



Análisis de riesgo a la salud de una instalación petrolera del Suroeste de México

R. Iturbe-Argüelles, R.Ma. Flores-Serrano y L.G. Torres-Bustillos
Instituto de Ingeniería, UNAM. Coordinación de Ingeniería Ambiental. Grupo Saneamiento de Suelos y Acuíferos.
E-mail: ria@pumas.iingen.unam.mx

(recibido: abril de 2005; aceptado: septiembre de 2005)

Resumen

En la Terminal de Almacenamiento y Distribución de combustibles (TAD), tales como el diesel y la gasolina, localizada al Suroeste de México, se detectó contaminación por hidrocarburos a raíz de una auditoría ambiental, por lo que se solicitó un estudio completo de la contaminación en la TAD. A partir de los resultados de este trabajo, se puede decir que el suelo de la TAD se encuentra contaminado por hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en concentraciones de ND a 59,000 mg/kg. No se detectó la presencia de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), metil terbutil éter (MTBE) ni metil-teramil éter (MTE). De los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) analizados, sólo se encontró la presencia de naftaleno en un punto, a una concentración por debajo de 1 mg/kg. Se identificó la presencia de Fe, Pb y Zn en el suelo, pero los índices de geo-acumulación calculados sugieren que se trata de concentraciones naturales del suelo y no de contaminación alguna. Se encontraron HTP en las aguas subterráneas, solo en uno de los 6 pozos por arriba del nivel recomendado de 10 mg/l. También se encontró que el Fe excede el valor sugerido de 0.3 mg/l en 5 de los 6 pozos estudiados. Se encontró que el pH de las aguas subterráneas no está relacionado con el nivel de metales encontrados (Fe y Zn), pero sí con el contenido de HTP. El análisis de riesgo a la salud indicó que las concentraciones de naftaleno y zinc, presentes en el suelo y agua subterránea, no representan un riesgo para la salud de los habitantes de las colonias aledañas ni para los trabajadores de la TAD. Sin embargo, dados los altos niveles de concentración de HTP al norte de la TAD, se recomendó el saneamiento de un volumen de aproximadamente 8,000 m³ mediante el proceso de biopilas.

Descriptores: Agua subterránea, contaminación de suelos, hidrocarburos, riesgo a la salud, técnicas de saneamiento de suelos.

Abstract

During an Environmental Audit in an oil storage and distribution station (TAD) located at South-west Mexico, hydrocarbon contamination was detected. Because of it, a complete study of the site's contamination was required. From this work's results, it can be stated that TAD sub soil is contaminated by total petroleum hydrocarbons (TPH), in concentrations from ND to 59,000 mg/kg. Neither benzene, toluene, ethylbenzene or xylenes (BTEX), nor methyl tert-butyl ether (MTBE), nor methyl tert-amyl ether (MTE) were detected. From the 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) analyzed, only naphthalene was found in one sample point at a concentration below 1 mg/kg. The presence of Fe, Pb, and Zn was identified in the sub soil, but the calculated geo-accumulation indexes suggest a natural concentrations and not a contamination's product. TPH were found in groundwaters, but only in one of the six sampled wells over the recommended level of 10 mg/l. It was also found that Fe concentrations exceed the suggested value of 0.3 mg/l in five of the six sampled wells. It was determined that groundwater's pH value is not linked to the

metals concentration level, but with the TPH concentration. Health risk assessment indicated that naphthalene, and zinc concentrations, present in water and sub soil, do not represent a health risk neither for the neighbourhood inhabitants, nor for the TAD workers. Nevertheless, given the high TPH concentrations in the TAD's north side, the remediation of 8,000 m³ of sub soil by means of a biopiles system was recommended.

Keywords: Groundwater, health risk, hydrocarbons, soil contamination, soil remediation techniques.

Introducción

Contaminación de suelos con hidrocarburos de petróleo

La operación de sitios de exploración, producción, refinación y almacenamiento de crudo, frecuentemente trae como consecuencia derrames de hidrocarburos que tienen como destino final suelos y cuerpos de agua. Para el año 2001, PEMEX reportó la cantidad de 1,500 derrames de hidrocarburos, por un total de aproximadamente 6,250 toneladas de crudo (PEMEX 2001). Estas cifras abarcan solamente las operaciones de exploración, producción y refinación. Las estaciones de almacenamiento y distribución, también están sujetas a derrames de crudo y combustibles, aunque no se tengan reportes suficientes al respecto.

En el ámbito internacional, se han reportado trabajos relacionados con la caracterización de suelo y aguas subterráneas en sitios relacionados con la industria del petróleo, así como estudios de riesgo a la salud de los mismos. Adenyi y Afolabi (2002), reportaron las concentraciones de hidrocarburos y metales pesados en áreas de gasolineras, talleres mecánicos y sitios de almacenamiento de productos derivados del petróleo, en comparación con los contenidos de dos suelos de referencia no expuestos a la contaminación. Por otro lado, Ekundayo y Obuekwe (1997), caracterizaron una zona de Nigeria, donde derrames continuos de hidrocarburos han contaminado el suelo de la región. Shriadah (1999), describió la contaminación de los suelos de una zona de los Emiratos Unidos Árabes, debido al paso de autotanques que transportan crudo en la región. En los Estados Unidos, Sharma *et al.* (2002), han reportado la contaminación de la Costa del Sur de Texas por derrames de hidrocarburos. Bakker *et al.* (2000), identificaron y

caracterizaron hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos cercanos a una refinería de petróleo en Zelzate, Bélgica. Chen *et al.* (2000), reportaron un modelo multifase y multi-componentes que permite el estudio de riesgo en zonas contaminadas con petróleo y sus derivados.

En México, Gutiérrez y Zavala (2001) y Adams *et al.* (1999), entre otros, han caracterizado suelos de zonas petroleras de Tabasco, cubriendo aspectos como los rasgos hidromórficos de los suelos contaminados y el potencial de biorremediación que tienen dichos suelos. Además de estos autores, Lesser y Saval (2000), han reportado la caracterización de la contaminación con hidrocarburos en suelos arcillosos en una estación de almacenamiento y distribución de combustibles de México. Por otra parte, Iturbe y colaboradores reportaron estudios de caracterización de las terminales de almacenamiento y distribución de Puebla, Puebla (Iturbe *et al.*, 1999), Zacatecas, Zacatecas (Iturbe *et al.*, 2003a) y Morelia, Michoacán (Iturbe *et al.*, 2003b).

