

La geotecnia ambiental como base estratégica del desarrollo de estudios de caracterización y remediación de suelos contaminados por hidrocarburos

José de Jesús TORRES-GARCÍA^{a,1}, María de la Luz PÉREZ-REA^b,
Eduardo ROJAS GONZÁLEZ^b y Christian Eduardo HERNÁNDEZ MENDOZA^b

^a*Dirección de Soluciones Tecnológicas, CIATEC, A.C.*

^b*División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. UAQ.*

Resumen. La red de oleoductos que se extienden en cualquier territorio ve afectada su integridad mecánica derivado de fenómenos de corrosión, falta de mantenimiento, peligros naturales (deslizamientos, hundimientos, sismos, huracanes, etc.), además de acciones antropogénicas (extracción clandestina de hidrocarburos, accidentes de operación, actos de vandalismo, etc.). Se suma a esta lista los riesgos que implica el transporte terrestre de hidrocarburos mediante autotanques y carrotaques. Las emergencias ambientales derivadas de derrames de hidrocarburos requieren ser atendidas a la brevedad, a fin de contener la migración del bulbo contaminante en cualquier fase. En esta etapa la geotecnia ambiental ofrece una respuesta inmediata para la definición de las acciones pertinentes y efectivas en las labores de contención. Sin embargo; la ejecución de estudios geotécnicos y las pruebas de campo y laboratorio ocurren hasta la definición de los trabajos de caracterización del suelo contaminado. Se propone la implementación de un criterio geotecnista como base estratégica en la etapa de contención de las emergencias ambientales derivadas de derrames de hidrocarburos, así como los pasos a seguir en las etapas de caracterización y remediación del suelo, en función del medio físico específico en que se localiza un evento y las medidas de seguimiento hasta la liberación del sitio.

Palabras Clave. Suelo contaminado, geotecnia ambiental.

1. Introducción

Los hidrocarburos derivados del petróleo, sin lugar a duda constituyen la principal fuente de energía para la humanidad, pero el uso de los mismos los convierte en un importante contaminante medioambiental [1]. El traslado de los hidrocarburos se realiza por medio de la red de ductos (oleoductos, poliductos, gasoductos, etc.), carrotaques, autotanques y costa afuera mediante la red de buques especializados. Durante el trayecto de distribución existe la probabilidad de que se presenten accidentes derivados de fenómenos naturales o acciones antropogénicas en las que se generan derrames de hidrocarburos, generando un impacto ambiental sobre el sitio específico y cuya repercusión puede verse amplificada en función del tiempo de respuesta a la emergencia

¹ Corresponding Author, José de Jesús TORRES-GARCÍA, Dirección de Soluciones Tecnológicas, CIATEC, A.C., Omega 201, Col. Industrial Delta, León, Gto. México; E-mail: jgarcia@ciatec.mx.

ambiental, el entendimiento de la exposición del medio físico y el tiempo de ejecución de las labores de atención a la emergencia, caracterización y remediación del suelo. La contaminación ambiental ocasionada por el petróleo y productos petroquímicos (mezclas complejas de hidrocarburos), se reconoce como uno de los más graves problemas de la actualidad, sobre todo cuando se asocia a los derrames accidentales a gran escala [2]. 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 [3]. Una afectación importante sucede cuando estos siniestros dañan suelos agrícolas, provocando un perjuicio económico y social debido a la inutilización de estos suelos para la producción de cultivos o ganadería, además de alteraciones en la calidad del paisaje [4], [5]. En función de estas condiciones, siempre debe tenerse en cuenta la capacidad de atenuación natural del suelo, que en conjunto con el modelo conceptual; representa el punto de partida para el razonamiento lógico de la solución del evento. En su definición práctica, la atenuación natural es la reducción de las concentraciones del contaminante en el ambiente con los procesos biológicos, los fenómenos físicos (advección, dispersión, dilución, difusión, volatilización, sorción/desorción) y las reacciones químicas (intercambio iónico y transformación abiótica) [6]. Las variables edafológicas del suelo (físicas, químicas y biológicas), afectan y/o condicionan el desplazamiento de la contaminación. Probablemente el componente más importante del suelo en relación con la persistencia de sustancias tóxicas lo representan las arcillas. La persistencia aumenta cuanto más pequeñas son las partículas debido a que aportan un área superficial mayor para la adsorción de los productos químicos [7].

