



# Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas

R. Iturbe-Argüelles, C. Flores-Torres, C. Chávez-López, A. Roldán-Martín

Instituto de Ingeniería, UNAM

E-mail: [ria@pumas.iingen.unam.mx](mailto:ria@pumas.iingen.unam.mx)

(recibido: junio de 2001; aceptado: septiembre de 2001)

## Resumen

El grupo de saneamiento de suelos y acuíferos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, inició en 1999 la evaluación de la contaminación del subsuelo de una refinería en una zona costera del país, mediante el muestreo de 325 puntos a 1.5 m de profundidad y con el análisis de los siguientes parámetros: hidrocarburos totales del petróleo (HTP), hidrocarburos poliaromáticos (HAP), diesel, gasolina, metilterbutileter (MTBE) y los metales hierro, vanadio, zinc, cadmio, cromo y plomo. Asimismo, se llevó a cabo una evaluación de riesgo a la salud a fin de determinar los niveles de limpieza de las áreas contaminadas. Una vez realizado el estudio se propuso probar a nivel piloto dos técnicas de saneamiento para las áreas contaminadas con valores superiores a 30 000 mg/Kg de HTP, o bien, para las zonas en donde la evaluación de riesgo a la salud indica la existencia de riesgo para uno o más compuestos (Iturbe *et al.*, 2000). Las técnicas propuestas son biopilas y lavado de suelos con surfactantes. En este trabajo se presenta la prueba piloto con biopilas, de la cual se obtuvo una eficiencia de remoción de HTP del 80 por ciento en cinco meses de operación.

Descriptores: biopila, biorremediación, HTP, HAP, degradación.

## Abstract

In 1999 the Instituto de Ingeniería, UNAM, initiated an evaluation through the soil and groundwater sampling and a risk health assessment in a Mexican refinery. An extended area was found contaminated with hydrocarbons. This area requires a soil remediation, taking into account that some zones present more than 30 000 mg/kg of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). Biopile system was recommended as the best remediation method to diminish TPH and some poliaromatic hydrocarbons (PAH). Therefore an experimental biopile of 30 m<sup>3</sup> was constructed with contaminated soil. After 22 weeks, results show more than 80% of TPH and PAH remotion.

Keywords: biopile, bioremediation, TPH, PAH, degradation.

## Introducción

En México se tiene un número considerable de sitios contaminados con hidrocarburos, esto como resultado de fugas o descargas accidentales de

petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como por la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, los cuales se han producido dentro y fuera de las instalaciones productoras y

almacenadoras. En muchos casos, estos derrames han dañado el subsuelo y el agua subterránea; asimismo, su saneamiento es complejo debido a que los contaminantes se presentan en forma de mezclas.

En general, los hidrocarburos derivados del petróleo tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. El caso del petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes al encontrarse sobre la superficie. Si son depositados en el suelo pueden lixiviarse debido a que las lluvias arrastran los compuestos solubles. La gasolina, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo y durante su trayectoria pueden adsorberse en el material poroso en la zona no saturada, o bien, migrar hasta el nivel freático y dispersarse según la dirección de la corriente subterránea.

Debido a que muchos de los sitios contaminados presentan características de alta permeabilidad y niveles freáticos someros, es común que no sólo se contamine el suelo sino también el agua subterránea.

Uno de los métodos de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, consiste en biopilas, que también se conocen como bioceldas, biomontículos o pilas de composteo. Se utilizan para reducir las concentraciones de los hidrocarburos

totales del petróleo (HTP) en suelos contaminados con hidrocarburos a través de la biodegradación. La biopila se define como un proceso biológico controlado, donde los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados. El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y adicionando nutrientes y humedad. El incremento de la actividad microbiana es proporcional a la reducción de las concentraciones de HTP (Figura 1).

En este trabajo se describe la construcción y operación de una biopila experimental que fue realizada en los terrenos de una refinería cuyos suelos están contaminados con hidrocarburos en concentraciones de HTP mayores a 30 000 mg/Kg.

## Desarrollo

### Marco teórico

La biodegradación de los hidrocarburos es un proceso mediante el cual los microorganismos reducen los compuestos químicos a compuestos más simples, es decir, de menor peso molecular. Por ello se presenta como una opción muy viable para el tratamiento de los suelos contaminados con hidrocarburos.

