible a asentamientos), mientras que un  $C_c$  bajo será menos compresible (tiene pequeños asentamientos observados).

### **Coeficiente de compresibilidad del suelo natural**

Para la construcción de la curva de compresibilidad y para la prueba edométrica se siguió el proceso descrito en la norma ASTM D 4546-08 realizando el ensayo mediante el método B. El suelo fue remoldeado en el anillo de consolidación con un peso específico seco de la muestra  $\gamma_d = 12.45 \text{ kN/m}^3$ , enseguida se prosiguió a realizar el montaje del espécimen en el consolidómetro, nivelando el brazo de palanca y el marco de carga. Cabe mencionar que el proceso de remoldeo del espécimen se llevó a cabo a través de una prensa manual (forma estática) donde no se tiene controlada la energía con la que realiza el remoldeo, sólo se controla el valor del peso específico seco de la muestra. Finalmente, es colocado el primer esfuerzo correspondiente a la carga de sitio  $P = 50 \text{ kPa}$  ( $0.50 \text{ kg/cm}^2$ ) sobre el brazo de palanca. Al colocar la carga de sitio se efectuó el proceso de saturación del espécimen

por capilaridad. Para un proceso típico de consolidación después de la carga de sitio, los esfuerzos aplicados son: 100 kPa ( $1.0 \text{ kg/cm}^2$ ), 200 kPa ( $2.0 \text{ kg/cm}^2$ ), 400 kPa ( $4.0 \text{ kg/cm}^2$ ), 600 kPa ( $6.0 \text{ kg/cm}^2$ ) y así sucesivamente hasta llegar a abatir la presión de expansión si es el caso.

Una vez que se termina el proceso de colocación de carga se comienza el proceso de descarga. De acuerdo con la colocación de la carga, saturación o descarga (según sea el caso), se comienzan a tener lecturas de deformación, las cuales se toman cada 2 s, 5 s, 10 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, y 24 h hasta que la lectura de deformación permanece constante. Las curvas de consolidación (o expansión) fueron obtenidas por cada incremento de carga y la curva de compresibilidad del suelo fue construida con el esfuerzo aplicado (Log P) y la relación de vacíos (e).

### **Coeficiente de compresibilidad del suelo contaminado con diésel**

Para este caso, se agregó un contenido de diésel  $w_{di} = 12.37\%$  correspondiente a un grado de saturación  $G_w = 60\%$  al suelo natural en su peso seco. Para ello se reprodujo el peso específico seco de la muestra y el diésel se obtuvo de Petróleos Mexicanos (PEMEX), de la estación 4127 Universidad, Santiago de Querétaro, Qro., México. Este hidrocarburo es considerado como fracción media y tiene una densidad de  $8.32 \text{ kN/m}^3$ . Cuando se obtuvo el suelo contaminado se colocó el peso necesario para remodelarlo en el anillo de consolidación en frascos herméticos dejándolos a diferentes tiempos de reposo: nulo (cero), un mes y tres meses. Para cada tiempo de envejecimiento se realizaron tres pruebas edométricas, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado "Coeficiente de compresibilidad del suelo natural", para el suelo natural tanto saturación como carga y descarga. Con las curvas de consolidación (o expansión), obtenidas por cada incremento de carga, la curva de compresibilidad del suelo fue construida con el esfuerzo aplicado (Log P) y la relación de vacíos (e).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la prueba edométrica del suelo natural y del contaminado con diésel se detallan a continuación. La Figura 2 muestra la curva de compresibilidad del suelo natural (sin contaminante), en la cual se exponen claramente los tramos de recompresión virgen y descarga. En cuanto a esto se distingue que el proceso de remoldeo del espécimen genera que la relación de vacíos inicial sea de 1.081. Asimismo se observa que, al colocar el primer incremento del esfuerzo, correspondiente a la carga de sitio (50 kPa) y dejarlo hasta la deformación constante, la relación de vacíos disminuye a 1.047. Lo anterior significa que el suelo ha llegado a la relación de vacíos real, la que poseía en condiciones *in situ*, justo antes de haber sido extraído.