La atención a las emergencias ambientales en sus fases de contención, caracterización y remediación; requieren la colaboración de varias especialidades, tales como ingeniería ambiental, química, civil, geotecnia, geología, biología, mecánica, industrial y en función del contaminante específico se puede incluir especialidades relativas a la salud humana y zootecnia; por citar algunas de las más recurrentes. El conjunto de estas disciplinas imprime un alto valor agregado para el entendimiento de la intensidad del derrame, la afectación inmediata y a mediano plazo, así como los medios más efectivos para iniciar los trabajos de restauración ambiental.

Es en este punto que la geotecnia ambiental se presenta como una herramienta concreta y estratégica para la toma de decisiones en campo y gabinete, hacia la generación de un programa de trabajo y la interpretación de las mejores prácticas para la recuperación del sitio. Su labor inicia con la identificación del medio físico en el que se presenta el derrame, brinda respuestas inmediatas para el entendimiento de los medios de dispersión e incluso desde una inspección visual el especialista geotécnico puede deducir de forma muy aproximada la zona potencial sobre la cual se extenderá el bulbo contaminante en la superficie y su interacción con el subsuelo.

Una vez realizadas las labores de contención de la emergencia y mediante estudios de campo, se puede establecer la estrategia para la recuperación del material contaminante e iniciar las actividades de caracterización física y química que permitirán conocer el detalle de las condiciones naturales del área afectada y el grado de contaminación derivado de la emergencia, estableciendo su relación con el nivel freático y los medios de dispersión (suelo y agua), que pudieran activarse en el subsuelo.

Un caso especial son los pasivos ambientales, ya que en ocasiones no es posible obtener datos relevantes del evento de derrame e incluso no se tiene conocimiento directo del tipo de contaminante existente o de la fecha en que ha ocurrido. En estos casos los

trabajos de caracterización se realizan conforme un estudio geotécnico dicta sus propios principios sobre la búsqueda específica del entendimiento del estado actual del subsuelo, el conocimiento del volumen de suelo contaminado y la definición de los elementos naturales o antropogénicos que hayan potencializado la dispersión de los contaminantes.

2. La emergencia ambiental

Los combustibles no siempre se ven, pero tienen la ventaja de que huelen y de que su olor es fácilmente reconocido. Los derrames de petróleo crudo y de residuos de perforación tienen la característica de detectarse por su color y aspecto [8]. Una vez detectada y reportada una emergencia ambiental, el primer paso para la restauración ambiental consiste en aplicar medidas de contención inmediatas para dos fines principales: contención y recuperación.

Inicia cuando se ha identificado el sitio del derrame, el método o métodos de contención dependerán del medio de transporte, el origen y ubicación espacial de la fuga. Se utilizan barreras para evitar la extensión de la contaminación en la superficie (suelo o agua), las cuales pueden integrar material absorbente que inicie las labores de recuperación o en su caso, acumule el material contaminante. En eventos en los que el derrame es de una gran magnitud sobre el suelo, es viable generar una fosa hacia la cual se canalice el flujo del contaminante para su depósito y mejor control durante la etapa de recuperación (Figura 1). Esta fosa deberá de disponer medidas que eviten la infiltración de la contaminación hacia el subsuelo o cuerpos de agua, pudiendo utilizarse incluso una geomembrana que asegure la impermeabilidad temporal de la fosa, suficiente para permitir la colecta en un momento posterior. Como es de esperarse, el aspecto geotécnico es básico para el diseño y construcción, así como de la determinación de las características geohidrológicas en el estudio de los acuíferos someros [9]. Se cuenta con estudios de referencia para la permeabilidad de distintos suelos bajo la infiltración de distintos hidrocarburos [10].



Figura 1. Zanjás de contención.