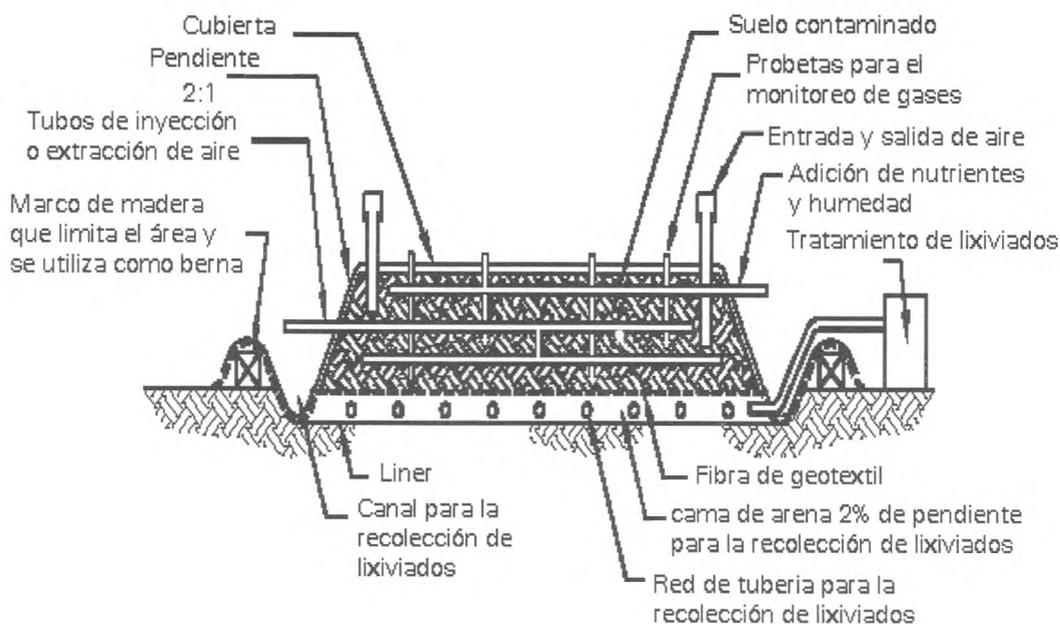


Figura 1. Partes de una biopila

Para que la degradación se lleve a cabo, es necesario que existan las condiciones ambientales adecuadas, así como la cantidad suficiente de microorganismos degradadores de hidrocarburos, estos por lo general, son los microorganismos autóctonos del sitio contaminado. En caso de que las condiciones ambientales y las unidades formadoras de colonias (UFC) no sean suficientes, es necesario establecerlas mediante procesos de ingeniería.

Uno de los principales problemas de la biodegradación, es que en presencia de altas concentraciones del contaminante en el suelo, pueden existir efectos de toxicidad sobre la población microbiana. Otro, es la insuficiencia de nutrientes en el suelo; sin embargo, la presencia de cantidades mínimas de nitrógeno y fósforo mejoran la posibilidad de biodegradación en el suelo.

Los factores ambientales que afectan la actividad microbiana y, por lo tanto, la biodegradación son el contenido de humedad, temperatura, nutrientes inorgánicos (principalmente nitrógeno y fósforo), aceptores de electrones (oxígeno, nitrato, sulfato), pH, presencia de metales pesados, tipo y cantidad de material orgánico presente (carbono).

La biodegradación de los hidrocarburos se lleva a cabo principalmente por dos grupos de microorganismos: las bacterias y los hongos. Las bacterias tienen un crecimiento muy rápido y una mayor capacidad de adaptación a los medios contaminados.

La biodegradación depende de un adecuado suministro de agua, por lo que es importante conocer la porción de agua disponible para los microorganismos. Ésta puede conocerse indirectamente a través de la capacidad de campo, la cual depende de la textura y porosidad del suelo. La biodegradación de los hidrocarburos es óptima con un contenido de humedad entre 30 y 80 por ciento de la capacidad de campo.