La Terminal de Almacenamiento y Distribución (TAD) está localizada al Suroeste de México. Después de una auditoría ambiental llevada a cabo en la antigua TAD, surgió la necesidad de llevar a cabo un estudio orientado a la caracterización del suelo y agua subterránea en el área de la instalación. Una de las principales deficiencias establecidas en la auditoría ambiental se refiere a la presencia de hidrocarburos al poniente de la instalación, debida a un derrame de combustible en el pasado. También se estableció la presencia de hidrocarburos cerca de la fosa de aceites, al Noreste de la TAD. De esta forma, los objetivos principales de este trabajo son:

- a) Evaluar los niveles de contaminación del suelo y agua subterránea de la antigua TAD,

- b) Elaborar un estudio de riesgo a la salud y establecer los niveles de limpieza requeridos, así como
- c) Proponer opciones de saneamiento.

Caracterización del sitio

La TAD se ubica al Suroeste de México. El clima de la zona corresponde a un clima cálido y sub-húmedo. Debido a sus condiciones de temperatura se define como cálido, ya que presenta una temperatura media anual sobre los 22°C y la temperatura media del mes más frío está sobre 18°C. La precipitación pluvial promedio de los últimos 20 años es de 1,403 mm. La humedad relativa varía entre el 76 y 80%. El municipio pertenece a la región hidrológica RH-19 que forma parte de las cuencas del río Atoyac. El coeficiente de escurrimiento de la zona es de 10%.

El material granular que corresponde a esta región es de arena con grano grueso, medianamente consolidado, con alta permeabilidad. El material consolidado con bajas posibilidades de funcionar como acuífero, está formado por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas sedimentarias tales como lutitas, calizas y areniscas se clasificaron como de baja permeabilidad por el contenido de material arcilloso y escaso fracturamiento.

Las rocas metamórficas por su génesis y fracturamiento poco profundo y escaso se consideran como malas conductoras y almacenadoras de agua. La corriente subterránea presenta una dirección hacia el Océano Pacífico. El nivel freático de la zona de la terminal se encuentra entre los 4 y 6 m de profundidad. Es importante mencionar que la terminal está construida junto a un cerro. Los tanques de almacenamiento se encuentran instalados en la parte más alta, mientras que la zona contaminada es la más baja del sitio.

Materiales y métodos

Muestreo de agua y suelo

Las muestras de suelo se tomaron en 22 puntos distribuidos en la TAD, incluyendo estaciona-

mientos, área de tanques de almacenamiento, zona de llenaderas y oficinas varias. Las muestras fueron tomadas entre la superficie y 3.5 m de profundidad. Se empleó un equipo de perforación neumático. El equipo cuenta con un motor de 12 HP y velocidad variable con una presión de trabajo de 2,000 libras por pulgada cuadrada. Los parámetros evaluados en las muestras de suelos fueron hidrocarburos totales del petróleo, perfil de hidrocarburos que incluye las fracciones de diesel, gasolina, MTBE y MTE y a los BTEX. Adicionalmente, se analizaron los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos normados por USEPA: acenafteno, fenantreno, fluoranteno, fluoreno, antraceno, indeno(1,2,3c,d)pireno, acenaftileno, naftaleno, pireno, benzo (a) antraceno, benzo (a) pireno, benzo (a) fluoranteno, benzo (g,h,i) perileno, benzo (k) fluoranteno, criseno y dibenzo (a,h) antraceno. En las mismas muestras también se analizaron cuatro metales pesados: Fe, Cr, Pb y Zn. El agua se muestreó en 6 pozos de monitoreo (20 m de profundidad) ya existentes. Los parámetros analizados en el agua fueron pH, HTP, Pb, Fe, Cr, Zn, y explosividad de los vapores. La explosividad de las muestras en ambas matrices fue medida con un equipo COSMOS XP-311 ALPHA A (New Cosmos Electric Co. Ltd, Japón).

Técnicas analíticas

Las muestras de suelo fueron caracterizadas de acuerdo a las técnicas analíticas propuestas por USEPA: EPA418.1 para los TPHs, EPA6010 para los metales pesados, y la EPA8240 para las fracciones de hidrocarburos. Los HAPs fueron analizados con el método EPA8100. Para las aguas se emplearon los siguientes métodos: EPA6010 para metales pesados y EPA418.1 para los HTP.

Análisis de riesgo a la salud

Para conocer el nivel de riesgo de la población en contacto con el suelo y el agua subterránea de las zonas aledañas a la TAD, así como de los trabajadores de la misma, a través de diferentes vías de exposición (contacto dérmico, inhalación de vapores o polvos, ingestión de suelo o agua subterránea contaminados por hidrocarburos), se requiere aplicar una evaluación de riesgo a la salud. La evaluación o análisis de riesgo a la salud

se define como la caracterización de los efectos potenciales adversos a la salud humana, debidos a las exposiciones humanas a peligros ambientales (NRC, 1983). Esta caracterización se traduce en un estimado numérico de riesgo (Crane y Tuchman, 1993).

El producto final de una evaluación de este tipo, es un número adimensional que indica la probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer o sufra efectos no carcinógenos durante su vida media. Para compuestos carcinógenos se ha establecido como riesgo aceptable un valor de 1×10^{-6} (probabilidad de que un individuo en un millón desarrolle cáncer).

El análisis de riesgo a la salud (ARS) fue llevado a cabo con ayuda del programa comercial RBCA Tool Kit for Chemical Releases (GSI, 1998). No se incluyeron las concentraciones de HTP ni las mezclas de hidrocarburos (diesel, gasolina, etc.), ya que sólo los compuestos individuales pueden ser tomados en cuenta. Se definieron dos tipos de receptores: receptores *on-site* (aquellos que se encuentran dentro de la fuente de contaminación) y receptores *off-site* (aquellos que se encuentran fuera de la fuente de contaminación).

Los receptores *on-site* son los trabajadores de la TAD y los *off-site* son la gente que vive en los alrededores. Los receptores *on-site* se evaluaron con uso comercial de suelos, considerando también las actividades de construcción. Los trabajadores *off-site*, fueron evaluados como usuarios de suelo residencial.

