

CAMBIO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS DEBIDO A LA APLICACIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN

Guillermina Pérez Casimiro, Rosario Iturbe Argüelles y Rosa María Flores Serrano
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio 5, cubículo 209, Circuito Interior s/n, Ciudad Universitaria,
Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México D.F.
Tel 56 23 36 00 ext 8659, Fax 56 16 21 64, e-mail gpc@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN

Debido a los procesos de remediación el suelo puede sufrir cambios en sus propiedades físicas que pueden influir en su productividad. En este trabajo, se evalúa el cambio de algunas propiedades físicas del suelo en un sitio ubicado en San Agustín Tlaxco, Puebla, el cual se contaminó debido a un derrame de gasolina Nova y posteriormente se remedió a través de la técnica de venteo y biorremediación.

Para realizar la evaluación se consideraron dos sitios; el afectado por el derrame y un predio que se consideró como suelo testigo, que se ubica en una zona aguas arriba del sitio afectado por el derrame.

En ambos sitios se obtuvieron muestras de suelo a tres profundidades. A las muestras colectadas se les determinó densidad real, densidad aparente, textura y porosidad.. Posteriormente se llevó a cabo un análisis estadístico de los datos con el propósito de establecer diferencias en las propiedades analizadas en ambos sitios. Los resultados obtenidos indicaron la existencia de diferencias significativas en las propiedades medidas.

Palabras clave: suelo, propiedades físicas, hidrocarburos, cambios, remediación

ABSTRACT

The application of remediation technologies may produce changes in the soil physical properties, and these changes may have an influence on its productivity. To address this issue, in this work it was selected a site contaminated by gasoline that was remediated through the application of bioremediation and air sparging. The site was located in the community of San Agustín Tlaxco, Puebla.

To evaluate the changes in the physical properties of the soil due to the application of the remediation technologies, two areas were used. One area was a blank area, and it was located upstream where the contamination took place, and was not affected by the gasoline spill or the remediation technology. The other area was the treated area, and this was affected by the gasoline spill as well as by the remediation technologies (bioremediation and air sparging).

Soil samples were collected from both sites at three different depths. Bulk density, real density, texture and porosity were measured. A statistical analysis was carried out in order to establish differences on the values measured. Results indicated significative changes on the soil physical properties measured in both sites.

Key words: soil, physical properties, hydrocarbons, changes, remediation

INTRODUCCIÓN

Los suelos contaminados por derrames de hidrocarburos son uno de los problemas ambientales de mayor preocupación en México y en el mundo, ya que los accidentes debidos al mal estado de las instalaciones o a tomas clandestinas, han afectado grandes extensiones de suelo, principalmente de uso agrícola.

Durante los últimos años se ha avanzado en la aplicación exitosa de tecnologías de remediación, midiendo su eficiencia en función de la disminución de la concentración de los contaminantes en el suelo, ya sea medidos como hidrocarburos totales del petróleo (HTP) o por compuesto individual, de manera que se cumpla con lo que dicta la normatividad existente; sin embargo, no se ha prestado atención a las condiciones en las que queda el suelo después de que se ha sometido a estas tecnologías.

Por lo anterior, en este trabajo, se propuso evaluar la variación de las propiedades físicas del suelo de un terreno con uso agrícola, debido a la aplicación de la tecnología de remediación de venteo y biorremediación. Para ello se compararon los valores de densidad aparente, densidad real, textura y porosidad encontrados en el sitio de estudio, con los valores encontrados en un sitio testigo que no fue afectado por el derrame, y que pertenece a la misma unidad edafológica. Los trabajos de campo y análisis de suelo se realizaron durante en el periodo comprendido entre 2001 y 2002.

ANTECEDENTES

El área de estudio se ubica en los terrenos del ejido La Cruz del poblado de San Agustín Tlaxco perteneciente al municipio de Tepatlaxco de Hidalgo, Puebla, México, con coordenadas geográficas extremas 19° 02.424' de latitud norte y 98° 00.714' de longitud oeste (Figura 1).

El uso de suelo es agrícola y se ubica a un lado del derecho de vía por donde pasan los poliductos de Petróleos Mexicanos (PEMEX) que transportan diesel y gasolina.

En julio de 1996 ocurrió un derrame de gasolina Nova en el km 408+654 del poliducto de 12" Minatitlan-México (Amozoc), el cual afectó al terreno, en una superficie de 13,372 m².