A la par de los trabajos de contención de la contaminación, se puede iniciar las acciones de recuperación del material, tales como la fase libre de hidrocarburos en suelo

y agua o bien; el material específico que permita una colecta inmediata para su resguardo en tanques de almacenamiento temporales. Resulta pertinente aclarar que el volumen vertido de hidrocarburos en un derrame es difícil de estimar, ya que se depende de los datos de volumen del recipiente, el nivel de llenado, el valor de consumo, etc., datos que suelen no contar con una bitácora confiable (solo el caso de ductos depende de controles de flujo y sistemas de monitoreo ubicados a kilómetros de distancia). Sin embargo, de forma empírica, la experiencia de campo expresa que en el caso de los hidrocarburos refinados comerciales, se estima que en cada evento de derrame es posible recuperar entre un 60% y 70% del volumen expuesto, el material restante es susceptible de permear al subsuelo, flotar sobre cuerpos de agua en espesores limitados en los que una bomba de achique no es efectiva; y en función de las fracciones que compongan el hidrocarburo, una parte menor (5% a 10%), pueda ser transportada en el flujo de acuíferos someros. Para el caso de productos químicos, la forma de disposición en el medio ambiente y el método de recuperación depende de forma directa del tipo de solución y concentración en que se haya encontrado durante su transporte, por lo que inicialmente se recurre a las hojas de seguridad de cada producto en específico, pudiendo ser necesario la integración de equipo y mano de obra más especializada para estos trabajos.

3. Estrategia geotécnica

Es durante la planeación, ejecución y supervisión de los trabajos en campo que las necesidades específicas del sitio contaminado deben ser atendidas de forma práctica, en concordancia con el cumplimiento de procedimientos que son susceptibles de ser evaluados por la autoridad ambiental. Se presentan los temas más recurrentes en los que las aplicaciones geotécnicas brindan una respuesta concreta.

3.1. Definición de puntos de muestreo

En la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación) [11], se establece que la selección de los puntos de muestreo debe considerar las características del sitio, sin establecer criterio alguno. Se omite considerar el tiempo que ha transcurrido desde la ocurrencia del derrame, la infiltración probable en función del tipo de suelo y la interacción que el flujo de contaminante haya desarrollado sobre el medio ambiente inmediato.

Un criterio geotécnico establece una mejor distribución de los puntos de muestreo una vez conocido el medio físico del sitio y evaluadas las propiedades del suelo que puedan incidir en el comportamiento del bulbo contaminante generado en el lapso comprendido desde el derrame hasta la fecha propuesta para el muestreo ambiental. Bajo estos términos, se establecen los parámetros de estudio que permiten generar un modelo de la dispersión del contaminante:

- Estratigrafía y nivel piezométrico. Define de forma precisa los estratos que conforman el subsuelo sobre el cual se ha depositado en la superficie el material contaminante, evaluando la profundidad máxima de contaminación.
- Clasificación SUCS. Expone el detalle de la estratigrafía y define espacialmente las zonas preferenciales sobre las que la contaminación se pueda propagar y en su caso, estacionar.

- Permeabilidad y porosidad. Permite estimar el volumen de infiltración que ha desarrollado la contaminación desde el momento del derrame hasta la fecha actual, además; estos valores son referencia para métodos de remediación de suelo (bioventeo).

En general, la recomendación geotécnica implica la realización de un estudio que permita conocer los mecanismos de flujo naturales en la superficie y el subsuelo, que definan espacialmente la probable propagación de la contaminación y a la vez, sirvan como elementos para la toma de decisión en las actividades de restauración física y química. Esta recomendación puede incluso suponer la necesidad de realizar un número de muestras de suelo mayor a lo especificado en las normas, en la idea de entender el caso particular de estudio, tal como lo expone la Tabla 1, basado entre la comparación de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 y un criterio geotécnico.

Tabla 1. Puntos de muestreo en función del área contaminada [12].

Área (ha)	Puntos de muestreo NOM-138	Puntos de muestreo recomendados		
		(Arena)	(Arena Limosa)	(Arcilla)
Hasta 0.1	4	6	6	2
0.2	8	10	10	4
0.3	12	14	14	6
0.4	14	16	15	7
0.5	15	17	16	8
0.6	16	18	17	8
0.7	17	20	18	9
0.8	18	22	19	9
0.9	19	23	20	10
1.0	20	25	22	10

3.2. Muestreo de Suelos

Un criterio geotécnico permite definir el método más conveniente para cada sitio, pudiendo utilizarse técnicas combinadas para la extracción de muestras de mayor calidad para análisis ambientales. La utilización de agua como método de enfriamiento o lubricación en perforaciones se encuentra restringida; ya que genera el lavado de las muestras, emitiendo resultados erróneos y fenómenos de lixiviación en el sitio. La obtención de muestras inalteradas se refiere no solo a la estructura del estrato de suelo, sino también a su integración con el hidrocarburo. En la tabla 2 se identifican las recomendaciones de toma de muestras (profundidad y espaciamento), por tipo de suelo y contaminante.