En la etapa de saturación, el suelo sufre un incremento en su relación de vacíos (1.481), bajo

el mismo esfuerzo de sitio de 50 kPa, por un cambio de volumen y por su gran capacidad de adsorción de agua en condición seca. Se realizó el proceso de carga, mediante los incrementos de esfuerzo, cada uno de ellos se dejó hasta obtener una deformación constante. A causa de la colocación de los esfuerzos desde 50 kPa hasta 550 kPa, el suelo revela su tramo de recompresión, en cual se aprecia un decremento en su relación de vacíos de 1.480 hasta 1.325. A partir de la aplicación de 550 kPa hasta 2500 kPa, el tramo virgen es notable; la relación de vacíos pasó de 1.325 a 0.999. Por otro lado, la pendiente del tramo virgen de la curva de compresibilidad representa el coeficiente de compresibilidad y manifiesta un valor de  $C_c = 0.4960$  (línea punteada).

Ahora bien, para la realización de la curva de compresibilidad del suelo contaminado de cada tiempo de envejecimiento se retomaron las de la repetición 2 y 3, ya que los resultados muestran

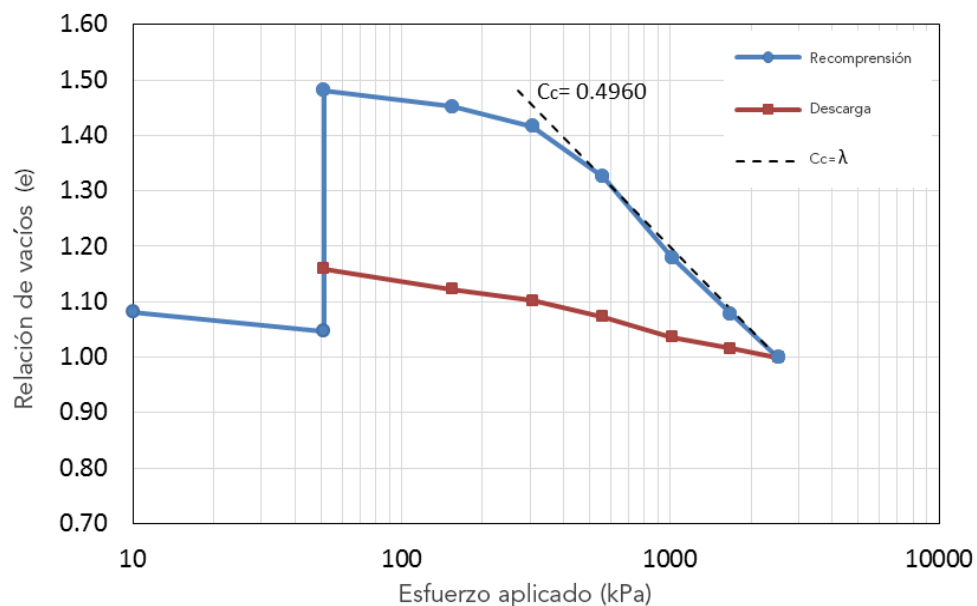


Figura 2. Curva de compresibilidad del suelo natural (no contaminado)



un comportamiento más parecido en comparación con la repetición 1. Es así que la Figura 3 exhibe la curva de compresibilidad promedio del suelo contaminado a nulo envejecimiento (0 meses) en donde se nota que la relación de vacíos obtenida después del remoldeo fue de 0.991, sin embargo, cuando el esfuerzo de sitio es aplicado (50 kPa), la relación de vacíos decrece a un valor de 0.974. De forma consecuente, el suelo contaminado es sometido al proceso de saturación con agua, donde se observa que la relación de vacíos sufrió un aumento, pasó de 0.974 a 1.393.

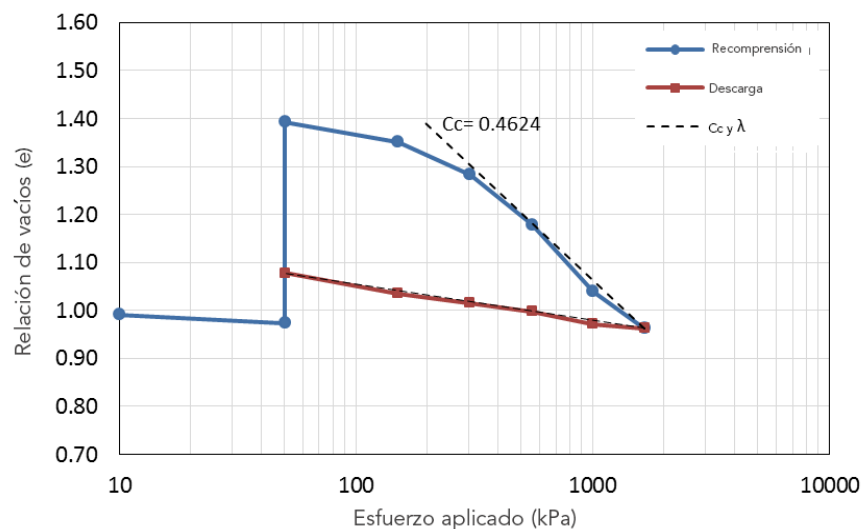
Hasta este momento cabe mencionar que el suelo natural experimenta un mayor incremento de volumen durante el proceso de saturación respecto al suelo contaminado, ya que la presencia del contaminante, una vez que el agua entra en el suelo, desplaza una cantidad de diésel para tomar al agua. Sin embargo, no desplaza la necesaria para llegar a aumentar su volumen como lo hace con el espécimen en su condición seca.

