



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“TANQUES ENTERRADOS DE ALMACENAMIENTO
DE DIESEL FUERA DE SERVICIO: EVALUACIÓN DE
LA CONTAMINACIÓN DE SUELO CIRCUNDANTE Y
EVALUACIÓN DE OPCIONES DE DESTINO FINAL”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

I N G E N I E R A Q U Í M I C O

P R E S E N T A :

VICTOR MANUEL VELASCO PANALES



MÉXICO, D.F.

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente	Prof. LETICIA GONZÁLEZ ARREDONDO
Vocal	Prof. RODOLFO TORRES BARRERA
Secretario	Prof. ALFONSO DURÁN MORENO
1er. Suplente	Prof. LANDY IRENE RAMIREZ BURGOS
2do. Suplente	Prof. BALDOMERO PEREZ GABRIEL

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM.
Paseo de la investigación científica, Conj. E.
Ciudad Universitaria.

SUSTENTANTE:

VICTOR MANUAL VELASCO PANALES

ASESOR DEL TEMA:

DR. ALFONSO DURÁN MORENO

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.	INTRODUCCIÓN	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	Error! Bookmark not defined.
1.2.	OBJETIVOS	Error! Bookmark not defined.
CAPÍTULO 2.	FUNDAMENTOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.1.	NORMATIVIDAD.....	Error! Bookmark not defined.
2.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.2.1	TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN	Error! Bookmark not defined.
2.2.2	TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS (BIORREMEDIACIÓN).....	Error! Bookmark not defined.
2.2.3	TECNOLOGÍAS IN SITU.....	Error! Bookmark not defined.
2.2.4	TECNOLOGÍAS EX SITU.....	Error! Bookmark not defined.
2.2.5	TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN FÍSICOQUÍMICAS	Error! Bookmark not defined.
2.2.6	FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN.....	Error! Bookmark not defined.
2.3.	CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.3.1	CROMATOGRAFÍA DE GASES	Error! Bookmark not defined.
CAPÍTULO 3.	CASO DE ESTUDIO.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3.1.	PRUEBAS DE HERMETICIDAD DE TANQUES.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3.1.1	Alcance de la actividad.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.2	Definiciones.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.3	Inspección e inventario de accesorios y líneas conectadas a los tanques.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.4	Preparación de los tanques y accesorios para realizar pruebas de hermeticidad.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.	MUESTREO Y ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS EN SUELOS.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3.2.1	ROMPIMIENTO DE PISO DE CONCRETO Y REPARACIÓN DEL MISMO AL FINAL DE LOS MUESTREOS.....	Error! Bookmark not defined.
3.2.2	PERFORACIÓN DE 7 POZOS DE MUESTREO HASTA 3 m DE PROFUNDIDAD	Error! Bookmark not defined.
3.2.3	ANÁLISIS DE BTEX EN LAS MUESTRAS DE SUELO.....	Error! Bookmark not defined.
3.3.	ESTUDIO CONCEPTUAL PARA DEFINIR EL DESTINO FINAL DE LOS TANQUES ENTERRADOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3.3.1	Normatividad Aplicable.....	Error! Bookmark not defined.
CAPÍTULO 4.	EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA EL DESTINO FINAL DE LOS TANQUES ENTERRADOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.1.	RETIRO DE LOS TANQUES.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.1.1	Desmantelamiento.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.2	Actividades previas.....	Error! Bookmark not defined.
4.1.3	PURGA DE TANQUES.....	Error! Bookmark not defined.
4.2.	RELLENO DE LOS TANQUES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.2.1	ARENA y HORMIGÓN	Error! Bookmark not defined.
4.2.2	Relleno Fluido.....	Error! Bookmark not defined.
4.2.3	Espuma.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.	REHABILITACIÓN DE LOS TANQUES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.4.	RESUMEN DE LAS OPCIONES PARA EL DESTINO FINAL DE LOS TANQUES ENTERRADOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
	ANEXOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 1.2. Parámetros que influyen en el transporte de contaminantes en suelo **Error! Bookmark not defined.**

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación in situ y ex situ.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo con el tipo de tratamiento.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabla 3.1. Clave de las muestras de suelo colectadas**Error! Bookmark not defined.**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras 1. Ubicación esquemática de los tanques.....**Error! Bookmark not defined.**

Figuras 2. Dimensiones de las tapas de los tanques.....**Error! Bookmark not defined.**

Figuras 3. Actividades a desarrollar durante el desmantelamiento de tanques de almacenamiento de combustible (tomado de las guías ambientales para estaciones de servicio)**Error! Bookmark not defined.**