Los nutrientes inorgánicos principales para la biodegradación son el nitrógeno y el fósforo. El primero es necesario para la síntesis de proteínas y la pared celular, mientras que el fósforo es necesario para formar los ácidos nucleicos. El nitrógeno puede perderse rápidamente en el suelo debido a la lixiviación del amonio y nitratos, así como por la desnitrificación del suelo. El fósforo se encuentra frecuentemente limitado, debido a su baja

solubilidad y biodisponibilidad. El fósforo orgánico en suelos se encuentra principalmente en los ácidos húmicos mientras que el fósforo inorgánico se encuentra en combinación con el Fe, Al, Ca, F.

La biorremediación depende principalmente de la actividad de los microorganismos aerobios, por lo que se requiere un suministro adecuado de oxígeno al suelo. Aproximadamente se requieren de 2 a 3 Kg de oxígeno por Kg de hidrocarburos para asegurar una buena degradación. Cuando los poros del suelo se encuentran ocupados por moléculas de agua, la difusión del oxígeno es menor y se pueden presentar condiciones anóxicas. Para tener una degradación aerobia es necesario tener aproximadamente 10 por ciento de poros libres en la matriz del suelo.

Los contaminantes orgánicos presentes en el suelo, son la fuente de carbono que los microorganismos requieren para la biodegradación.

Algunas consideraciones para definir si la degradación es factible son las siguientes:

1. Los hidrocarburos alifáticos son más fáciles de degradar que los compuestos aromáticos.
2. Los hidrocarburos alifáticos de cadena recta son más fáciles de degradar que los que tienen radicales, ya que el radical impide la biodegradación.
3. Los hidrocarburos saturados son más fáciles de degradar que los insaturados. La presencia del doble o triple enlace dificultan la degradación.
4. Las cadenas largas de hidrocarburos son más fáciles de degradar que las cortas. Los hidrocarburos con menos de 9 carbonos son difíciles de degradar, ya que son tóxicos; el contenido óptimo de carbonos en la cadena para degradar es de 10 a 20.

## Biopilas

La efectividad de la biopila depende de los siguientes factores:

1. Características del suelo.
2. Características de los contaminantes.
3. Condiciones climatológicas.

## Ventajas de las biopilas

1. Los contaminantes se destruyen en vez de pasar a otra condición.
2. El diseño y construcción son relativamente fáciles.
3. El saneamiento del suelo se lleva a cabo en un período de entre 3 y 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, la concentración de hidrocarburos y del tipo de suelo.
4. El suelo saneado mediante biopilas no requiere ser confinado después.

Las biopilas ofrecen un costo más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

## Limitaciones

1. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de cinco y seis anillos son difícilmente degradables en las biopilas.
2. Las biopilas no son efectivas para concentraciones de HTP superiores a 50 000 mg/Kg.
3. La presencia de metales pesados pueden inhibir el crecimiento de microorganismos.

## Criterios para la selección de la tecnología

1. Establecer la extensión del suelo contaminado (volumen y datos del sitio).
2. HTP < 50 000 ppm.
3. Bacterias heterótrofas > 1 000 UFC/g en suelo seco.
4. pH entre 6 y 9.
5. Contenido de humedad entre el 70 y 95 % de la capacidad de campo.
6. Bajo contenido de arcilla y limo.
7. C:N:P:K debe ser aproximadamente de 100:15:1:1.
8. Metales tóxicos < 2 500 mg/Kg.

### **Bases técnicas para el diseño y construcción de la biopila**

1. Selección del sitio
2. Preparación de la base
3. Aeración

4. Adición de humedad
5. Adición de nutrientes
6. Colección de lixiviados

## Selección del sitio

El área debe contar con espacio adecuado y con los servicios que permitan la instalación de aeración y distribución de agua. Se requiere un área plana para la construcción de la biopila. El lugar debe ser suficiente para almacenar el suelo, mezclarlo y prepararlo para la biopila.

## Preparación de la base

La base de la biopila tiene tres funciones:

- Proporcionar una cimentación estable para soportar la biopila, así como el manejo de las operaciones requeridas
- La base proporciona una barrera contra la migración potencial del contaminante en el suelo subyacente
- La base debe contar con una pendiente de 2 a 3 por ciento para evitar el almacenamiento de lixiviados en la base de la biopila

La base de la biopila puede consistir de una capa de arcilla compactada, o bien, se puede utilizar un área pavimentada como la de un estacionamiento o un patio de almacenamiento.