De acuerdo con la ASTM (1996), el riesgo individual considerado como aceptable para cada compuesto químico dentro del área de estudio fue 1×10^{-6} para las clases A y B de los compuestos carcinogénicos y de 1×10^{-5} para los carcinogénicos clase C. El riesgo total acumulado considerado como aceptable es 1×10^{-5} . Para los compuestos no carcinogénicos (clases D y E), al cociente de peligrosidad (HQ) y al índice de peligrosidad (HI) se les asignó un valor de 1.0. Cuando se aplicó el modelo, no se consideró degradación, ya que los receptores *off-site* se encuentran tan cerca de la fuente de contaminación que era necesario hacer más restrictivo el cálculo.

Resultados y discusión

Suelo

Identificación de posibles fuentes emisoras de hidrocarburos

En la zona Noroeste, al levantar la capa superficial de suelo se observó presencia de contaminación. Se encontró un fuerte olor a gasolina. En la fosa de separación, el agua presenta una gruesa capa de hidrocarburos (puntos 1, 2, 3 y 4). Al lado del almacén hay una zanja de aproximadamente 0.6 m de profundidad, en donde se aprecia un horizonte contaminado con hidrocarburos de aproximadamente 0.3 m de la superficie del suelo con 0.05 m de espesor.

En la zona Norte se observaron pequeñas fugas en varias mangueras. Al perforar para obtener las muestras de suelo se percibió un fuerte olor a hidrocarburo (puntos 14, 15, 16 y 17). En la zona Noreste se ubica la fosa de decantación con agua de lluvia en su interior. La fosa está recubierta pero se observan algunas fracturas. Al costado Oriente se encuentra un almacenamiento de chatarra colocado sobre concreto y terreno natural y al costado Poniente se encuentra un almacén de llantas usadas (puntos 9, 10 y 11).

En la zona Oriente se encuentra el área de tanques de almacenamiento. En general, es una zona que se aprecia en buen estado, sin manchas superficiales. Con respecto a las zonas Sur y Suroeste, durante el muestreo de suelo se encontraban en remodelación. Se observaron algunas manchas superficiales en la zona, al Norte del estacionamiento de pipas (puntos de muestreo 18, 19, 20 y 21).

Distribución de las fracciones orgánicas (HTP, diesel, gasolina e HAP) y niveles de explosividad

En la tabla 1 se resumen los valores de HTP, diesel, gasolina e HAP (naftaleno) encontrados en el suelo de la TAD. El resto de los compuestos orgánicos evaluados, no estuvieron presentes en los suelos. Como se puede observar, los HTP se encontraron en concentraciones de ND a 59,213 mg/kg, con un

promedio de 3,954 +/-13,241 mg/kg. La mediana de estos valores fue 14.5 mg/kg. En la figura 1 se muestra la distribución espacial de estos valores. Aquí, el punto de mayor concentración de HTP fue el punto 1 localizado a un costado de las oficinas de la antigua TAD, donde se reportó un derrame accidental de combustible en años pasados. La concentración de HTP va disminuyendo gradualmente, pero cubre las áreas aledañas al laboratorio, estacionamiento exterior, estacionamiento de pipas y una fracción de la zona de llenaderas. Otras áreas con una importante concentración de HTP son los puntos 2, 4, 15 y 16. En

el resto de las instalaciones, la concentración es menor a los 150 mg/kg. Solamente se detectaron fracciones específicas de los HTP en algunos puntos. En los puntos 2,4 y 15 se detectó diesel en concentraciones de hasta 5,272 mg/kg. En promedio, se detectó 437 +/-1,277 mg/kg de este contaminante. Sólo en el punto 16 se encontró la fracción gasolina, en una concentración de 43.8 mg/kg. En cuanto a los HAP, sólo se encontró naftaleno (0.99 mg/kg) en el punto 16, precisamente. No es de extrañar esta coincidencia, pues el naftaleno es un componente presente en las gasolinas mexicanas (Torres *et al.*, 2002).

Tabla 1. Concentraciones de metales, HTP y otros hidrocarburos encontrados en el suelo de la TAD. Todas en mg/kg. Excepto cuando se indica

Punto	HTP	Diesel	Gasolina	Naftaleno	Pb	Fe	Zn	Explosividad (%)
1	59,213	ND	ND	ND	10.45	6,262	26	100
2	4,207	1,020	ND	ND	46.95	20,930	80.7	5
3	ND	ND	ND	ND	9.4	6,346	25.8	100
4	10,003	2,443	ND	ND	ND	4,899	24.3	100
5	29	ND	ND	ND	ND	6,162	21.4	5
6	ND	ND	ND	ND	18	12,430	37.1	70
6b	ND	ND	ND	ND	11	8,084	26.5	ND
7	ND	ND	ND	ND	9.3	7,883	25	ND
9	ND	ND	ND	ND	9.2	7,484	24	ND
10	104	ND	ND	ND	8.3	6,504	20	ND
11	ND	ND	ND	ND	10.8	10,010	33	ND
12	33	ND	ND	ND	25	13,820	32	ND
14	ND	ND	ND	ND	ND	4,885	18.5	30
15	4,394	5,272	ND	ND	13.7	8,396	28	ND
16	988	ND	43.8	0.99	37.8	12,680	40	ND
17	ND	ND	ND	ND	15.6	8,825	29.7	ND
18	64	ND	ND	ND	14.5	13,690	31.5	ND
19	ND	ND	ND	ND	13.6	10,620	30.9	ND
20	ND	ND	ND	ND	ND	6,396	21.7	ND
21	48	ND	ND	ND	ND	5,277	21.3	ND
Min	ND	ND	ND	ND	ND	4,885	18.5	ND
Max	59,213	5,272	43.8	0.99	46.95	20,930	80.70	100

continúa...

Tabla 1. Concentraciones de metales, HTP y otros hidrocarburos encontrados en el suelo de la TAD.
Todas en mg/kg. Excepto cuando se indica (...continuación)

Punto	HTP	Diesel	Gasolina	Naftaleno	Pb	Fe	Zn	Explosividad (%)
Prom	3,954	436.75	43.8	0.99	12.68	9,079	30.12	20.5
Desv estándar	13,241	1,277	-	-	12.29	4.002	13.32	38.0
Niveles permitidos	2,000	-	-	100	400	25,000	2,500	-