Tabla 2. Recomendación de espaciamento de muestras por punto [12].

Tipo de suelo	Hidrocarburo	Profundidad muestreo(m)	Muestras/Punto
Arena	Combustóleo	12.0	1@3m
	Diesel	15.0	1@3m
	Gasolina	20.0	1@2m
Arena Limosa	Combustóleo	9.0	1@3m
	Diesel	9.0	1@3m
	Gasolina	12.0	1@3m
Arcilla	Combustóleo	4.0	1@2m
	Diesel	4.0	1@2m
	Gasolina	6.0	1@2m

Se identifican los principales métodos de muestreo geotécnicos utilizados para fines ambientales.

- Pozo a cielo abierto (PCA). Conforman la mejor oportunidad de entender de forma visual la problemática ambiental generada por el derrame. La ejecución del PCA debe asegurar la integridad de los taludes y permitir el acceso del personal responsable de la colecta de la muestra de forma segura hasta la profundidad de interés. La apertura del PCA permitirá la evaporación de hidrocarburos volátiles, por lo que las muestras de suelo deben tomarse del perfil de excavación conforme su avance. Cuando el nivel freático es somero y el derrame ha alcanzado este estrato, el PCA puede convertirse en una zanja colectora de fase libre de hidrocarburos.
- Perforadores manuales. Para fines ambientales se han adaptado de una forma inmediata, dada la sencillez de obtención de muestras de suelo y la mínima invasión que se genera. El tipo de equipo de perforación se define en función del tipo de suelo y la profundidad requerida, se requiere que la disposición de la muestra sea insertada en el dispositivo de transporte (frasco o bolsa), de forma inmediata a su extracción a la intemperie.
- Perforadores neumáticos. Es ampliamente utilizado el ensayo de penetración estándar (SPT), ya que permite llegar a profundidades mayores a las alcanzadas por perforadores manuales y la calidad de la muestra obtenida cumple con el estándar requerido para fines ambientales. En suelos donde este método no es viable, se pueden utilizar equipos de perforación combinada en los que una vez que se llega a la profundidad requerida, se inserta el dispositivo SPT para obtener de forma directa la muestra. En suelos compactos (duros), se puede utilizar técnicas de penetración dinámica, que permitirán el reacomodo de partículas de grava o arena dentro del penetrómetro, asegurando una captación representativa del material contaminado.
- Métodos geofísicos. Su aplicación en la resolución de problemas geotécnicos es ampliamente conocida, por lo que su adecuación a muestreos ambientales es de fácil aplicación y representa resultados casi inmediatos para la evaluación del subsuelo. Sin embargo, la prospección del subsuelo por métodos sísmicos, eléctricos, electromagnéticos o gravimétricos vendrá condicionada, en la mayoría de los casos, por el objetivo perseguido y las condiciones del terreno. La tomografía eléctrica se presenta, entre todos los métodos, quizás como el más polivalente y de resultados más inmediatos [13].

3.3. Generación del modelo conceptual del sitio

Un estudio de caracterización de suelos contaminados exige la generación del modelo conceptual del medio físico mediante el cual se pueda entender el mecanismo de dispersión del contaminante a partir del punto de fuga. En conjunto con los resultados de los análisis químicos realizados a las muestras de suelo se puede establecer el mecanismo de transporte y la estimación del depósito final del contaminante, evaluando la interacción entre distintos estratos y la posibilidad de que la contaminación haya generado lixiviados que hayan llegado a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

Así mismo, es importante definir ecuaciones de transporte con las cuales se pueda predecir el tiempo en el cual un contaminante alcance determinada longitud [14], 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 [15], 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 [16].

Se parte de la generación de perfiles estratigráficos en función de la información obtenida durante los trabajos de sondeo de caracterización física e incluso de pozos específicos realizados para la toma de muestras de suelo (Figura 2). Para esta condición, el responsable de la construcción del modelo conceptual ya habrá realizado la investigación de información disponible para el sitio del derrame (cartas temáticas, antecedentes históricos, etc.).