Al continuar con el proceso de carga (compresión), por medio el incremento de los esfuerzos aplicados al espécimen, se logra observar claramente que la pendiente del tramo virgen de la curva de compresibilidad (véase Figura 3), también llamado el coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ), posee un valor de 0.4624 para el caso del suelo contaminado a nulo (0 meses) envejecimiento.

En la Figura 4 se muestra la curva de compresibilidad promedio del suelo contaminado a un mes de envejecimiento. Se nota que la relación de vacíos de 0.987 nuevamente fue obtenida después de realizar el proceso de remoldeo. Tiempo después de haber colocado el esfuerzo de sitio, disminuyó el volumen del espécimen, con ello, se manifestó la reducción de la relación de vacíos hasta alcanzar el valor  $e=0.913$ . Seguidamente, el suelo contaminado experimentó un incremento de volumen por el proceso de saturación con agua, llegando a una relación de vacíos  $e=1.165$ .

Una vez terminado el proceso de saturación, el suelo natural alcanzó una relación de vacíos de 1.481 (véase Figura 1), mientras que el suelo contaminado a un envejecimiento nulo fue de  $e=1.393$  y a un envejecimiento de 1 mes llegó a  $e=1.165$ . Con lo anterior se visualiza notablemente que el incremento de volumen por saturación del suelo disminuye conforme el envejecimiento aumenta. Esto se debe a que el suelo contaminado a cierto grado de envejecimiento pierde atracción por el agua, debido a la impregnación del contaminante en las partículas de suelo.

Por otra parte, el tramo virgen de la curva de compresibilidad promedio del suelo contaminado a 1 mes de envejecimiento se expone clara-



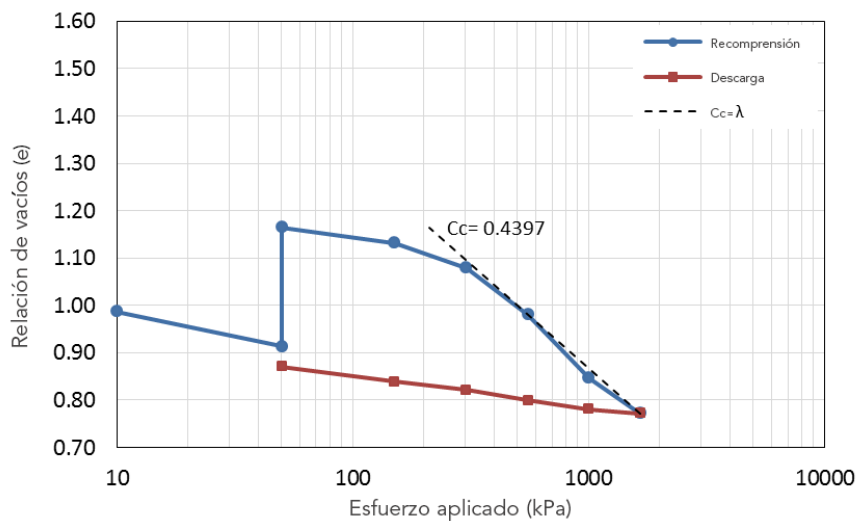
**Figura 3.** Curva de compresibilidad del suelo contaminado a 0 meses de envejecimiento

mente en la Figura 4, donde se observa que el valor de su pendiente ( $C_c=0.4397$ ) disminuye en comparación con el suelo natural y con el contaminado a nulo envejecimiento.