## Aeración

La biopila debe contar con un sistema de aeración para que exista el suministro de oxígeno suficiente y de esta forma los microorganismos degraden los compuestos (Brown y Cartwright, 1990). El suministro puede ser activo o pasivo. En ambos casos se requiere la instalación de drenes, tuberías ranuradas o perforadas que se colocan a diferentes alturas a través de la biopila, de manera que el aire penetre. En el método pasivo se deja que el aire penetre naturalmente a los drenes. Los sistemas de ventilación activa consideran sistemas de inyección y extracción de aire. Estos sistemas deben actuar de manera que el flujo de aire esté justo arriba de las condiciones de oxígeno límite, a fin de prevenir

exceso de volatilización de los hidrocarburos que reduzcan las emisiones de vapor hacia el exterior (Fan y Tafuri, 1994). Si los vapores son excesivos se instala un sistema de carbón activado para la eliminación de vapores. Cuando se trata de hidrocarburos pesados como los provenientes de diesel, no se requiere sistema de extracción de vapores.

Para obtener la tasa de degradación de los hidrocarburos en la biopila se requiere una prueba de respirometría, en ella se mide la cantidad de O<sub>2</sub> en muestras de gas del suelo. Las mediciones se continúan hasta que se llega al 10 por ciento. Para determinar la tasa de consumo de oxígeno, se mide el porcentaje de O<sub>2</sub> con el tiempo. La pendiente de la curva correspondiente es la velocidad a la que se consume el oxígeno.

La tasa de biodegradación se estima antes de iniciar la operación de la biopila. Una disminución en la tasa de consumo de oxígeno se interpreta como una disminución en la concentración de hidrocarburos.

### Adición de agua

Los microorganismos requieren humedad para transportar los nutrientes, llevar a cabo los procesos metabólicos y mantener la estructura de la célula. Sin embargo, un exceso de humedad es indeseable debido a que el agua ocuparía gran parte de los poros del suelo, limitando la permeabilidad del aire y reduciendo la eficiencia de aeración (Fahnestock, 1998).

Por otra parte, el exceso de agua incrementa la generación de lixiviados, tanto de los hidrocarburos como de los nutrientes.

El contenido de agua puede cambiar a medida que se lleva a cabo el saneamiento. Por lo general, el aire penetra en la biopila a menos de 100 por ciento de la humedad relativa y tiende a remover la humedad a medida que se mueve a través de la biopila. Por otra parte, el proceso de biodegradación convierte los hidrocarburos en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O lo que incrementa nuevamente el contenido de agua. Aproximadamente se producen 700 mg de agua por cada 500 g de HTP degradados.

El requerimiento de agua depende del clima del sitio de ubicación de la biopila. En un ambiente

seco y con bajo contenido inicial de hidrocarburos, por lo general se requiere agregar agua. La práctica de control de humedad se facilita cuando existe un sistema de colección y control de lixiviados. Regularmente un ajuste inicial en el contenido de agua es suficiente para eliminar la necesidad de adición de agua durante la operación. Si la biopila se cubre al terminar su construcción, se calcula que existirá una pérdida de humedad entre 1 y 2 por ciento en un período de 4 meses. Generalmente se recomienda que el suelo tenga un contenido de agua entre 70 y 90 por ciento de la capacidad de campo si únicamente se le va a agregar agua durante la etapa de construcción.

### Adición de nutrientes

Los organismos requieren de una fuente de carbono para producir biomasa. Los microorganismos que degradan los hidrocarburos en una biopila utilizan a estos como fuente de carbono y energía. Los contaminantes y los compuestos orgánicos naturales del suelo habitualmente suministran este carbono requerido, pero existen otras sustancias que son nutrientes esenciales como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, que pueden estar en baja proporción con respecto al carbono. USEPA recomienda que la relación C:N:P sea de 100:15:1, o bien, 100:15:0.5.