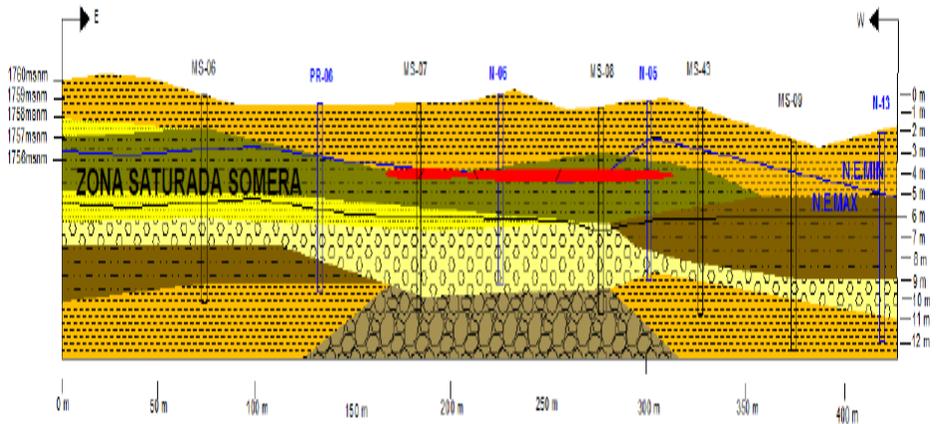


Figura 2. Estratigrafía del sitio y generación del modelo conceptual.

Si la magnitud del área afectada, los daños en la superficie (flora y fauna), contaminación de cuerpos de agua o consecuencias sociales son evidentes e incluso pueden intensificarse en un lapso corto; se justifica técnicamente la necesidad de utilizar métodos geofísicos para una generación del modelo conceptual más extensa y detallada. Los sondeos eléctricos verticales (SEV), son ampliamente utilizados para estos fines, ya que su versatilidad y relativa facilidad de interpretación de resultados en campo permiten tomar decisiones inmediatas que permiten en su caso, reenfocar los esfuerzos de caracterización, localización y número de muestreos con relación al área y profundidad requerida de los estudios.

El modelo conceptual desarrollado en el estudio de caracterización puede ser sometido a la aplicación de ecuaciones de cálculo de dispersión de contaminantes incluidas en un software de modelación numérica diseñado para estos casos. Si bien estas aplicaciones representan una ventaja para el seguimiento de pasivos ambientales y la evaluación de efectividad de las medidas de remediación, su éxito depende de la calidad de la información con la cual haya sido alimentada su base de datos.

3.4. Consideraciones en la remediación de sitios contaminados

La caracterización física, química y biológica del suelo es fundamental para conocer si la atenuación natural y biorremediación son viables como técnicas de saneamiento, pues es parte de la perspectiva microbiológica y el esencial conocimiento de su hábitat natural de las poblaciones microbianas degradadoras de hidrocarburos [17]. Las propiedades del suelo más importantes para definir la estrategia de biorremediación son: textura, materia

orgánica, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico y estado nutrimental del suelo [18].

Independientemente de la técnica de remediación del sitio que el estudio de caracterización recomiende para cada evento en particular, se requiere realizar un seguimiento del avance de la efectividad del procedimiento mediante el cual se puedan emitir recomendaciones para su adecuación, cambio de enfoque y suspensión del mismo una vez que se haya logrado mitigar la contaminación. Bajo esta situación, los criterios geotécnicos establecidos anteriormente se seguirán repitiendo y enfocando a cada situación, dependiendo si las labores de remediación se han realizado por métodos *in situ* o *ex situ*. En el caso de celdas de tratamiento, la geotecnia interviene nuevamente para los trabajos de disposición del suelo en el sitio de origen, cumpliendo parámetros definidos de compactación, humedad y grado saturación permisible.

4. Reflexión y conclusiones

Las actividades de caracterización de suelos contaminados requieren la colaboración de diversas especialidades, enriqueciendo los criterios del personal técnico involucrado, evaluando diversas perspectivas del mismo problema. La naturaleza tiende a mostrar de diversas formas no solo las afectaciones, sino las soluciones mismas a problemas de la ingeniería, el caso de la contaminación de suelos no es la excepción. La identificación en campo de las barreras naturales existentes, los medios de dispersión en las fases que compone el medio físico, las trayectorias preferenciales de desarrollo del bulbo contaminante, e incluso las medidas de mitigación; permiten que se establezca un juicio acertado para la toma de decisiones en las labores de generación del modelo conceptual, que será la base para la determinación del impacto de la contaminación y las medidas inmediatas y futuras para la atención de la emergencia o del pasivo ambiental.