En agosto de 1996 se iniciaron los trabajos de saneamiento. La técnica recomendada inicialmente por la institución encargada de la remediación, fue la remoción del suelo y venteo. Para ello, se extrajo el suelo contaminado, se colocó sobre una membrana impermeable (liner), y se mezcló mecánicamente para volatilizar los hidrocarburos.



Figura 1. Ubicación del municipio de Tepatlaxco de Hidalgo, Puebla donde se encuentra el sitio de estudio (poblado de San Agustín Tlaxco).

Posteriormente, en octubre de 1997, se reanudaron los trabajos de saneamiento, aplicándose bioventeo, que consiste en la extracción de vapores y aeración pasiva, además de la aplicación de nutrientes y agua para humidificar el suelo y provocar un aumento en la actividad microbiana autóctona. Para el bioventeo se hincaron tubos ranurados de espesor no especificado, en los cuales se realizó la inyección y extracción de aire y nutrientes.

Después de los trabajos de saneamiento se analizaron hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) para verificar la remediación del suelo. Puesto que en esas fechas no existían en México criterios o normas oficiales que establecieran niveles de limpieza para suelos contaminados con hidrocarburos, se siguieron los estándares propuestos por la Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural de Latinoamérica y el Caribe y el Consejo Canadiense de los Ministros del Ambiente (CCME por sus siglas en inglés), los cuales se cumplieron.

De acuerdo con INEGI (2000), el tipo de suelo del área de estudio es Fluvisol Éútrico de textura gruesa y pedregoso (Je/1P). El Fluvisol Éútrico es un suelo formado a partir de depósitos aluviales recientes, su estructura presenta una alternancia de diversos materiales, dominando los de textura gruesa (arenosa), presentando además piedras o gravas en todo el perfil.

METODOLOGÍA

Para el trabajo que se presenta la metodología consistió en los siguientes pasos:

1. Delimitación del sitio de estudio y sitio testigo.
2. Diseño del muestreo de suelo y colecta de las muestras
3. Análisis de las muestras de suelo
4. Análisis estadístico de los datos

A continuación se describen estas etapas.

Delimitación del sitio de estudio y sitio testigo.

Tanto en el sitio de estudio como en el sitio testigo se delimitó un área de 80x160 m (12, 800 m²). El sitio testigo se ubicó 100 m al norte del límite septentrional del sitio de estudio en un terreno más elevado que el sitio de estudio. Para verificar si el sitio testigo no fue afectado por el derrame de combustible, se tomaron 4 muestras de suelo en el límite sur del sitio, a las cuales se les analizaron HTP (método EPA 418.1) y fracción gasolina (método EPA 8015B). Se consideraron dos profundidades: 0.40 y 1.0 m. Los resultados indicaron concentraciones por debajo del límite de detección en todas las muestras, a excepción de uno de los puntos a 0.40 m de profundidad, que presentó 40.98 mg kg⁻¹; sin embargo, no se rebasaron los límites máximos permisibles establecidos en la norma oficial mexicana NOM-EM-138-ECOL-2002 (DOF; 2002a), por lo que se consideró que no hubo afectación por el derrame.

El centroide del área del sitio de estudio fue el punto de fuga de combustible del poliducto de 12", en el cual ocurrió el derrame. Se midieron 40 m hacia el norte y el sur del centroide y 80 m hacia el este y el oeste del mismo. La delimitación del área se realizó con un levantamiento topográfico.

Diseño del muestreo de suelo y colecta de las muestras

En cada área delimitada se trazó, por medio de levantamiento topográfico, una malla de 20 x 20 m, y de cada cuadrante se tomaron muestras compuestas, a tres profundidades: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm. Cada muestra compuesta estuvo integrada por 10 muestras simples tomadas al azar dentro del mismo cuadrante. Se obtuvieron 84 muestras compuestas en cada sitio (no se tomaron muestras de cuatro cuadrantes de cada sitio debido a la presencia de una cárcava).

Las muestras simples se tomaron con un nucleador de acero inoxidable de 30 cm de largo y 5 cm de diámetro, se mezclaron en una cubeta de plástico de 10 dm³ para formar la muestra compuesta, y luego cada muestra compuesta se almacenó en una bolsa de polietileno.