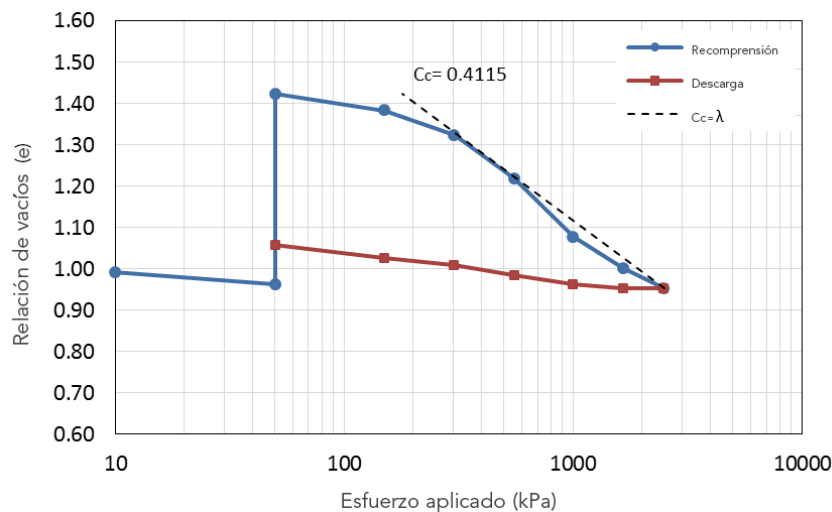
Finalmente, la Figura 5 indica una relación de vacíos de 0.991 después de remoldear el espécimen. Una vez colocado el esfuerzo de sitio, la relación de vacíos se reduce a  $e=0.962$ . Cuando el espécimen es contaminado y envejecido a 3 meses, es sometido al proceso de saturación con agua, sufriendo un incremento importante en su

volumen ( $e=1.422$ ) y provocando de nuevo que el suelo tenga una mayor atracción con el agua, por lo tanto el contaminante es desplazado.

La Figura 5 hace evidente que el valor de la pendiente del tramo virgen es  $C_c=0.4115$ , es decir, que su magnitud es menor respecto a los ensayos anteriores (nulo y de 1 mes de envejecimiento), lo que significa que el suelo contaminado se vuelve menos compresible, es decir, tendrá menor capacidad para deformarse bajo esfuerzos de compresión.



**Figura 4.** Curva de compresibilidad del suelo contaminado a 1 mes de envejecimiento



**Figura 5.** Curva de compresibilidad del suelo contaminado a 3 meses de envejecimiento





Al realizar una comparativa de las curvas de compresibilidad, obtenidas del suelo natural y contaminado a distintos tiempos de envejecimiento (véase Figura 6), se percibe que el suelo más compresible es el suelo natural por tener un mayor índice ( $C_c=0.4960$ ) mientras que, conforme el envejecimiento incrementa, el  $C_c$  del suelo expuesto a contaminación va disminuyendo. En consecuencia, al considerar que el suelo contaminado a 0 meses presenta un  $C_c=0.4624$ , el de un mes un  $C_c=0.4397$  y el de 3 meses un  $C_c=0.4115$ , se vislumbra que, por el aumento del tiempo de

envejecimiento, este tipo de suelo se vuelve más rígido (menos compresible). Por ende, se concluye que el suelo contaminado a 3 meses se vuelve menos compresible (véase Figura 7).

Los hidrocarburos se caracterizan por ser un fluido no polar, por lo que, al estar en contacto con el suelo, su estructura y textura se ve modificada. El suelo pierde propiedades de plasticidad y por ende también cohesión, dicha conclusión coincide con la investigación realizada por Ur-Rehman et al. (2007) sobre una arcilla contaminada con petróleo. Sin embargo, estos mismos auto-