RESUMEN

Considerando al suelo como el sustrato sólido de la superficie de la tierra, en que se desarrollan las principales actividades humanas (urbanas, agrícolas, forestales, mineras, etc.), el mal manejo de los materiales y residuos peligrosos han provocado un grave problema de contaminación de este en particular y de los cuerpos de agua, debido al compromiso de la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO y la Facultad de Química en desarrollar proyectos en los cuales se vea beneficiada la sociedad, se estudio la evaluación de la contaminación del suelo circundante a tanques enterrados de almacenamiento de DIESEL fuera de servicio y la evaluación técnico-económica del destino final. El objetivo de esta tesis fue, entonces, evaluar la posible contaminación del suelo colindante a tres tanques enterrados de almacenamiento de combustible DIESEL utilizando la técnica de la EPA 8260B de cromatografía fase gas que consiste en el muestreo y análisis del suelo contiguo a los tanques enterrados de almacenamiento de DIESEL para determinar la posible presencia de compuestos de BTEX (Benceno, Tolueno, m,p,o Xilenos, Etilbenceno) y concluir si los tanques presentan daños en su estructura que pudiera haber provocado la pérdida de combustible DIESEL almacenado y en consecuencia la contaminación del suelo, además de definir mediante la consulta de normas, guías nacionales e internacionales y la evaluación Técnico-económica el destino final de los tanques enterrados.

Con el objetivo de determinar si los tanques que contenían combustible DIESEL instalados en el subsuelo tenían fugas, se realizaron pruebas de presión a dichos tanques para asegurar su integridad mecánica así como la ausencia de fisuras que puedan haber generado una contaminación del suelo. Se observo durante la prueba de hermeticidad a los tanques enterrados de almacenamiento de combustible que al presurizar estos con aire inicialmente a 1.28 kg/cm^2 hasta 1.78 kg/cm^2 solamente uno de los tres tanques a los cuales se realizó la prueba pudo mantener una reducción de presión menor al 5% durante un tiempo establecido previamente, una causa posible de que los tanques no lograron presurizar exitosamente es que están interconectados, motivo por el cual se abandonaron las pruebas debido a que es necesario entrar a los tanques y sellar internamente las conexiones entre ellos a fin de poder presurizarlos y realizar las pruebas de presión, esta prueba no es determinante en cuanto a concluir si hay presencia de contaminación por derrames de DIESEL en el período de

servicio de dichos tanques y aun después de quedar fuera de servicio. El análisis de BTEX en las muestras obtenidas, se efectuaron mediante lo establecido en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 “Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación”. Después de haber preparado cada una de las muestras se procedió a su análisis por cromatografía fase gas, obteniendo los respectivos cromatogramas para su análisis, concluyendo que no se encontraron concentraciones superiores a 100mg/L en ninguna de las muestras, lo cual es indicativo que se está dentro de los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos de uso industrial.

Con respecto al destino final de los tanques enterrados, se debe tomar en cuenta las implicaciones relacionadas al efectuar alguna de las alternativas presentadas de las cuales destacan tres, retiro de los tanques, relleno de los tanques, rehabilitación de los tanques. Se recomienda no retirar los tanques del sitio donde están debido a que pueden presentarse problemas de estabilidad de las estructuras civiles que se encuentran encima de los tanques, no es recomendable la rehabilitación de los tanques enterrados debido al tipo de sustancia que contenían que es altamente toxico y peligroso. En caso de que se opte por clausurar definitivamente los tanques podrá implementarse un relleno fluido el cual asegurará la estabilidad de la estructura de los tanques y de las construcciones civiles encima de ellos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de los materiales y residuos peligrosos ha provocado en el mundo un grave problema de contaminación de los suelos y los cuerpos de agua.

En México, la industria del petróleo en su conjunto ha tenido un impacto negativo en materia ambiental. Debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo, no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los productos petroquímicos básicos. El problema de los suelos contaminados con hidrocarburos radica en que hasta hace pocos años no existía conciencia del grado de la dificultad y el costo que representa la remediación de los suelos y cuerpos de agua contaminados por la sociedad, por lo que es más caro remediar que prevenir.

El desarrollo económico en México ha favorecido la concentración territorial de la industria. Hasta 1970 no se aplicó ningún criterio ambiental para su desarrollo, aunque ya se tenían indicios de un impacto ambiental creciente sobre la contaminación ambiental y la generación de residuos. Las políticas de bajos precios en PEMEX provocaron un uso más frecuente del petróleo y por lo tanto un crecimiento más acelerado de la demanda energética. A mediados de la década de los 70, hubo una reestructuración masiva de la industria, debido al crecimiento petrolero por lo que la petroquímica básica se convirtió en una de las actividades con mayor contribución a la contaminación, al igual que la producción de fibras sintéticas, resinas, fertilizantes, plásticos, pinturas, pigmentos y gases industriales que pasaron a ser las actividades más relevantes por su impacto potencial al ambiente.