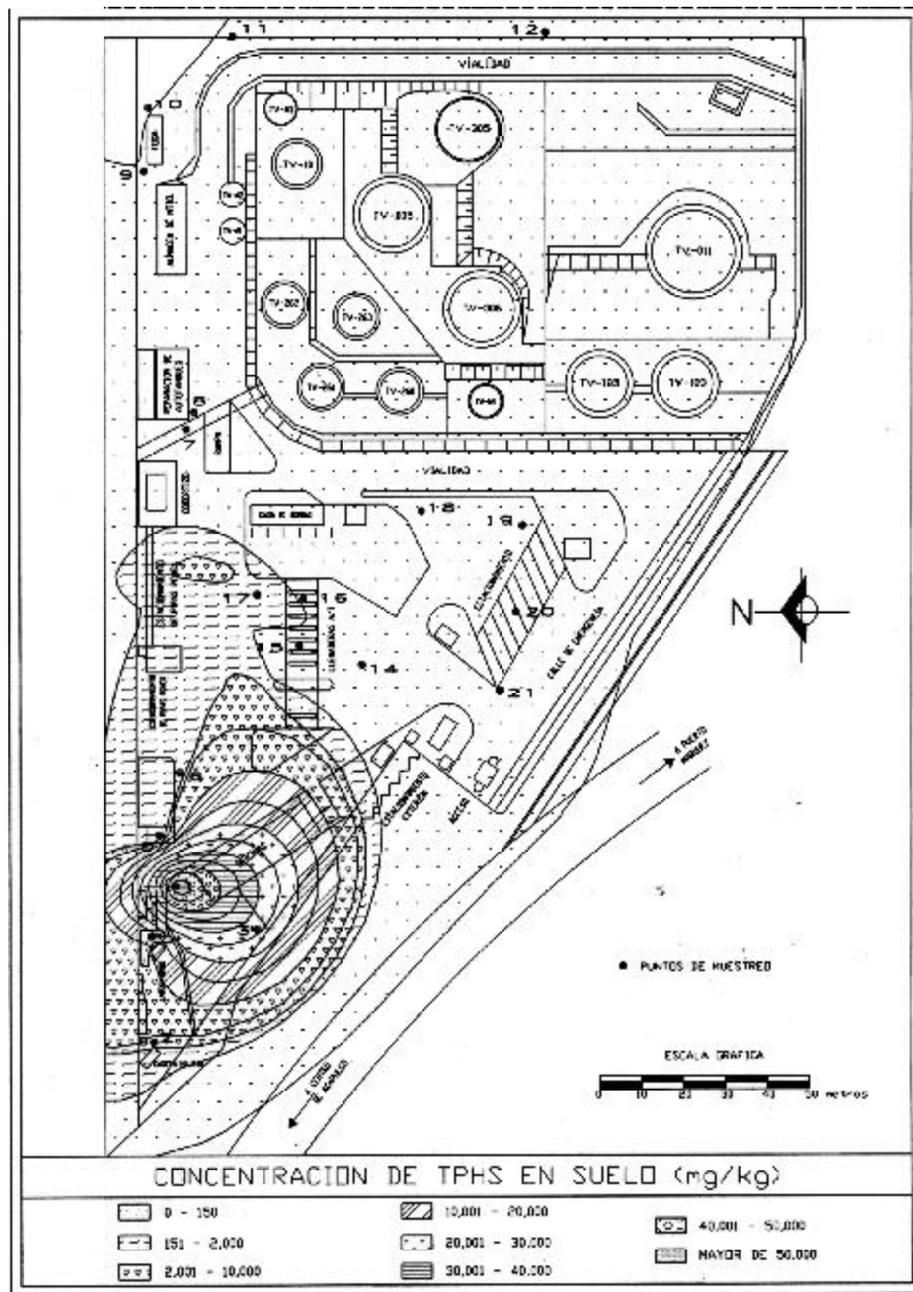


Figura 1. Distribución de HTP en la TAD

Los Criterios Interinos para la Remediación de Suelos (CIRS), emitidos por la PFFA (1998), sugieren un valor de 2,000 mg/kg, como HTP para suelos de tipo industrial, por lo que se puede decir que algunos puntos de la TAD se encuentran por encima de este valor. En cuanto al diesel y la gasolina, los mismos criterios establecen valores de 2,000 y 500 mg/kg, respectivamente. Algunos valores de concentración de diesel en la TAD exceden esta recomendación.

Los valores de explosividad detectados en el suelo de la TAD se presentan en la tabla 1. Dichos valores estuvieron en el intervalo de ND a 100%. Particularmente, los puntos 1,3 y 4 presentaron valores del 100%, lo que coincide con los valores altos de HTP localizados en dos de los puntos (1 y 4). Los puntos 6 y 14 presentaron valores de explosividad de 30 y 60%, respectivamente. Los puntos 2 y 5 presentaron valores del 5% y en el resto de los puntos no se detectó explosividad. Como puede verse, existe correlación entre la explosividad medida y el valor de HTP medidos en el suelo. Esta técnica permite hacer una estimación rápida de las zonas donde presumiblemente existe contaminación por hidrocarburos.

Distribución de metales pesados

En cuanto a los niveles de metales pesados encontrados en el suelo de la TAD se puede decir lo siguiente: No se encontró cromo en ninguna de las muestras analizadas. El Fe se encontró en concentraciones de 4,885 a 20,930 mg/kg, con un promedio de 9,079+/-4,000 mg/kg. El Zn fue encontrado en concentraciones de entre 18.5 y 80.7 mg/kg (con un promedio de 30.1+/-13.3 mg/kg). Finalmente, el Pb se encontró en concentraciones de entre ND y 46.9 mg/kg, con un promedio de 12.7+/-12.3 mg/kg. En las figuras 2a, 2b y 2c se presenta la distribución espacial de estos tres metales pesados en los suelos de la refinería. Los valores reportados en los CIRS (PFFA, 1998) para el Zn y Pb en suelos industriales son de 1,500 y 1,500 mg/kg, respectivamente. Los valores límite reportados por Buonicore (1996) para Fe, Zn y Pb son de 25,000, 2,500 y 400 mg/kg, respectivamente. Si se comparan los datos de la TAD con los valores para Fe, Zn y Pb reportados por Buonicore, todos los valores se encuentran dentro de los límites sugeridos.

Muller (1969), sugirió un parámetro para la evaluación de la contaminación por metales en suelos y sedimentos, llamado índice de geoacumulación (Igeo) y definido como:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / 1.5 \times C_b) \quad (1)$$

Donde C_n es la concentración presente en el suelo o sedimento presumiblemente contaminado y C_b es el valor de la concentración de metal en el suelo basal (no contaminado). El factor de 1.5 da un margen de cambio del 50%.

De los datos de la antigua TAD, se seleccionaron aquellos puntos en donde no se reportaron HTP y este grupo se consideró como el suelo no contaminado. En la tabla 2 se presentan dichos puntos, los valores de concentración promedio y los mínimos y máximos encontrados.