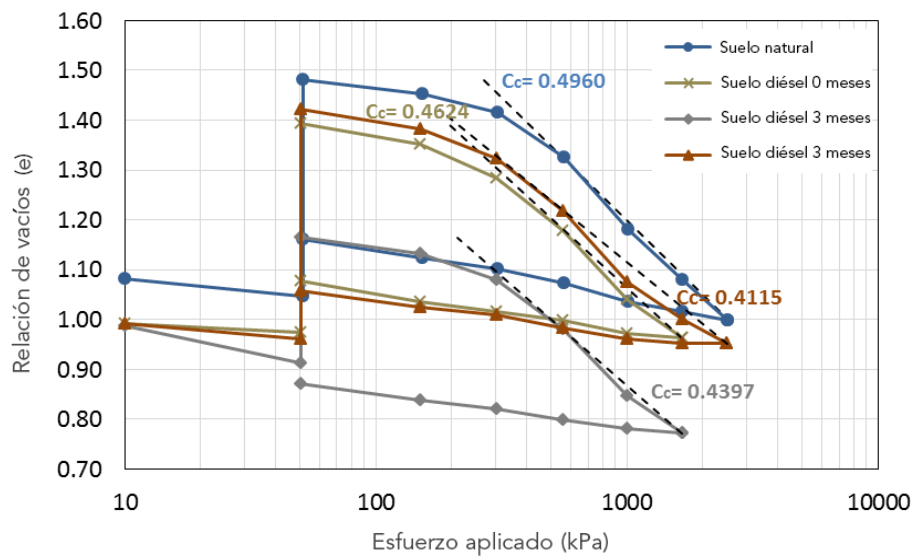


Figura 6. Comparativa de las curvas de compresibilidad del suelo natural y contaminado a nulo, 1 y 3 meses de envejecimiento

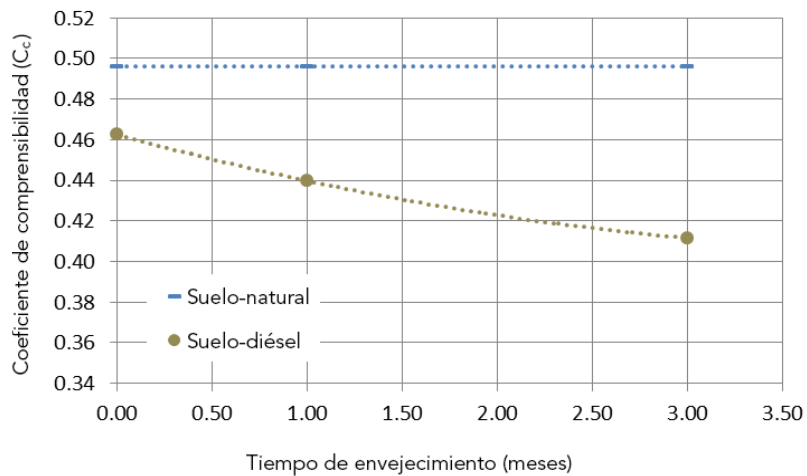


Figura 7. Comparativa del coeficiente de compresibilidad entre el suelo natural y el contaminado a nulo, 1 y 3 meses de envejecimiento

res comentan que cuando la arcilla tiene vínculo con petróleo, el índice de compresibilidad incrementa, provocando que el suelo contaminado se vuelva más deformable que el no contaminado debido a la creación de una estructura abierta a causa del contaminante. Este efecto no puede ocurrir ya que, la interacción del suelo con cualquier tipo de hidrocarburo es mucho menor que su interacción con el agua. Por lo tanto, no puede modificar su estructura y aumentar los vacíos.

El cambio en la relación de vacíos se puede atribuir a la acción de los microorganismos sobre el contaminante a lo largo del tiempo. Inicialmente, el suelo natural está asociado con una comunidad microbiana, la cual se expone a la acción del contaminante, alterando de cierta forma su equilibrio ecológico y metabólico. Por lo tanto, se lleva a cabo un proceso de selección natural con base en la disponibilidad de los nutrientes existentes en el medio, que en este caso quedan representados por el hidrocarburo empleado para contaminar el suelo. Durante este periodo de selección y adaptación del consorcio microbiano en el nuevo medio, las partículas de arcilla quedan recubiertas por el hidrocarburo, por lo que su interacción con el agua se ve limitada. Conforme se desarrolla el proceso de aclimatación de los microorganismos en el nuevo ambiente, estos comienzan a adaptarse al consumo del hidrocarburo como fuente de carbono e inicia un proceso de reducción de la concentración del contaminante presente en el medio (atenuación natural). Debido a esto, el espesor de la capa que recubre a las partículas de arcilla comienza a disminuir y, por ende, se tiene una recuperación del volumen de vacíos del suelo.

Aunado a esto y derivado de la contaminación del suelo, se puede formar una estructura floculada (Meegoda y Ratnaweera 1994), ya que las partículas de suelo generan aglomerados por efecto de la contaminación. Lo anterior se debe al cambio de la distribución de las fuerzas de atracción y repulsión intermoleculares, representadas en este caso por las fuerzas de Vander Waals-London, las cuales se ven afectadas por la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ) que indica la capaci-

dad de un medio para conducir electricidad y depende del fluido presente en el suelo natural (agua,  $\epsilon=80.3$ ) y en el suelo contaminado (diésel,  $\epsilon=2.1$ ). Por lo que, al disminuir el valor de la constante dieléctrica y/o del pH del suelo, se promueve la formación de flóculos.