En nuestro país las auditorías ambientales surgen de la necesidad de verificar las emisiones y la contaminación de agua y suelo por la industria ya instalada, destacando que México cuenta con una escasa y reciente experiencia en la aplicación de este instrumento de política ambiental. El único informe disponible al público se elaboró en 1995, en el cual la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) reporta que en el lapso de 1992 a 1994, se realizaron 179 auditorías ambientales y estuvieron en proceso otras 221.

La Ley General del equilibrio Ecológico y protección al Ambiente (LGEEPA) menciona las actividades que pueden causar desequilibrio ecológico

particularmente para las actividades petroleras debido a obras hidráulicas, vías de comunicación, oleoductos, gasoductos, etc.

La LGEEPA establece los aspectos para atender la contaminación del suelo con 11 artículos, destacando los criterios de prevención y control de la contaminación, alteración nociva en el proceso biológico de los suelos, los riesgos y problemas de salud, y el control de los residuos. Si existe la presencia de materiales o residuos peligrosos deberán llevarse a cabo acciones necesarias para recuperar o restablecer las condiciones del sitio, evitar su acumulación y que se depositen o infiltren en los suelos, así como realizar el manejo y disposición final de los mismos.

En nuestro país no existen normas con respecto a los límites permisibles de hidrocarburos en el ambiente (agua residuales y aire), y recientemente se aprobó por el Comité Consultivo Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, en sesión celebrada el 21 de mayo del 2003 y que de conformidad con el artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó el 19 de marzo de 2004, para consulta pública a efecto de que los interesados, dentro de los 60 días naturales contados a partir de la fecha de su publicación en el Diario Oficial de la Federación, la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.

En México, la PROFEPA ha manejado criterios de limpieza sobre restauración de suelos contaminados. Estos criterios se encuentran en la norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003

Se han definido aspectos relevantes para la elaboración de una guía de evaluación de daños ambientales y propuestas de restauración, destacando lo siguiente:

- Acciones de contención, evaluación y restauración de los suelos
- Decisiones de evaluar propuestas de restauración
- Criterios en el muestreo de suelos
- Evaluación de Técnicas y preparaciones comerciales para destruir o transformar los contaminantes presentes en los suelos.

Tabla 1.1. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE ¹ (mg/kg base seca)		
	Agrícola ²	Residencial ³	Industrial
LIGERA	200	200	500
MEDIA	1,200	1,200	5,000
PESADA	3,000	3,000	6,000

*NOM-138-SEMARNAT/SS-2003

Principales Funciones del suelo

El suelo y subsuelo constituyen un recurso natural difícilmente renovable que desempeña funciones como medio filtrante durante la recarga de los mantos acuíferos y la protección de los mismos es el lugar donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y las redes tróficas, además de ser el espacio donde se realizan las actividades agrícolas, ganaderas y ser el soporte de la vegetación (Saval 1995).

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrogeno, de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo.

Se consideran como una mezcla compleja de gases, líquidos y sólidos, existiendo cantidades combinadas de nitrógeno, oxígeno y azufre, además de contener compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales. El petróleo tiene una proporción de 76% a 86% de carbono y 10 a 14% de hidrogeno. Los hidrocarburos se clasifican de la siguiente forma:

- Hidrocarburos biogénicos: éstos son sintetizados por casi todas las plantas, animales terrestres y marinos, incluyendo a la microbiota, bacterias, plancton marino, diatomeas, algas y plantas superiores (Bedair y Al-Saad 1992).
- Hidrocarburos antrópicos: éstos son introducidos como resultado de la actividad humana. Los procesos de combustión industrial contribuyen con la contaminación debido principalmente al humo generado por la

quema de carbón, combustibles fósiles y petróleo refinado, las actividades de transporte, las descargas de aguas municipales y los derrames son algunas de las principales fuentes de estos contaminantes. (Bidleman et al. 1990).

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), producidos por las actividades humanas, están formados por dos o más anillos de benceno fusionados, los cuales difieren de en el número y posición de anillo aromático.