Análisis de las muestras de suelo

Las muestras obtenidas se secaron al ambiente y se tamizaron con malla No. 10 para su posterior análisis.

Las técnicas seleccionadas para el análisis de las propiedades físicas de interés, son las recomendadas por el PROY-NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002b), la ASTM (American Society of Testing and Materials) y la SSSA (Soil Science Society of America) (tabla 1).

Tabla 1 Técnicas analíticas usadas

Propiedad	Técnica analítica
Densidad real	Picnómetro (ASTM, 1993; SSSA, 1986)
Densidad aparente	Probeta (FC, 1990)
Textura	Hidrómetro de Bouyoucos (ASTM, 1993; DOF, 2002b; SSSA, 1986)
% de porosidad	Calculado (de densidad real y densidad aparente)

Análisis estadístico de los datos

Se aplicó la prueba U de Mann-Whitney, que es una prueba no paramétrica, ya que los datos no siguieron una distribución normal ($p < 0.05$, prueba de Shapiro-Wilk). Se compararon los resultados obtenidos en el sitio de estudio con los obtenidos en el sitio testigo a cada profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del análisis de las propiedades físicas del suelo, para cada una de las profundidades establecidas, tanto para el sitio testigo como para el de estudio. Para el caso de la textura, se presentan por separado los porcentajes correspondientes de arenas, limos y arcillas, que en conjunto definen la textura del suelo.

En la tabla 3 se presentan los resultados de aplicar la prueba U de Mann-Whitney.

Densidad real

Los valores promedio de la densidad real encontrados en cada una de las profundidades estudiadas (0-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm) del sitio testigo fueron de 2.592, 2.593 y 2.591 g cm^{-3} , respectivamente; mientras que en el sitio de estudio fueron de 2.551, 2.562 y 2.569 g cm^{-3} . Como se observa, el sitio testigo presenta valores más altos y la densidad real permanece casi constante en las tres profundidades con una ligera tendencia a disminuir en la capa más profunda. En el sitio de estudio, el valor de la densidad aumenta con la profundidad. Los valores son cercanos a 2.60 g cm^{-3} , que es el valor promedio establecido para suelos minerales.

De acuerdo con la prueba U de Mann-Whitney aplicada, la densidad real en cada profundidad presenta diferencias significativas en el sitio testigo y el sitio de estudio ($p < 0.05$). Si bien las diferencias aparentemente son pequeñas en cada profundidad (0.041, 0.031 y 0.029 g cm^{-3}), son suficientes para denotar una diferencia estadística, aún cuando en campo sean de poco impacto en el suelo.

Se debe considerar que la densidad real depende del tipo de partícula que forma el suelo, es independiente a la estructura del mismo y por lo tanto es constante a lo largo del tiempo en un mismo estrato de suelo, por lo que debería esperarse un mismo valor de densidad real en ambos sitios. Los cambios que se presentan se atribuyen al mezclado del material durante los trabajos del veteo por variación en la distribución de las partículas.

Densidad aparente

Los valores promedio de densidad aparente determinados en cada una de las profundidades estudiadas (0-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm) en el sitio testigo, fueron de: 1.415, 1.408 y 1.36 g cm⁻³, respectivamente; en tanto que, en el sitio de estudio, los valores fueron de 1.298, 1.299 y 1.286 g cm⁻³. Las diferencias encontradas fueron de 0.117, 0.11 y 0.074 g cm⁻³, respectivamente. El sitio testigo presenta los valores más altos y conforme aumenta la profundidad el valor de la densidad aparente disminuye; por el contrario, en el sitio de estudio, los valores son más bajos y se mantienen iguales conforme aumenta la profundidad.