## CONCLUSIONES

El diésel, al contaminar el suelo, reduce su compresibilidad. Esta reducción se favorece conforme aumenta el tiempo de envejecimiento, de tal manera que, a 3 meses de contaminación, la reducción del coeficiente de compresibilidad es del 17% con respecto al valor del suelo natural. Así el suelo contaminado se vuelve menos deformable que el suelo natural al avanzar el tiempo de contaminación. Sin embargo, de ninguna manera se puede indicar que el diésel podría actuar como agente estabilizador, ya que se debe de evitar de cualquier manera la contaminación al medio.

Por otro lado, a cero y un mes de envejecimiento, la expansión disminuyó respecto a la muestra natural. Este fenómeno fue revertido a los tres meses de envejecimiento a causa de la presencia de microorganismos. Zabbey *et al.* (2017) detectaron que, por la adición del diésel en el suelo, éste proporciona una fuente de carbono lo que propicia el crecimiento y activación de una comunidad microbiana. Asimismo, Alrumman *et al.* (2015) vislumbran que dichos microorganismos tienen la capacidad de degradar la película de contaminante que recubre a las partículas de arcilla, permitiendo que las moléculas de agua nuevamente provoquen un incremento de volumen en el suelo. Lo anterior conduce a que la expansión se revierta en un lapso de tres meses. Cabe mencionar que existen técnicas de remediación, en donde se usan los microorganismos para degradar la contaminación de sitios por algún tipo de hidrocarburo. Es así que se recomienda continuar con esta línea de investigación, ya que se deben de abordar, además de aspectos fisicoquímicos y mecánicos del suelo, aspectos biológicos.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el financiamiento a la becaria y por el equipo adquirido con fondos del proyecto de Infraestructura 270161 y a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo brindado.

## REFERENCIAS

- Alrumman, S. A., Standing, D. B., y Paton, G. I. (2015). Effects of hydrocarbon contamination on soil microbial community and enzyme activity. *Journal of King Saud University - Science*. Vol. 27(1), pp. 31-41. doi:10.1016/j.jksus.2014.10.001
- Alvarez, A., Martínez, G. E., Flores, M. A. y Garnica, P. (2002). *Metodología para saneamiento de acuíferos profundos por derrame de hidrocarburos*. Querétaro.
- FALLAH, M., Shabanpor, M. y Ebrahimi, S. (2015). Evaluation of petroleum impacts on some properties of loamy sand soil with the main focus on hydraulic properties. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 74(6), pp. 4751-4762. doi:10.1007/s12665-015-4458-8
- GOOGLE Earth. (2017).
- IZDEBSKA, D. y Trzcinski, J. (2008). *Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure*. *Geologija*. Vol. 50, pp. 68-75. doi:10.2478/v10056-008-0027-0
- JACOTT, M., Arias, J. M., Ireta, H. y Franco, A. (2011). Impactos de la actividad petrolera en la salud humana y el ambiente. Proyecto México Tóxico Etapa Tabasco. Fronteras comunes y Asociación. Ecológica Santo Tomás. México.
- KERMANI, M. y Ebadi, T. (2012). The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. Vol. 21(5), pp. 655-671. doi: 10.1080/15320383.2012.672486
- KHAMEHCHIYAN, M., Hossein, A. y Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*. Vol. 89(3-4), pp. 220-229. doi:10.1016/j.eng-geo.2006.10.009
- MEEGODA, N. J. y Ratnaweera, P. (1994). Compressibility of contaminated fine-grained soils. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 17(1), pp. 101-112. doi:10.1520/GT-J10078J
- RAHMAN, Z. A., Hamzah, U. y Binti, N. A. (2011). *Engineering geological properties of oil contaminated granitic and metasedimentary soils*. *Asian Journal of Applied Sciences*. Vol. 3(4), pp. 293-300.
- SINGH, S. K., Srivastava, R. K. y John, S. (2008). Settlement Characteristics of Clayey Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. Vol. 17(3), pp. 290-300. doi:10.1080/15320380802007028
- UR-REHMAN, H., Abduljauwad, S. N. y Akram, T. (2007). Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 12A, 15-23.
- ZABBEY, N., Sam, K. y Onyebuchi, A. T. (2017). *Remediation of contaminated lands in the Niger Delta, Nigeria: Prospects and challenges*. *Science of The Total Environment*. Vol. 586, pp. 952-965. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.075