Su importancia radica en la movilidad debido a su peso molecular: los HAP de alto peso molecular son relativamente inmóviles, y por ende, de baja volatilidad y solubilidad. Algunos compuestos como naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, antraceno, fluoranteno y pireno por mencionar algunos, son considerados como contaminantes prioritarios por la agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), la Organización Mundial de la salud (OMS) y la Comunidad Europea (CE) debido a sus efectos carcinogénicos (Menzie et al., 1992). Estos compuestos se encuentran distribuidos en el suelo, mar, sistemas pluviales y sedimentos y su presencia se ha atribuido principalmente a los derrames de petróleo y descargas de plantas petroquímicas, aun cuando se puede deber al transporte atmosférico por los aportes de la combustión. Las características determinantes de los hidrocarburos en el ambiente son las siguientes: densidad, presión de vapor, coeficiente de partición de suelo, polaridad, electronegatividad, hidrofobicidad, (característica más importante usada para asegurar lo siguiente: a) movilidad química, b) estabilidad química, c) acumulación química, d) bioacumulación química y e) porción química en el ambiente), y solubilidad en agua. La alta solubilidad de un compuesto químico promueve su mayor movilidad, y tiene menor probabilidad de ser acumulativo, bioacumulativo, volátil y persistente. Como compuesto químico altamente soluble es propenso a ser biodegradado y metabolizado por los microorganismos, el contenido de materia orgánica del suelo o sedimento es importante en la adsorción de los compuestos orgánicos.

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas antes mencionadas. Además de las características del medio, como son la permeabilidad, estructura, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del manto freático, factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial también tienen una gran influencia. Todas las

variables en su conjunto definen el tamaño y la distribución tridimensional del frente de contaminación en una zona específica. Los compuestos orgánicos ligeros como gasolinas, aceites y petróleo crudo tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea. Los compuestos orgánicos densos, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual puede moverse en dirección del agua subterránea, contaminando así el acuífero en toda su profundidad.

Murguía y Martínez (1991) en SEMARNAP (1996), concluyeron que las propiedades físicas del suelo más afectado por derrames de hidrocarburos son:

- La estructura del suelo debido a la ruptura de los agregados
- Aumento de la retención del agua en la capa superficial
- El potencial hídrico

Probablemente el componente más importante del suelo en relación con la persistencia de sustancias tóxicas es la arcilla. La persistencia aumenta cuantas más pequeñas son las partículas debido a que aportan un área superficial mayor para la adsorción de los productos químicos.

Las propiedades químicas del suelo más afectadas por un derrame de hidrocarburos son:

- Aumento del carbono orgánico, ya que el 75% del carbono del petróleo crudo es oxidable
- Disminución de pH, debido a la acumulación del carbono orgánico y generación de ácidos orgánicos
- Aumento del Manganeseo y hierro intercambiable
- Aumento del fósforo disponible (SEMARNAP 1996)

Los efectos tóxicos de los hidrocarburos en el ambiente dependerán de:

- La cantidad y composición del petróleo
- La frecuencia y tiempo de exposición
- El estado físico del derrame
- Las características del sitio donde sucedió el derrame
- Variables ambientales como temperatura, humedad y oxígeno
- La sensibilidad de la biota específica del ecosistema impactado (SEMARNAP 1996).

El problema de la contaminación ambiental en México como consecuencia de varios siglos de actividad minera y posteriormente, debido a la industria de la química básica, petroquímica y de la refinación del petróleo, se han producido cantidades muy grandes, pero muy difíciles de cuantificar, de residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, junto con accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fugas, derrames, incendios) y la disposición clandestina e incontrolada de residuos contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (SEMARNAT, 2002). El número de sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a varios miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido. De acuerdo con datos publicados en el INEGI (2000), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 1999 fue de 25,967 km².

Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel), agroquímicos, gas LP y gas natural, entre otros este tipo de contaminación se ha agudizado a través de los años, actualmente los niveles de contaminación

han llegado a ser alarmantes. Por tal motivo, es importante realizar acciones que contribuyan al mejoramiento y remediación del ambiente y lograr una mejor calidad de vida para todos los habitantes.

El suelo es considerado como el sustrato sólido de la superficie de la tierra, en que se desarrollan las principales actividades humanas (urbanas, agrícolas, forestales, mineras, etc.), el presente trabajo representa una contribución de los esfuerzos que realiza la Facultad de Química en la resolución de problemas ambientales nacionales.