Los nutrientes se disuelven en agua y se rocían en el suelo antes o durante la construcción de la biopila, o bien, en forma granular mezclada con el suelo. Asimismo, es factible agregar los nutrientes en el sistema de adición de agua durante la operación. Cuando la pila se empieza a secar, una solución de nutrientes en agua se aplica en la parte superior de la pila mediante un sistema de aspersión. La solución de nutrientes percola a través de la pila; sin embargo, el fósforo no penetra más de 30 cm debido a la reacción química con el suelo.

### Colección de lixiviados

Para un sistema permanente de biopilas se instala un sistema de colección de lixiviados, que consta de una tubería perforada en la base de la biopila del lado

hacia donde se dejó la pendiente. El tubo se conecta a una canaleta que puede ser una tubería de 4 pulgadas cortada en media caña, que finalice en un cárcamo de bombeo y un tanque de almacenamiento de los lixiviados.

Para biopilas menores se puede conectar el sistema de colección de lixiviados al de extracción de vapores. Si la biopila se construye con la humedad requerida no se producen lixiviados.

### Aplicación a nivel piloto en una refinería

En una refinería de una zona costera de México, se construyó una biopila como prueba piloto, en un área contaminada con una concentración promedio de HTP de 35 000 mg/Kg. La dimensión de la biopila experimental fue de 5.5 m en la base, 1.5 m de altura y una pendiente de 1.5:1.

Se seleccionó un área de 10 x 10 m, se limpió de desechos y después se colocó una capa de suelo de baja permeabilidad de aproximadamente 30 cm de espesor. Posteriormente, se colocó una membrana impermeable. A la capa de suelo se le dio una pendiente del 2% para coleccionar los lixiviados.

El suelo para construir la biopila se excavó del área contaminada. La construcción se realizó por

capas sin compactar de 30 cm cada una. Después de cada capa se agregó el agua con los nutrientes disueltos a manera de mantener el contenido de agua y los nutrientes requeridos.

Los nutrientes se aplicaron de forma que se cumpliera la relación carbono: nitrógeno: fósforo 100:15:1; se disolvieron en un tanque de agua de 600 l y se regaron a cada 30 cm con una manguera flexible. La tabla 1 presenta el cálculo para obtener la cantidad requerida de nutrientes para la biopila.

Durante la construcción se colocaron los drenes para la aireación sobre una cama de grava a 0.50 m y a 1.00 m de altura. Los drenes son tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro, con orificios de ¼ " a cada 3 cm para que se distribuya el aire.

Asimismo, se calculó el contenido de agua (20 por ciento) correspondiente al 70 por ciento de la capacidad de campo y se calculó la adición de agua requerida para mantener dicha humedad. Durante la construcción se adicionó el agua con los nutrientes al final de cada capa de 30 cm. En la última capa, a 1.40 m de altura, se colocaron dos drenes similares a los de aireación para adicionar 100 litros de agua a la semana y mantener la humedad requerida. Los tubos se conectaron a un tanque de almacenamiento de agua (Figura 2).

Tabla 1. Cálculos para la cantidad de nutrientes que se adicionaron a la biopila

Contenido de C en el suelo: $40\ 000\ \text{mg/Kg} (0.8) = 32\ 000\ \text{mg/Kg}$
Relación de C:N:P deseado = 100:15:1
Cantidad de N necesario: $32\ 000 \times 0.15 = 4\ 800\ \text{mg/Kg}$
Cantidad de P necesario: $32\ 000 \times 0.01 = 320\ \text{mg/Kg}$
<b>Suelo</b>
Densidad del suelo: $1\ 500\ \text{mg/cm}^3$
Volumen total de la biopila: $27\ \text{m}^3$
Peso total de la biopila: $40.4\ \text{ton}$
<b>Total de nutrientes requeridos</b>
Nitrógeno: $4\ 800\ \text{mg/Kg} \times 40\ 500\ \text{Kg} = 194.4\ \text{Kg}$
Fósforo: $340\ \text{mg/Kg} \times 40\ 500\ \text{Kg} = 13.77\ \text{Kg}$
Contenido de N y P en el Nitrofósforo (31-4-0)
Fósforo (P) = $13.77/0.04 = 344.25\ \text{Kg}$
En $243\ \text{Kg}$ de Nitrofósforo hay $75.33\ \text{Kg}$ de N
Nitrógeno requerido: $145.8 - 75.33 = 70.47\ \text{Kg}$
Contenido de urea 46% de N: $70.47/0.47 = 153\ \text{Kg}$ de urea se necesitan