Al aplicar los promedios de los valores de concentración encontrados en la TAD (C_n) y los promedios del suelo no contaminado (C_b) se calcularon los valores de I_{geo} para cada metal. Como puede observarse, los valores encontrados para el plomo, hierro y zinc fueron de -0.3492, -0.5193 y -0.4894, respectivamente. Estos valores con signo negativo indican no-acumulación.

Tabla 2. Contenido de metales pesados en suelos no contaminados

Punto	Pb (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)
3	9.4	6,346	25.8
6	18.0	12,430	37.1
6b	11.0	8,084	26.5
7	9.3	7,883	25.0
9	9.2	7,484	24.0
11	10.8	10,010	33.0
17	15.6	8,825	29.7
19	136	10,620	30.9
Min	9.2	6,346	24.0
Max	18.0	12,430	37.1
Promedio	12.11	8,960	29.0
Desv est	3.29	1,958	4.52
Igeo	-0.3494	-0.5193	-0.4898

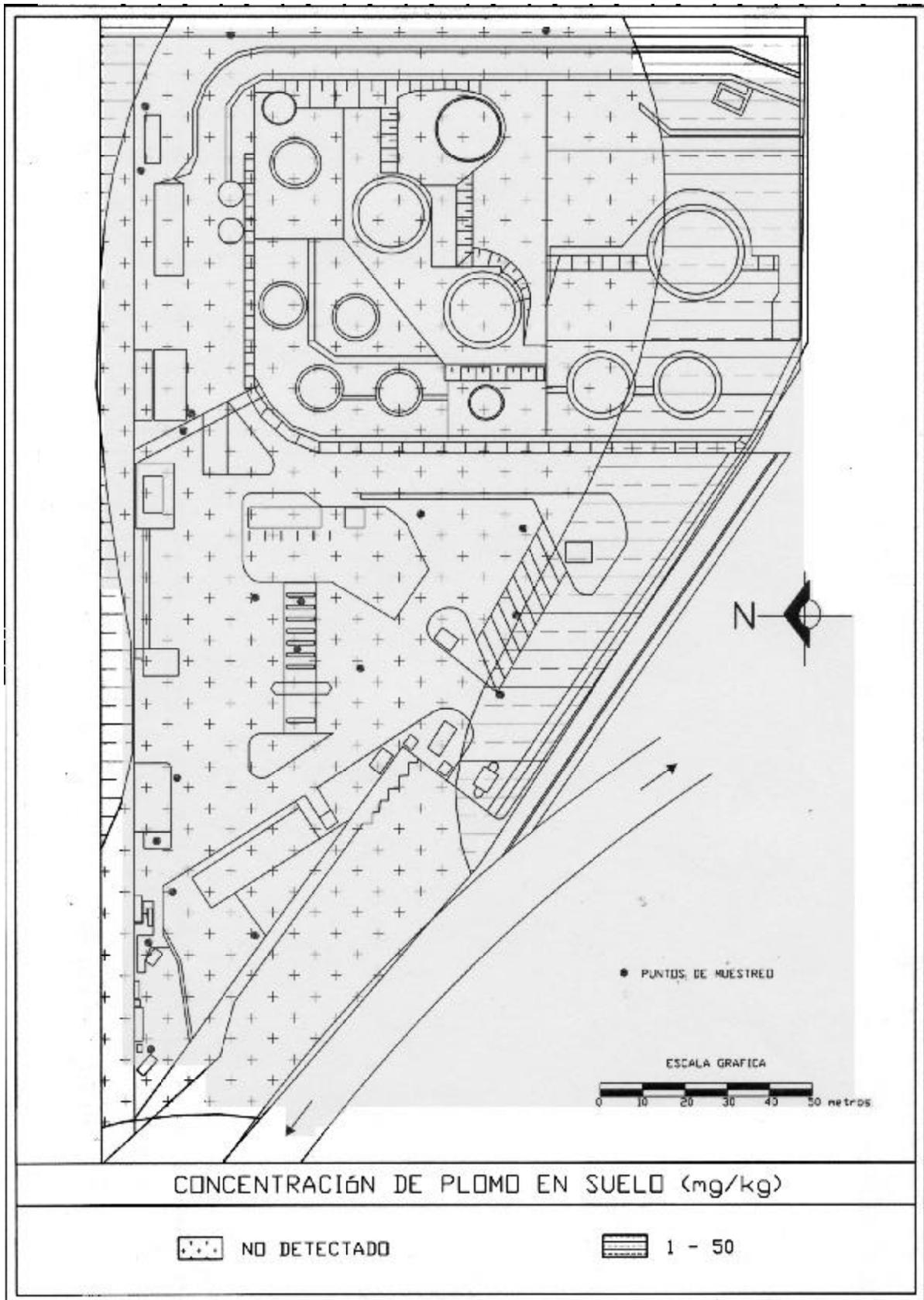


Figura 2b. Distribución de plomo en la antigua TAD

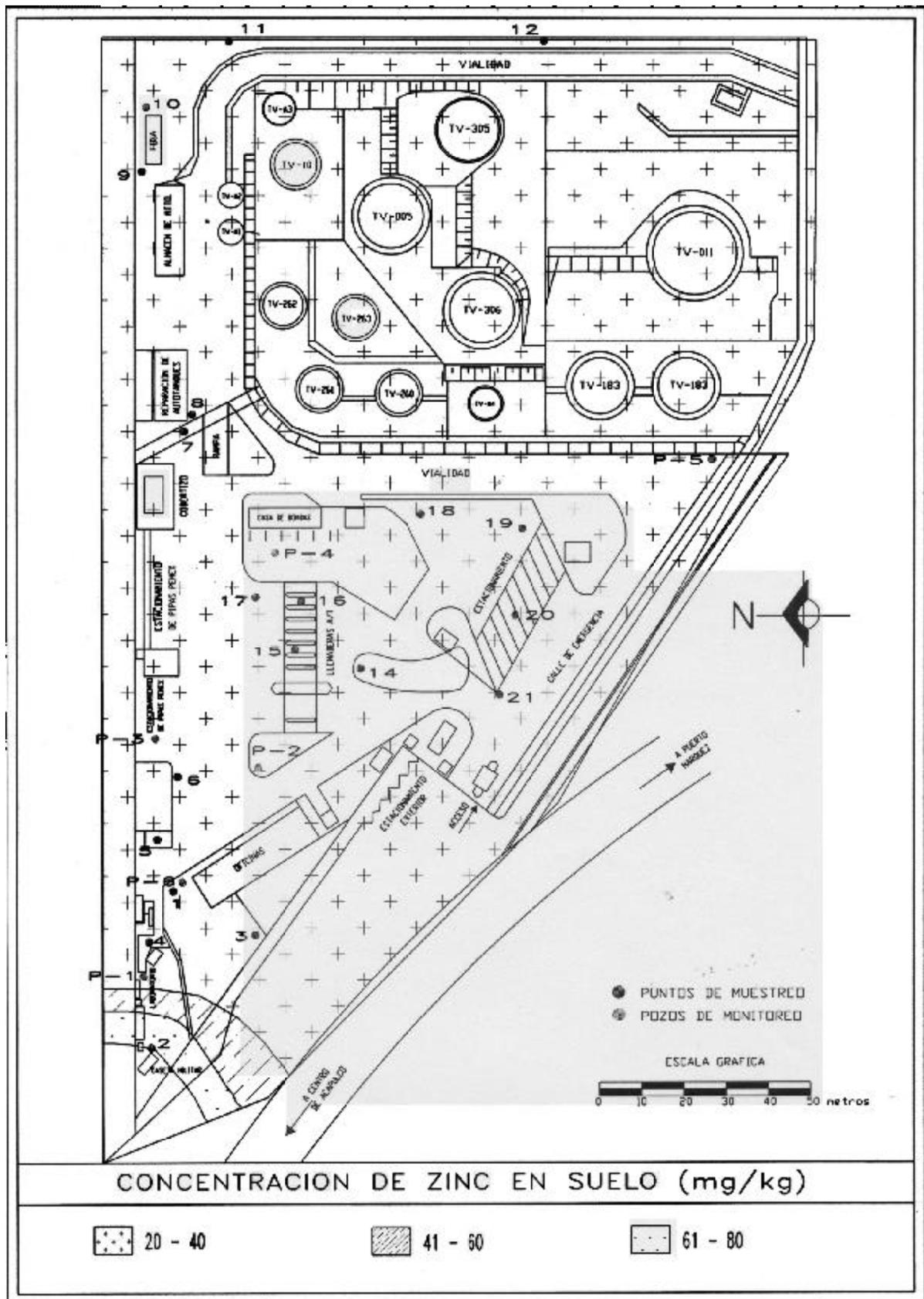


Figura 2c. Distribución de zinc en la antigua TAD

Agua subterránea

En la tabla 3 se presentan las concentraciones de HTP, Fe y Zn en los 6 pozos distribuidos en la TAD. También se presenta el nivel de agua encontrado en cada pozo y su valor de pH (medición de campo). En el punto 3, casi no había agua, pero sí fue posible tomar muestra para realizar los análisis correspondientes. Como se observa, el promedio de nivel en los pozos fue de 2.7 +/-1.4 m, aunque el pozo 5 presentó una profundidad de 4.3 m. El intervalo de pH medido en campo es de 5.9 a 6.5, por lo que se considera a las aguas subterráneas como ligeramente ácidas. Con respecto a los HTP, el intervalo va de 0.3 mg/l (punto 4) a 21.2 mg/l (punto 5). El promedio observado fue de 5.3 +/-8.4 mg/l. De acuerdo con Buonicore (1996), la concentración máxima permisible de HTP en aguas subterráneas varía entre 1 y 10 mg/l, por lo que se puede decir que las aguas subterráneas de la TAD se encuentran dentro del intervalo permitido. No se detectó la presencia de Cr en las aguas subterráneas, pero sí de Fe y Zn. El hierro fue encontrado en concentraciones de 0.19 a 6.37 mg/l (con un promedio de 3.2 +/-3.4 mg/l), mientras que el zinc, en un intervalo de 0.03 a 0.11 (con un promedio de 0.07 +/-0.04 mg/l).

Con el fin de encontrar relaciones existentes entre los parámetros antes descritos, se hicieron correlaciones lineales entre ellos y se calcularon los