En este trabajo se utilizó una técnica para la identificación de contaminación por hidrocarburos (DIESEL) en suelos basada en la norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, además de proponer la mejor opción técnico-económica de la disposición final de tres tanques enterrados y las técnicas de remediación si es que hubiese contaminación de acuerdo a los límites máximos permisibles que marca la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 en el sitio debido a alguna fuga de los tanques.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para evaluar la posible presencia de contaminación del suelo contiguo a tres tanques enterrados, se realizaron muestreos de suelos a 1, 2, 3 metros de profundidad, en las muestras colectadas se realizaron análisis de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos (BTEX) utilizando la técnica de la EPA 8260B de cromatografía fase gas, esta técnica fue seleccionada por el tipo de compuesto que contenían los tanques enterrados. Los hidrocarburos se clasifican de la siguiente forma:

Hidrocarburos biogénicos.

Hidrocarburos antrópicos.

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

Tabla 1.1. Parámetros que influyen en el transporte de contaminantes en suelo

Parámetros del contaminante	Parámetros del suelo	Parámetros ambientales
Solubilidad	Contenido y retención de agua	Temperatura
Presión de vapor	Porosidad, densidad y permeabilidad	Precipitación
Número y tipo de grupos funcionales	Contenido de arcilla	Evapotranspiración
Polaridad	Contenido de materia orgánica	
	Profundidad de agua subterránea	

(INE: Oscar Ortíz Brito, Irina Ize Lema, y Arturo Gavilán García)

En el período de 1995 a 1997, se detectaron 161 sitios abandonados contaminados con residuos peligrosos en 18 Estados de la República. Sin embargo, se estima que el número de sitios de este tipo que contienen residuos peligrosos, es mucho mayor y se desconoce. Desde 1988, más de 27 mil empresas han cumplido con la obligación de informar la generación de residuos peligrosos. Sin embargo, se desconoce el universo de empresas generadoras que no informan y desechan sus residuos clandestinamente, y se estima que el universo potencial es mayor a 100,000 (Mosler, 2002).

1.1. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo fue:

Evaluar la posible contaminación del suelo por hidrocarburos en una empresa utilizando la técnica de la EPA 8260B de cromatografía fase gas, así como proponer la mejor opción para la disposición final de los tanques enterrados que contenían al combustible.

Para evaluar la posible contaminación por hidrocarburos se recurrió a la técnica de la EPA 8260B de cromatografía fase gas que consiste en el muestreo y análisis de suelo contiguo al tanque para determinar la posible presencia de compuestos de BTEX y concluir finalmente si los tanques presentan daños que pudieran haber provocado la pérdida de Diesel almacenado y en consecuencia la contaminación del suelo.

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Montar en el laboratorio la técnica de la EPA 8260B de cromatografía fase gas para la detección y caracterización de BETEX.
- Realizar el muestreo y análisis de hidrocarburos en suelos.
- Definición de opciones para el destino final de los tanques enterrados

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

En este capítulo se presenta brevemente la normatividad mexicana en lo que a la materia de contaminación de suelos se refiere, así mismo se revisa la normatividad sobre tanques de almacenamiento enterrados, para el retiro y disposición final de los tanques, cabe señalar que la normatividad es escasa por lo que se recurre frecuentemente a códigos y guías como referencias, y la norma oficial mexicana que define a los recipientes sujetos a presión.

2.1. NORMATIVIDAD

Las Normas oficiales Mexicanas, las cuales se dividen de la siguiente manera:

- En materia de contaminación de suelos
- En materia de recipientes sujetos a presión
- En materia de transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

Las Normas Oficiales Mexicanas que consideran lo anterior son:

- NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos en Suelos y las Especificaciones para su Caracterización y Remediación (D. O. F. 19 de marzo de 2004).
- NOM-020-STPS-2002. Que Establece los Recipientes Sujetos a Presión y Calderas – Funcionamiento – Condiciones de Seguridad (D. O. F. 30 de abril de 2002).
- NORMA Oficial Mexicana NOM-005-SCT2/1994. Que establece la Información de emergencia para el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

En cuanto a Normatividad Internacional se tienen los siguientes códigos y guías:

Códigos y Guías

- EPA/530/UST-90/005 y EPA/530/UST-90/010, en los cuales establecen procedimientos estándares para la evaluación y detección de fugas en tanques a presión.
- Guía ambiental para estaciones de servicio
- UNE109502-IN, UNE62350-1, UNE62351-1 Y UNE109501-IN. Que Establecen las Especificaciones Técnicas para la instalación de tanques enterrados.

Las fuentes fijas dedicadas a las actividades de almacenamiento y distribución de combustibles fósiles líquidos son potenciales contaminantes del suelo.