*Figura 2. Sistemas de aeración e irrigación*

Al final de la construcción, la biopila se cubrió con una capa de grava para mantener una temperatura adecuada y protegerla del aire y, en consecuencia, de la erosión. En este caso no fue necesario cubrir

la biopila con una capa de polietileno, debido a que la temperatura es suficientemente constante a lo largo del año (Figura 3).



*Figura 3. Cubierta de grava*

**Operación**

1. A la biopila se le adicionaron 100 litros de agua una vez a la semana a través del sistema de riego.
2. Se le suministró aire diariamente durante 20 minutos.
3. Se tomaron muestras de suelo cada 10 días en cada lado de la biopila para determinar HTP y HAP, y cada mes para nitrógeno, fósforo y densidad de población de las bacterias heterótrofas.
4. La inyección del aire se suspende cada mes y la cantidad de oxígeno se mide conforme la cantidad de CO<sub>2</sub> aumenta con el tiempo.

**Resultados**

La tabla 2 y las figuras 4 y 5 muestran las concentraciones de HTP y HAP después de 22 semanas de operación de la biopila. Los resultados indican una remoción promedio de HTP del 81 por ciento. Los HAP no se detectaron después de 22 semanas de operación.

Después de 8 semanas el nitrógeno disminuyó de 0.09 % a 0.01%, mientras que el fósforo aumentó de 2 ppm a 90 ppm. Lo anterior indica que no se requiere adicionar fósforo pero sí nitrógeno, ya que el conteo bacteriano se ha mantenido aproximadamente igual de  $3 \times 10^6$  (UFC/g) a  $3.4 \times 10^6$  (UFC/g) lo que implica que el consumo de nitrógeno se mantiene, pero no así el de fósforo.

Tabla 2. Resultados de la biopila experimental en la refinería Francisco I. Madero

MUESTRA	HTP (mg/kg)	HIDROCARBUROS		PAH (mg/kg)		
CONCENTRACIONES INICIALES EN LA BIOPILA						
1	30 510	Tolueno 0.06	Acenafteno	1.67	Fluoreno	0.76
		Diesel 340	Fenantreno	4.89		
2	55 156 27 371	Tolueno 0.04	Acenafteno	0.74	Fluoreno	0.10
		$\sigma$ -Xileno 0.02	Fenantreno	4.2	Benzo(a)antraceno	0.63
		Diesel 466.5				
CONCENTRACIONES EN LA BIOPILA (2 SEMANAS) DIC 3/2000						
BP-NTE	19 646	Diesel 156.3	Fenantreno	0.71		
	19 593	Diesel 105.4	Fenantreno	0.59		
BP-PTE	16 548	Diesel 151.7	Fenantreno	1.38		
			Fluoreno	0.02		
BP-SUR	17 449	Diesel 45.9	Acenafteno	0.110	Benzo(a)antraceno	0.59
			Fenantreno	4.88	Benzo(b)fluoranteno	0.05
BP-OTE	16 324	Diesel 30.6	Benzo(k)fluoranteno	0.020	Criseno	0.43
			Fenantreno	0.65		
CONCENTRACIONES EN LA BIOPILA (4 SEMANAS) DIC 16/2000						
BP-NTE	—	—	—			
BP-PTE	22 531	Diesel 30.7	ND			
BP-SUR	20 341	Diesel 59.8	ND			
BP-OTE	26 288	Diesel 517	Acenafteno	0.728		
			Fenantreno	1.27		
			Fluoreno	0.45		
CONCENTRACIONES EN LA BIOPILA (6 SEMANAS) DIC 29/2000						
BP-NTE	18 932	Diesel 13.5	Fenantreno	1.5		
BP-PTE	8 567	ND	ND			

Tabla 2. Resultados de la biopila experimental en la refinería Francisco I. Madero (continuación...)