valores de r^2 . En cuanto al pH de las aguas subterráneas, se encontró que éste no se relaciona con el nivel de metales encontrados (Fe y Zn), pero sí con el contenido de HTP ($r^2 = 0.9176$). Este hecho sugeriría que entre más ácidas son las aguas subterráneas son capaces de disolver mayor cantidad de compuestos presentes en los hidrocarburos depositados en los suelos. Por otro lado, los valores de Fe y Zn no correlacionaron con el contenido de HTP en las aguas ($r^2 = 0.1452$ y 0.1984 , para Fe y Zn, respectivamente), lo que puede indicar que el origen de los metales no está relacionado con los derrames de hidrocarburos en el suelo de la antigua TAD. Este hecho confirma lo encontrado al tratar de correlacionar el contenido de metales y el valor de HTP presentes en el suelo. Es interesante agregar, que el valor de Fe y Zn en las aguas, tampoco correlacionó ($r^2 = 0.4058$), lo que indicaría que los dos metales provienen de diferentes fuentes. Por último, se encontró que el nivel de agua encontrado en los pozos no correlacionó con el pH, los TPHs, ni el contenido de Zn de las aguas ($r^2 = 0.3843$, 0.1874 y 0.680 , respectivamente), pero sí con el contenido del Fe ($r^2 = 0.8997$), lo que sugeriría que el origen del hierro en el agua es el lavado del propio subsuelo de la antigua TAD.

Análisis de riesgo a la salud

En la tabla 4, se muestran los riesgos correspondientes por contaminante y por ruta de

Tabla 3. Niveles de contaminación del agua en la TAD

Pozo	Nivel de agua	pH	HTP (mg/l)	Pb (mg/l)	Fe (mg/l)	Cr (mg/l)	Zn (mg/l)	Explosividad vapores (%)
1	2.5	6.4	0.64	ND	6.37	ND	0006	ND
2	3.1	6.6	0.84	ND	2.29	ND	0.044	ND
3	0	6.4	8.35	ND	8.4	ND	0.112	ND
4	3.3	6.4	0.3	ND	0.39	ND	0.113	ND
5	4.3	5.9	21.2	ND	0.19	ND	0.035	ND
6	3.1	6.5	0.49	ND	1.54	ND	0.034	ND
Promedio	2.72	6.37	5.3	-	3.2	-	0.07	-
Desv estándar	1.45	0.24	8.4	-	3.4	-	0.04	-
Nivel Permisible	-	-	1-10	0.025	0.30	0.05	5.0	-

exposición, así como los niveles de limpieza basados en riesgo para el suelo y agua subterránea. Los resultados sombreados indican que se ha excedido el riesgo aceptable y la concentración que asegura este riesgo en el medio afectado. Se puede observar que, de acuerdo con el modelo RBCA Tool Kit for Chemical Releases, las concentraciones de naftaleno y zinc presentes en el suelo y agua subterránea, no representan un riesgo para la salud de los habitantes de las colonias aledañas ni para los trabajadores de la TAD (no se rebasó el límite establecido como aceptable de 1.0).