Tabla 2. Resultados de los análisis físicos por profundidad

Parámetro	Sitio testigo		Sitio de estudio		
	Intervalo	Media Aritmética	Intervalo	Media Aritmética	
0 - 20 cm	Densidad real (g cm^{-3})	2.526-2.653	2.592	2.445-2.622	2.551
	Densidad aparente (g cm^{-3})	1.355-1.466	1.415	1.116-1.422	1.298
	Porosidad (%)	42.619-47.705	45.421	44.651-56.133	49.139
	Arenas (%)	77.5-86.89	83.45	51.89-83.14	70.04
	Arcillas (%)	5.83-8.94	6.71	1.98-11.25	8.33
	Limos (%)	6.89-15.5	9.85	9.89-37.25	21.63
20 - 40 cm	Densidad real (g cm^{-3})	2.529-2.643	2.593	2.501-2.608	2.562
	Densidad aparente (g cm^{-3})	1.257-1.483	1.408	1.118-1.428	1.299
	Porosidad (%)	42.744-51.699	45.694	44.402-55.948	49.307
	Arenas (%)	71-86.98	81.58	48.61-83.14	67.82
	Arcillas (%)	5.74-8.22	6.89	2.48-12.36	8.79
	Limos (%)	6.89-20.78	11.53	9.89-41.39	23.39
40 - 60 cm	Densidad real (g cm^{-3})	2.534-2.648	2.591	2.517-2.645	2.569
	Densidad aparente (g cm^{-3})	1.240-1.481	1.360	1.061-1.436	1.286
	Porosidad (%)	43.182-52.423	47.506	43.977-58.442	49.929
	Arenas (%)	53.89-86.89	76.55	40-82.64	65.15
	Arcillas (%)	5.83-10.72	7.45	3.48-12.39	8.95
	Limos (%)	7.25-36.89	16.01	10.39-51.5	25.90

 Tabla 3. Resultados de la prueba U de Mann-Whitney ($\alpha = 0.05$)

Parámetro	p		
	Profundidad (cm)		
	0-20	20-40	40-60
Densidad real (g cm^{-3})	2.736E-05	6.392E-05	4.830E-04
Densidad aparente (g cm^{-3})	8.059E-09	5.666E-06	6.688E-03
Porosidad (%)	1.048E-06	6.392E-05	2.696E-02
Arenas (%)	1.505E-08	8.429E-08	2.339E-04
Arcillas (%)	2.794E-05	2.018E-05	7.761E-04
Limos (%)	6.666E-09	8.012E-08	3.387E-04

Ho = No hay diferencias en la propiedad medida en ambos sitios (sitio de estudio y sitio testigo)

Se rechaza Ho si $p < 0.05$

En suelos arenosos el intervalo típico del valor para densidad aparente es de 1.45 a 1.6 g cm⁻³; como se observa, los valores del sitio testigo sí corresponden a dicho intervalo, no así los del sitio de estudio.

De acuerdo con la prueba U de Mann Whitney aplicada, hay una diferencia significativa en el sitio testigo y el sitio tratado a cada una de las profundidades estudiadas. El efecto del cambio de valor de densidad aparente, se observa en una mayor resistencia a la penetración de las raíces de las plantas y una menor capacidad de filtración del agua.

Considerando que la densidad aparente del suelo se relaciona con el peso específico de los minerales, la materia orgánica presente, el estado de agregación y la proporción del volumen ocupado por los espacios intersticiales, es de esperar que se encuentren valores más bajos en el sitio de estudio que en el sitio testigo; debido al mezclado al que fue sujeto el sitio de estudio durante el venteo.

Porosidad

La porosidad de un suelo depende de los valores de densidad aparente y densidad real presentes en el mismo. Para suelos arenosos superficiales se establecen valores de porosidad típicos entre 35 y 50 %. Los porcentajes de porosidad encontrados en el sitio testigo a cada una de las profundidades estudiadas (0-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm) fueron de 45.421, 45.694 y 47.506 %, respectivamente; y para el sitio de estudio de 49.139, 49.307 y 49.929 %. Las diferencias encontradas fueron de 3.718, 3.613 y 2.423 %. Tanto en el sitio testigo como en el tratado, los valores de porosidad aumentan conforme aumenta la profundidad. Los valores más altos se presentan en el sitio tratado con la técnica de remediación.

De acuerdo con la prueba U de Mann Whitney aplicada, hay una diferencia significativa en la porosidad medida en ambos sitios a cada una de las profundidades estudiadas. Las diferencias numéricas son altas y en el campo estas diferencias (aumento de la porosidad) se traducen en una mayor resistencia a la penetración y menor velocidad de filtración de agua.

Los valores de porosidad son más altos en el sitio tratado con la técnica de remediación, debido al mezclado del suelo que se realizó durante el venteo.

La porosidad está estrechamente relacionada con la densidad real y la densidad aparente, de tal forma que si existen cambios en ellas, existe un cambio en el porcentaje de porosidad.