En la ciudad de México existen: 310 estaciones de servicio (gasolineras), 222 estaciones de autoconsumo y 64 módulos de autoconsumo de la ex ruta 100. La contaminación del suelo por hidrocarburos generalmente afecta la calidad de los mantos freáticos someros. (Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal. Ing. Ernesto Eduardo Trujillo Bolio, 19 de junio de 2005).

La SMA establece acciones específicas para prevenir y controlar la contaminación del suelo, a través de la política de protección al acuífero y a las atribuciones que le confiere la Ley Ambiental del Distrito Federal

Es importante señalar que también se revisó el reglamento de la ley ambiental del distrito federal en su Capítulo II, sección III que refiere a las gasolineras y estaciones de autoconsumo de combustibles específicamente en su artículo 70 que se refiere a las obligaciones que deberán cumplir los propietarios o poseedores de fuentes fijas que funcionen como gasolineras y el artículo 71 que refiere a los daños ocasionados por fuentes fijas referidas en la sección III que deberán ser reparados en los términos de la Ley y Normas Oficiales.

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS

El término «tecnología de tratamiento» implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA, 2001).

2.2.1 TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente.

El uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (Sellers 1999).

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: (i) estrategia de remediación; (ii) lugar en que se realiza el proceso de remediación, y (iii) tipo de tratamiento.

Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación. A continuación se describen con más detalle las clasificaciones anteriores (Van Deuren *et al.* 1997, Sellers 1999, EPA 2001).

Estrategia de remediación. Son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados:

-Destrucción o modificación de los contaminantes. Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.

- Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).

- Aislamiento o inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.

Lugar de realización del proceso de remediación. En general, se distinguen dos tipos de tecnología:

-*In situ.* Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.

-*Ex situ.* La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (*on site*) o fuera de él (*off site*).

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de ambos tipos de tecnología.

Tipo de tratamiento. Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento:

Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.

- Tratamientos fisicoquímicos. Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.

Tabla 2.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN *IN SITU* Y *EX SITU*

	IN SITU	EX SITU
VENTAJAS	-Permite tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar -Potencial disminución en costos	-Menor tiempo de tratamiento -Mas seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogenizar y muestrear periódicamente
DESVENTAJAS	-Mayores tiempos de tratamiento -Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo -Dificultad para verificar la eficacia del proceso	-Necesidad de excavar el suelo -Aumento en costos de Ingeniería para equipos -Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante

- Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

En la Tabla 2.2 se muestran las principales ventajas y desventajas del uso o aplicación de los métodos biológicos, fisicoquímicos y térmicos.

2.2.2 TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS (BIORREMEDIACIÓN)

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (Van Deuren *et al.* 1997).

Tabla 2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN, CLASIFICADAS DE ACUERDO CON EL TIPO DE TRATAMIENTO

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tratamientos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> -Son efectivos en cuanto a costos -Son tecnologías mas benéficas para el ambiente -Los contaminantes generalmente son destruidos -Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior 	<ul style="list-style-type: none"> -Requieren mayores tiempos de tratamiento -Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos -No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano
Tratamientos fisicoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> -Son efectivos en cuanto a costos -Pueden realizarse en periodos cortos -El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería 	<ul style="list-style-type: none"> -Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos -Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación
Tratamientos térmicos		<ul style="list-style-type: none"> -Es el grupo de tratamientos más costosos

Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras. El proceso de biorremediación incluye reacciones de oxido-reducción, procesos de sorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales (Eweis *et al.* 1998).

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o

anaerobias (sin oxígeno) (Eweis *et al.* 1998). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo (HTP), solventes (benceno y tolueno), explosivos (TNT), clorofenoles (PCP), pesticidas (2,4-D), conservadores de madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Van Deuren *et al.* 1997, Semple *et al.* 2001).

2.2.3 TECNOLOGÍAS IN SITU

Las técnicas *in situ* buscan estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Este objetivo generalmente puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y/o humedad, además del control de temperatura y pH (EPA 2001).

Bioventeo

El bioventeo es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores (Van Deuren *et al.* 1997).

Aplicaciones. Se utiliza para tratar compuestos orgánicos biodegradables semivolátiles (COS) o no volátiles. Además de favorecer la degradación de contaminantes adsorbidos, pueden degradarse COV, por medio de su movimiento a través del suelo biológicamente activo (Eweis *et al.* 1998). Se ha utilizado con éxito para remediar suelos contaminados con HTP, solventes no clorados, pesticidas y conservadores de la madera, entre algunos otros químicos (Van Deuren *et al.* 1997).

Limitaciones. Algunos factores que pueden limitar la efectividad del bioventeo son: (i) el tipo y la concentración del contaminante, (ii) falta de

nutrientes; (iii) bajo contenido de humedad y (iv) dificultad para alcanzar el flujo de aire necesario (Eweis *et al.* 1998).