Áreas y volúmenes a tratar

A partir de los análisis realizados en las muestras de suelo, se calcularon las áreas y volúmenes a tratar en la TAD por medio del programa Rock Works. Si se consideran las áreas contaminadas por HTP en concentraciones mayores o iguales a 2,000 mg/kg, que es el límite propuesto por los CIRS, se estima que es necesario sanear un área total de 3,289 m², que considerando una profundidad de 2.48 m, dan como volumen de suelo a tratar, la cifra de 8,157 m³.

Técnicas de rehabilitación propuestas

Ya que la mayor parte de los suelos contaminados con más de 2,000 mg/kg se encuentra en la zona de estacionamientos exteriores, estacionamientos de pipas y zonas de llenaderas, se pueden utilizar técnicas de saneamiento *ex situ* e *in situ*.

Una técnica que tiene gran potencial de aplicación en casos como el de la TAD es el proceso

de biopilas. Fundamentalmente se trata de la intensificación del proceso natural de biodegradación, que se da cuando los microorganismos autóctonos del suelo entran en contacto con los contaminantes presentes en el suelo. Para intensificar este proceso es necesario examinar aspectos tales como la adecuada relación de los principales macronutrientes (CNP), la humedad, la temperatura y la presencia de oxígeno. Una serie de análisis y experiencias a nivel de laboratorio, permiten determinar las condiciones óptimas para que el proceso de biodegradación se lleve a cabo. Para más información del proceso de biopilas, referirse a Iturbe *et al.* (2002).

En cuanto a las aguas subterráneas, en 5 de los 6 pozos de monitoreo se rebasa el nivel máximo permisible de Fe propuesto para el agua potable (NOM-127-SSA1-94), que es de 0.3 mg/l, por lo que se requerirá reducir la concentración de hierro en el agua subterránea. Para realizar esta disminución, se han propuesto varios métodos fisico-químicos, como la adsorción en columnas empacadas con resinas sintéticas, o bien, con óxidos metálicos que retienen al hierro, o por precipitación. Es importante determinar si el origen del Fe en las aguas es el suelo de la zona, revisando los contenidos de este metal en aguas subterráneas de otros sitios cercanos y lejanos a la antigua TAD.

Conclusiones

El suelo de la TAD se encuentra contaminado por HTP en concentraciones de ND a 59,000 mg/kg. La zona más contaminada coincide con el punto 1, localizado en la zona verde, al Norte de las oficinas. Los puntos 2 y 4, junto a la planta de tratamiento de efluentes también están altamente

Tabla 4. Riesgo y concentraciones de limpieza a alcanzar en la TAD

Compuesto	Clase	HQ Riesgo	Riesgo I índice de peligrosidad (HI)							Niveles de limpieza con base en el riesgo Agua (mg/l) Suelo (mg/kg)			
			Agua Subterránea		Suelo		Aire exterior						
			On-site (0 m)	Off-site 1 (84 m)	Comercial	Residencial	Comercial	Trabajadores construcción	Comercial	Trabajadores construcción	Comercial		
Naftaleno	D	HQ	4.4 × 10 ⁻⁴	5.5 × 10 ⁻⁴	9.1 × 10 ⁻⁶	7.4 × 10 ⁻⁶	9.7 × 10 ⁻⁵	6.0 × 10 ⁻⁵	1.1 × 10 ⁻⁴	>3.0 × 10 ⁻¹	1.5 × 10 ⁻⁴		
Zinc	D	HQ	1.2 × 10 ⁻²	1.5 × 1 ⁻²	1.3 × 10 ⁻⁴	1.9 × 10 ⁻⁴	-	-			2.4 × 10 ⁻¹	5.3 × 10 ⁻³	
Total			1.3 × 10 ⁻²	1.6 × 10 ⁻²	1.4 × 10 ⁻⁴	2.0 × 10 ⁻⁴	9.7 × 10 ⁻⁵	6.0 × 10 ⁻⁵	1.1 × 10 ⁻⁴				

contaminados. No se detectó la presencia de BTEX, MTBE ni MTE. De los 16 HAP s analizados, sólo se encontró la presencia de naftaleno en el punto 16, a una concentración por debajo de 1mg/kg.

Se identificó la presencia de Pb, Fe y Zn en el suelo, pero los índices de geo-acumulación calculados (-0.3492, -0.5193 y -0.4894, respectivamente), sugieren que se trata de concentraciones naturales del suelo y no de contaminación alguna. Se encontraron HTP en las aguas subterráneas, solo en uno de los 6 puntos por arriba del nivel recomendado de 10 mg/l. También se encontró que el Fe excede el valor sugerido de 0.3 mg/l en 5 de los 6 pozos estudiados. Se encontró que el pH de las aguas subterráneas no está relacionado con el nivel de metales encontrados (Fe y Zn), pero sí con el contenido de HTP ($r^2 = 0.9176$). Si se consideran las áreas contaminadas por HTP en concentraciones mayores o iguales a 2,000 mg/kg, que es el límite propuesto por los CIRs, se estima que es necesario sanear un área total de 3,289 m², que considerando una profundidad de 2.48 m, dan como volumen de suelo a tratar la cifra de 8,157 m³.

El análisis de riesgo a la salud indicó que las concentraciones de naftaleno y zinc, presentes en el suelo y agua subterránea, no representan un riesgo para la salud de los habitantes de las colonias aledañas ni para los trabajadores de la TAD. La técnica biopila se recomienda como opciones adecuadas para el saneamiento del suelo contaminado. En cuanto al contenido de hierro en las aguas subterráneas, habría que utilizar un método de columnas de intercambio, o bien, la precipitación del metal para su remoción.

Agradecimientos

Agradecemos ampliamente la participación de D. Rodríguez (II/NAM) en la elaboración de planos y revisión del texto.

Referencias

Adams R.H., Domínguez V.I. y García L. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. *Terra* 17(2), pp. 159-174.