Textura

De acuerdo con los resultados obtenidos, el sitio testigo presenta una textura areno-migajosa de acuerdo con la calificación USDA (United States Department of Agriculture); mientras que con la clasificación FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) corresponde a una textura media. En el sitio de estudio, los porcentajes de las partículas presentes llevan a una textura de migajón arenoso de acuerdo con USDA y, de textura media, de acuerdo con la clasificación FAO.

Los porcentajes de arenas presentes en cada capa estudiada del sitio testigo (0-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm) fueron de 83.45, 81.58 y 76.55 %, respectivamente, y fueron más altos que los que se encontraron en el sitio de estudio (49.13, 67.82 y 49.929 %).

La cantidad de arcillas presentes en cada una de las capas del sitio testigo (6.71, 6.89 y 7.45 %) fue más baja que la encontrada en el sitio tratado (8.33, 8.79 y 8.95 %). De igual forma el contenido de limos en el sitio testigo (9.85, 11.53 y 16.01 %) fue más bajo que en el sitio tratado (21.63, 23.39 y 25.90 %).

Con base en los resultados de la prueba U de Mann Whitney, se establece que los porcentajes de arenas, limos y arcillas presentes en el sitio testigo y el sitio de estudio a cada profundidad, fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$).

Las diferencias numéricas, de acuerdo con estos datos indican que el sitio testigo presenta una menor retención tanto de humedad como de nutrimentos, ya que la presencia de arcillas y limos es baja comparada con las cantidades presentes en el sitio de estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De este trabajo se concluye que las propiedades físicas estudiadas, sí presentaron una variación estadística significativa. Estas propiedades se encuentran estrechamente relacionadas, ya que tanto la densidad real como la densidad aparente y la porosidad están en función de las cantidades de partículas en el suelo, de su tamaño y su arreglo. Al ser removido el suelo durante los trabajos iniciales en la colecta del producto derramado y posteriormente en los trabajos correspondientes a la limpieza del sitio, la distribución y arreglo de las partículas se alteró y por consiguiente se alteran dichas propiedades.

De los datos obtenidos, se establece que el sitio testigo está más compactado, que el tratado, por lo cual las raíces de las plantas encuentran mayor resistencia en él para su crecimiento. Por el contrario, en el sitio tratado, el mezclado del suelo ayudó a quitar dicha compactación, por lo cual se puede decir que en lo concerniente a las propiedades físicas del suelo, el tratamiento de bioventeo fue benéfico.

Cabe mencionar que ambos sitios se encuentran cultivados con especies de ciclo anual y de temporal como el frijol, maíz y haba. Los trabajos de labranza realizados en ambos sitios favorecen la compactación del suelo.

Lo esperado en otros suelos, es que las propiedades físicas cambien ya que con el venteo se altera el arreglo del suelo, en el caso de suelos arcillosos compactos se rompe de igual forma su arreglo generando con ello canales por los cuales puede infiltrarse el agua, pero no aumenta mucho su capacidad de infiltración, pero la técnica de bioventeo no es recomendada para suelos arcillosos.

Por lo anterior, se recomienda que:

- Posteriormente a los trabajos de remediación de un suelo, se establezca un periodo de monitoreo para evaluar los cambios en las propiedades físicas del suelo, y en caso de que se presenten cambios negativos se propongan medidas de recuperación para que mejoren sus condiciones, en función del uso que se quiere hacer de él.
- Profundizar la investigación con estudios encaminados a verificar si las diferencias que la estadística marca como significativas, realmente son de impacto en campo.

AGRADECIMIENTOS

Se hace un reconocimiento a: Carlos Flores Torres, Jesús Flores Torres, Carlos Torres Vázquez, David Garibay, Ignacio Blanco, Biol. Ángel Vega López, Ing. Ramón Giles, por su colaboración en los trabajos para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

ASTM (American Society of Testing and Materials) (1993). *Annual Book of ASTM Standards*, v 04.02.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2002a), *Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002, Que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para la restauración*, SEMARNAT, Diario Oficial de la Federación, México D.F.

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2002b). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*, SEMARNAT, Diario Oficial de la Federación, México D.F.

FC (Facultad de Ciencias de la UNAM) (1990). *Manual de prácticas de laboratorio*, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2000). *Síntesis geográfica del estado de Puebla*, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

SSSA (Soil Science Society of America Book Series) (1986). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, Soil Science Society of America.