La aplicación de métodos geotécnicos de muestreo de suelos permite que las interpretaciones ambientales sobre la contaminación de hidrocarburos se fortalezcan mediante el entendimiento de la interacción de las condiciones ambientales existentes y la integración del material contaminante en una matriz de análisis. De esta forma se emiten recomendaciones sobre el seguimiento de la restauración del sitio. Bajo estos términos, las aplicaciones geotécnicas de los estudios de caracterización de suelos contaminados expresan los pasos a seguir durante la etapa de remediación y liberación del sitio.

Los parámetros físicos, químicos y mecánicos obtenidos en los análisis de las muestras de suelo durante la etapa de caracterización pueden adoptarse para el desarrollo de las campañas de restauración, tales como el diseño de las redes de bioventeo in situ o en celdas de tratamiento, permeabilidad de los estratos en métodos de lavado de suelos, porosidad específica para métodos de extracción de gases y con un toque agrónomo, las disposiciones generales para procesos de landfarming.

Tal como sucede en los estudios para obras civiles, desde el momento en que se evalúa el medio físico y se establece el resultado de una caracterización del suelo contaminado por hidrocarburos y las recomendaciones para su remediación, la eficacia dependerá de la calidad e intensidad del muestreo desarrollado para el conocimiento de las propiedades físicas, mecánicas y químicas previas y posteriores del derrame. El sentido de la observación general y a detalle de cada una de las variables es requerido, apostando por la sensibilidad del especialista hacia la geotecnia ambiental.

Referencias

- [1] Verma, S; R Bhargava & V Pruthi. 2006. Oily sludge degradation by bacteria from Ankleshwar, India. *Internat. Biodet. Biodeg.* 57: 207-213.
- [2] Plohl K, and Leskovsek H. (2002). Biological degradation of motor oil in water. *Acta Chim. Slov.*, 49, 279-289.
- [3] Gong Z., Li Peijun., B.M. Wilke., Kassem 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.
- [4] Infante, C. 1998. Biorremediación de derrames de hidrocarburos en ambientes naturales. *Memorias del IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. Caracas, Venezuela, diciembre de 1997, colección simposio, volumen II. P 325- 328.* Compilador Roger Carrillo Castellanos. Editorial Equinoccio, Ediciones de la universidad Simón Bolívar, Caracas.
- [5] 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.
- [6] U.S. Army Science Board. (1995). Infrastructure and Environmental Issue Group, Remediation of Contaminated Army Sites: Utility of Natural Attenuation. Draft Report, Department of the Army, Washington, D.C.
- [7] Ortíz Brito, Oscar, Ize, Irina, Gavilán, Arturo, La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. *Gaceta Ecológica*, 2003, (octubre-diciembre).
- [8] Flores-Puente M.A., Torres-Ortiz S y Téllez Gutierrez R. (2004). Medidas de mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre. *Publicación Técnica No. 257.* Instituto Mexicano del Transporte. México.
- [9] Iturbe-Argüelles, R. (1991). Transporte de contaminantes a través del suelo. *Simposio Geotecnia y Medio Ambiente. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.* México.
- [10] Álvarez-Manilla Aceves A., Valadéz Castro J.P., Garnica-Anguas P. y Martínez Peña G.E. (2002). La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. *Aplicación en la infraestructura del transporte.* Publicación Técnica No. 195, Instituto Mexicano del Transporte, México.
- [11] NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.
- [12] Torres-García y Pérez-Rea, Recomendaciones Geotécnicas en la planeación de muestreos ambientales de sitios contaminados por hidrocarburos, XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 2010.
- [13] Aracil Ávila, E., Maruri Brouard, U., Vallés Iriso, J., Martínez-Pagán, P., Porres Benito, J.A. Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica. *Ingeopres.* Madrid: Entorno Gráfico, 2003, vol. 122, p. 34-39. ISSN: 1136-4785.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Corona-Ramírez, L., & Iturbe-Argüelles, R. (2005). Atenuación natural en suelos contaminados con hidrocarburos. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 6(2), 119-126.
- [18] Braddock, J. F., M. L. Ruth, P. H. Catterall, J. L. Walworth y K. A. McCarthy. 1997. Enhancement and inhibition of microbial activity in hydrocarbon-contaminated arctic soils: implications for nutrient-amended bioremediation. *Environ. Sci. Technol.* 31: 2078-2084.