Costos y tiempos de remediación. Es una tecnología en la que los tiempos de limpieza pueden variar desde algunos meses hasta varios años, y sus costos de operación varían entre 10 y 70 USD/m³. Esta tecnología no requiere de equipo caro, pero los costos pueden variar en función de la permeabilidad del suelo, espacio disponible, número de pozos y velocidad de bombeo (Van Deuren *et al.* 1997).

Bioestimulación

La bioestimulación implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos, y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos *in situ* (Van Deuren *et al.* 1997).

Aplicaciones. Se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con gasolinas, COV, COS y pesticidas (Alexander 1994).

Limitaciones. Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O₂. Otros factores que pueden limitar su aplicación, incluyen: (i) que el tipo del suelo no favorezca el crecimiento microbiano; (ii) incremento en la movilidad de los contaminantes; (iii) obstrucción en los pozos de inyección provocada por el crecimiento microbiano.

Costos y tiempos de remediación. La limpieza de una pluma de contaminación, puede tomar varios años. Su costo oscila entre 30 y 100 USD/m³. La naturaleza y profundidad de los contaminantes y el uso de bioaumentación puede aumentar sus costos (Van Deuren *et al.* 1997).

Biolabranza

Durante el proceso de biolabranza, la superficie del suelo contaminado es tratado en el mismo sitio por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) se controlan para optimizar la velocidad de

degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados (Riser-Roberts 1998). La diferencia entra la biolabranza y el composteo, es que en la biolabranza, se mezcla el suelo contaminado con suelo limpio, mientras que el composteo generalmente se realiza sobre el suelo (Van Deuren *et al.* 1997).

Aplicaciones. Los contaminantes tratados con éxito por biolabranza, incluyen diesel, gasolinas, lodos aceitosos, PCP, creosota y coque, además de algunos pesticidas y HTP (Alexander 1994). Es una tecnología de gran escala, que se practica en los Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Holanda, Suiza, Dinamarca, Francia y Nueva Zelanda (Reiser-Roberts 1998).

Limitaciones. La biolabranza debe manejarse con cuidado para prevenir la contaminación de acuíferos, superficies de agua, aire o en la cadena alimenticia. El mayor problema es la posibilidad de lixiviados de los contaminantes hacia el suelo y el agua. Otra limitante para su utilización, es que por la incorporación de suelo contaminado en suelo limpio, se genera un gran volumen de material contaminado. No es recomendable su uso para contaminantes diluidos, ni tampoco cuando no todos los contaminantes son biodegradables (Van Deuren *et al.* 1997).

Costos y tiempos de remediación. Es una tecnología de mediano a largo plazo. El costo para su aplicación en desechos peligrosos oscila entre 30 y 70 USD/ m³ (Van Deuren *et al.* 1997, Reiser-Roberts 1998).

Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*. Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización (Van Deuren *et al.* 1997, Hutchinson 2001).

La rizodegradación se lleva a cabo en el suelo que rodea a las raíces. Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica.

Durante la fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación), y posteriormente éstos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción). En la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces-suelo (Sellers 1999). La fitodegradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación.

Aplicaciones. Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAP; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn (Sellers 1999). Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua.

Limitaciones. Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación: (i) el tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar; (ii) altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas; (iii) puede depender de la estación del año; (iv) no es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos; (v) la toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden movilizarse o bioacumularse en animales.

Costos y tiempos de remediación. Se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado con Pb (50 cm de profundidad) puede costar entre 24,000 y 40,000 USD/ha (Van Deuren *et al.* 1997).

2.2.4 TECNOLOGÍAS EX SITU

Los procesos de biorremediación *ex situ*, incluyen: (i) procesos de biodegradación en fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes; y (ii) de biodegradación en fase sólida, en donde los suelos son colocados en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas

impermeables (biolabranza), en donde se agrega agua y nutrientes (EPA 2001).

Biorremediación en fase sólida (composteo)

El composteo es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso. Los sistemas de composteo incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas (Alexander 1994, Eweis *et al.* 1998, Semple *et al.* 2001).

Las pilas estáticas (biopilas) son una forma de composteo en el cual, además de agentes de volumen, el sistema se adiciona con agua y nutrientes, y se coloca en áreas de tratamiento (que incluyen alguna forma de aireación y sistemas para coleccionar lixiviados). Las pilas de suelo generalmente se cubren con plástico para controlar los lixiviados, la evaporación y la volatilización de contaminantes, además de favorecer su calentamiento (Eweis *et al.* 1998).