- Adenyi A.A. and Afolabi J.A. (2002). Determination of Total Petroleum Hydrocarbons and Heavy Metals in Soils Within the Vicinity of Facilities Handling Refined Petroleum Products in Lagos Metropolis. *Environment International*, 28, pp. 79-82.
- ASTM American Society of Testing and Materials (1996). *Standard Guide for Risk Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*. E1739-95, Pennsylvania, USA.
- Bakker M.I., Casado B., Koerselman J.W., Tolls J. and Kollofel C. (2000). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil and Plant Samples From the Vicinity of an Oil Refinery. *The Science of the Total Environment*, 263, pp. 91-100.
- Buonicore A.J. (1996). (Editor) *Cleanup Criteria for Contaminated Soil and Groundwater*. ASTM, Pennsylvania, EUA.
- Crane J.L. and Tuchman M. (1993). Human Health Risk Assessment: Buffalo River, New York, Area of Concern. EPA- 905-R93-008. Seattle, Washington, Internet: <http://www.Epa.gov/glnpo/arcs/EPA-905-R93-008/EPA-905-R93-008.html>
- Chen Z., Huang G.H. and Chakma A. (2000). Risk Assessment of a Petroleum-Contaminated Site Through a Multi-Phase and Multi-Component Modelling Approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 26, pp. 273-281.
- Ekundayo E.O. and Obuekwe C.O. (1997). Effects of an Oil Spill on Soil Physico-Chemical Properties of a Spill Site in a Typical Paleudult of Midwestern Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 45, pp. 209-221.
- Gutiérrez M.C. y Zavala J. (2001). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra* 20, pp. 101-111.
- GSI Ground Water Services Inc. (1998). *RBCA Tool Kit for Chemical Releases Guidance Manual*. Ground Water Services Inc, United States of America.
- Iturbe M.R., Flores R.M., Flores C.R., Rodríguez R.D., Chávez C., Rocha M. y Pérez G. (1999). Evaluación de la contaminación en el suelo y subsuelo de la terminal de almacenamiento y distribución de Puebla, Puebla. PEMEX-Refinación, Informe Confidencial.
- Iturbe R., Flores R.M. and Torres L.G. (2003a). Soil and Water Contamination Levels in an Out-of-Service

- Oil Distribution and Storage Station in Michoacan, Mexico. *Water, Air and Soil Contamination*. 146(1-4), pp. 261-281.
- Iturbe R., Flores R.M. and Torres L.G. (2003b). Subsoil Contaminated by Hydrocarbons in an Out-of Service Oil Distribution and Storage Station in Zacatecas, México. *Environmental Monitoring and Assessment* .44, pp. 608-620.
- Iturbe R, Flores C., Chavez C., y Roldan A. (2002). Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. III, No. 1, Ene-Mar.
- Lesser J.M. y Saval S. (2000). Caracterización y comportamiento de la contaminación con hidrocarburos en un suelo arcilloso. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. 51, pp. 25-29.
- Muller G. (1969). Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, pp. 108-118.
- NRC (1983). *National Research Council. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*. National Academy Press. Washington D.C., USA.
- PEMEX (2001). Informe de actividades 2001. Internet: <http://www.PEMEX.com.mx>
- PFPA (1998). Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Restauración de Suelos Contaminados. Internet: <http://www.profepa.gob.mx/saa/audita43.htm>
- Sharma V.K., Hicks S.D., Rivera W. and Vazquez F.G. (2002). Characterization of Petroleum Hydrocarbons Following an Oil Spill into a Coastal Environment of South Texas, USA. *Water, Air and Soil Pollution*, 134, pp. 111-127.
- Shriadah M.A. (1999). Oil Contamination Along Oil Tanker Routes of the United Arab Emirates (The Arabian Gulf and the Gulf of Oman). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 63, pp. 203-210.
- Torres L.G., Castro B., Pérez S. and Iturbe R. (2002). Characterization of Maya crude and five Mexican Oil Fractions for Environmental Forensic Applications. En preparación.

Semblanza de los autores

Rosario Iturbe-Argüelles. Ingeniera civil y doctora en ingeniería egresada de la Facultad de Ingeniería, UNAM es investigadora del área de ingeniería ambiental en el Instituto de Ingeniería, principalmente dedicada a la caracterización y saneamiento de suelos contaminados por hidrocarburos desde hace más de diez años. Actualmente dirige el grupo de saneamiento de suelos y acuíferos en el que participan más de 20 académicos y alumnos de posgrado.

Rosa María Flores-Serrano. Es ingeniera industrial en producción por el Instituto Tecnológico de Mérida, desde 1991. En 1996, obtuvo con honores la maestría en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En el año 2005, se graduó como doctora en ingeniería (Ambiental) dentro del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería de la UNAM. Actualmente colabora en el grupo de trabajo saneamiento de suelos y acuíferos de la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería, UNAM, participando en proyectos relacionados con el comportamiento de metales e hidrocarburos en el suelo y agua subterránea. Ha participado como instructora en el tema de evaluaciones de riesgo en diversos cursos, entre los cuales se encuentran los Cursos Regionales Sobre Manejo Adecuado de Residuos, organizados por INE-SEMARNAT y JICA. Desde el año 2002, es miembro del Grupo Técnico de integración del proyecto de norma oficial mexicana, el cual establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por diversos metales y metaloides. Es miembro de la Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental (AMEQA), de la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), y de la Association for Environmental Health and Sciences (AEHS).

Luis Gilberto Torres-Bustillos. Es licenciado en ingeniería química por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, obtuvo el grado de maestría en biotecnología por la UACPyP/CCH, UNAM y el doctorado en ingeniería por la DEPI/UNAM. Actualmente es investigador en la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería, UNAM. Tiene experiencia en procesos fermentativos, reología y mezclado de medios complejos, tratamientos biológicos para aguas residuales industriales y caracterización/tratamiento de suelos contaminados con metales y/o hidrocarburos del petróleo. Ahora, se ha orientado a la aplicación de surfactantes a los problemas ambientales. Sus principales líneas de investigación son la Biodegradación de fracciones de petróleo en suelos atemperados, asistida por surfactantes, Lavado de suelos in situ y ex situ asistido con surfactantes, Preparación de emulsiones de fracciones de petróleo-surfactantes-agua, como primer paso para el biotratamiento de combustibles (i.e. desulfuración biológica) y Reología y mezclado de lodos y suspensiones, aplicados a problemas ambientales.