MUESTRA	HTP (mg/kg)	HIDROCARBUROS		PAH (mg/kg)
CONCENTRACIONES EN LA BIOPILA (6 SEMANAS) DIC 29/2000				
BP-SUR	11 107	Diesel 18.8		ND
BP-OTE	27 901	Diesel 139	Fluoranteno	3.75
			Fluoreno	1.00
CONCENTRACIONES EN LA BIOPILA (8 SEMANAS) ENERO 12/2001				
BP-NTE	8054	ND	ND	
BP-PTE	13 488	ND	ND	
BP-SUR	18 867	Tolueno 0.026	Fenantreno	0.86
		Diesel 21.3		
BP-OTE	14 452	Diesel 18.41	ND	
CONCENTRACIONES EN LA BIOPILA (10 SEMANAS) ENERO 25/2001				
BP-NTE	22 998	Diesel 20	Acenafteno	0.58
BP-PTE	18 305	Diesel 10	ND	
		Xileno 0.011		
BP-OTE	10 795	$\sigma$ -Xileno 0.005	Fenantreno	1.12
		Tolueno 0.016		
BP-SUR	10 994	Diesel 63	Acenafteno	0.58
			Fenantreno	1.19
			Fluoreno	0.46
CONCENTRACIONES EN LA BIOPILA (22 SEMANAS) ABRIL 19/2001				
BP-NTE	5383	ND	ND	
BP-PTE	7445	ND	ND	
BP-OTE	8719	ND	ND	
BP-SUR	7931	ND	ND	

ND= NO DETECTADO

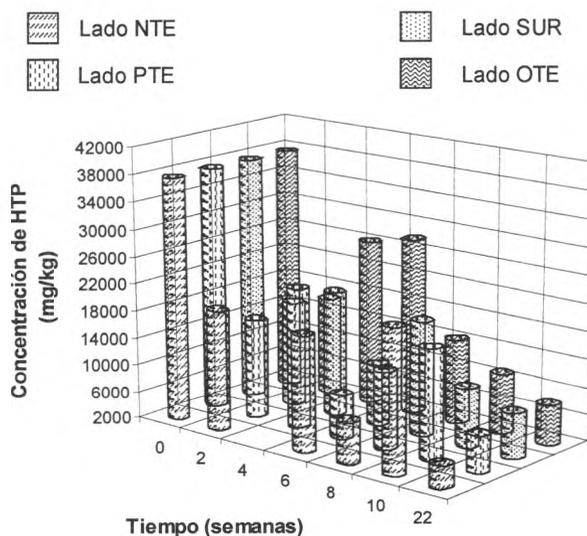


Figura 4. Remoción de HTP en cada lado de la biopila

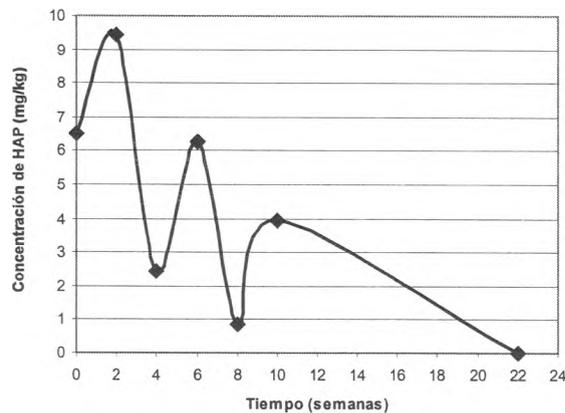


Figura 5. Remoción de HAP en la biopila

Inicialmente se estimó que la tasa de biodegradación fuera cercana a 160 mg/kg/día. Sin embargo, durante la operación de la biopila el promedio de la tasa de biodegradación fue de aproximadamente 70 mg/kg/día.

Se considera que los resultados muestran una excelente degradación dados los altos niveles de hidrocarburos y el tiempo en que se lograron las eficiencias mencionadas.

El costo de la biopila es de aproximadamente \$800.00/ m<sup>3</sup>

## Conclusiones

La biopila construida con arena contaminada por hidrocarburos tuvo una buena remoción en poco tiempo.

La aeración durante 20 minutos cada día representó una fuente de oxígeno adecuada para las bacterias.

Los 100 litros de agua que se agregaron por semana, mantuvieron una capacidad de campo del 75%.

Después de 8 semanas de operación no se requiere adicionar más fósforo, pero sí debe mantenerse la relación carbono:nitrógeno y en caso necesario, agregar el nitrógeno requerido.

Se observa que a partir de la semana 22 se tiene en promedio el 81 por ciento de eficiencia de remoción de HTP y los cuatro lados de la biopila

presentan concentraciones similares, lo cual indica una degradación homogénea.

La reducción de los compuestos poliaromáticos (HAP) no sigue una tendencia lineal, pero sí se observa una disminución gradual que llega a la no detección de estos compuestos después de 22 semanas de operación.

Aunque la bibliografía menciona la necesidad de cubrir la biopila con plástico, para el caso mencionado se cubrió con grava, que también evita la erosión y mantiene una temperatura dentro de un nivel adecuado para los microorganismos. Lo anterior, se debe a que comúnmente el sitio no presenta temperaturas menores a 15 °C. No hubo un exceso en la infiltración del agua, ya que no hay ningún líquido en el sistema de recolección de lixiviados.

La biopila es un método técnico y económicamente adecuado para sanear suelos contaminados con hidrocarburos.

## Agradecimientos

Se agradece a Pemex Refinación por el patrocinio y apoyo para llevar a cabo el estudio piloto.

## Referencias

Brown R.A. y Cartwright R.T. (1990). Biotreat Sludges and Soils. *Hydrocarbon Processing*. 68(10): 93-97.

- Fahnestock-Von F.M. (1998). *Biopile Design, Operation and Maintenance Handbook for Treating Hydrocarbon-Contaminated Soils*. Battelle Press. TD879P4B55.
- Fan C.Y. y Tafuri A.N. (1994). Engineering Application of Biooxidation Processes for Treating Petroleum Contaminated Soil. Remediation of Hazardous Wastes Contaminated Soils. New York, NY. Marcel Dekker, Inc.
- Iturbe-Argüelles R., Flores S.R.M., Flores-Torres C. y Chavez-López C. (2000). Behaviour of Spilled Hydrocarbons from a Coastal Zone in Mexico. A Case Study. Proceedings of ASME Conference. New Orleans.

---

### Semblanza de los autores

*Rosario Iturbe-Argüelles*. Obtuvo su doctorado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM al igual que la licenciatura en ingeniería civil. Es investigadora en el Instituto de Ingeniería, UNAM desde 1984, fue profesora visitante en la Universidad de British Columbia, Canadá en 1990, en el área de transporte de contaminantes en acuíferos. Desarrolló el grupo de saneamiento de suelos y acuíferos en 1996. Sus líneas de investigación son: saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos y transporte de contaminantes en suelos y acuíferos. Es auditora ambiental en suelo, agua y residuos peligrosos acreditada por la Profepa.

*Carlos Flores-Torres*. Ingeniero mecánico del IPN desde 1974. Ha participado en proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales, mediciones para control de la contaminación atmosférica y agua potable. Asimismo, ha desarrollado diversos equipos para laboratorios del Instituto de Ingeniería, UNAM, así como para el muestreo de suelos en campo. Desde 1996, participa en el grupo de saneamiento de suelos y acuíferos como responsable de los muestreos en campo, así también de la técnica de lavado de suelos con surfactantes.

*Claudia Chávez-López*. Es bióloga egresada de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Forma parte del grupo: saneamiento de suelos y acuíferos del Instituto de Ingeniería, Ingeniería Ambiental, cuya responsable es la Dra. Rosario Iturbe-Argüelles. Ha participado en la aplicación de técnicas para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos como el lavado de suelos con surfactantes y pruebas de diferentes oxidantes. Colaboró en los muestreos de suelo y elaboración de los informes de trabajo.

*Adriana Roldán-Martín*. Concluyó la licenciatura de ingeniería civil en el año de 1996, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Realizó la maestría en ingeniería ambiental en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Actualmente realiza su tesis de maestría en el Instituto de Ingeniería, UNAM, en el grupo de investigación: saneamiento de suelos y acuíferos.