Aplicaciones. El composteo se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con PCP, gasolinas, HTP, HAP. Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y toxicidad de explosivos (TNT). El uso de estrategias de composteo, se ha adoptado seriamente hasta los últimos tres a cinco años (Van Deuren *et al.* 1997, Semple *et al.* 2001).

Limitaciones. Algunas limitaciones del proceso son: (i) necesidad de espacio; (ii) necesidad de excavar el suelo contaminado, lo que puede provocar la liberación de COV; (iii) incremento volumétrico del material a tratar y (iv) no pueden tratarse metales pesados (Van Deuren *et al.* 1997).

Costos y tiempos de remediación. El costo del composteo está en función de: (i) la cantidad y fracción de suelo a tratar; (ii) disponibilidad de agentes de volumen; (iii) tipo de contaminantes y proceso; (v)

necesidad de tratamientos previos y/o posteriores y (vi) necesidad de equipos para el control de COV. Es una tecnología que puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses. Los costos típicos se encuentran entre 130 y 260 USD/m³ (Riser-Roberts 1998).

2.2.5 TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN FISICOQUÍMICAS

Los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.

Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. Sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición (Van Deuren *et al.* 1997). Mientras que las tecnologías de biorremediación son principalmente métodos destructivos, las fisicoquímicas incluyen las tres estrategias básicas de acción sobre el contaminante (destrucción, separación e inmovilización).

Al igual que el resto de las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse *in situ* o *ex situ*. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías se aplican *in situ*. Entre las tecnologías fisicoquímicas para tratamiento *in situ*, se encuentra la remediación electrocinética (RE), el lavado de suelos (LS), la extracción por solventes (ES), la extracción de vapores (EV) y la solidificación/estabilización (S/E).

2.2.5.1 Remediación electrocinética (RE)

La remediación electrocinética es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones). Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre un electrodo positivo y uno negativo (Van Cauwenberghe 1997, Paillat *et al.* 2000).

Los iones metálicos, iones amonio y compuestos orgánicos con carga positiva, migran hacia el cátodo; mientras que los aniones como el cloruro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente se mueven hacia el ánodo (EPA 2001).

Aplicaciones. Pueden tratarse contaminantes orgánicos polares y metales pesados. Se ha utilizado a nivel piloto para tratar contaminantes inorgánicos como Pb, Ni, Hg, As, Cu, Zn y Cr; además de orgánicos como BETX. Es una tecnología que puede emplearse para mejorar otras tecnologías de remediación como la biorremediación y la remoción de contaminantes no solubles (Sellers 1999).

Limitaciones. Su eficiencia disminuye en medios con un contenido de humedad menor 10%; la presencia de ciertos metales o materiales aislados provocan variaciones en la conductividad eléctrica del suelo; depósitos minerales (alta conductividad eléctrica) pueden provocar problemas; valores extremos de pH y reacciones de oxido-reducción pueden disminuir su eficiencia y formar productos indeseables.

Costos. Los costos varían en función de la cantidad de suelo a tratar, su conductividad, tipo de contaminante y tipo de proceso. Los costos netos son cercanos a 50 USD/m³.

2.2.5.2 Lavado de suelos, extracción por solvente e inundación de suelos

Estas tres tecnologías separan contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo por medio de un líquido de extracción. El fluido líquido requiere de un tratamiento posterior para remover o destruir los contaminantes. Cada una de estas tecnologías relacionadas entre sí, trabajan de manera diferente sobre los contaminantes (Sellers 1999).

- Lavado de suelos. Los contaminantes sorbidos en las partículas finas del suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas en un suelo excavado. De esta manera se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo.

- Extracción por solventes. Este tipo de procesos, utiliza solventes orgánicos para disolver los contaminantes y así removerlos del suelo.

- Inundación del suelo. Grandes cantidades de agua, en ocasiones con algún aditivo, se aplican al suelo o se inyectan en cuerpos de agua cercanos, para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada, favoreciendo así el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación, debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada (Sellers 1999, EPA 2001).

Aplicaciones. El lavado de suelos se ha utilizado con éxito para tratar suelos contaminados con hidrocarburos, HAP, PCP, pesticidas y metales pesados. Por medio de inundación, pueden recuperarse compuestos inorgánicos (metales), y tratarse COV, COS, gasolinas y plaguicidas.

Limitaciones. Las soluciones utilizadas y los solventes pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo; es difícil tratar suelos poco permeables o heterogéneos; los surfactantes usados en el lavado pueden adherirse al suelo y disminuir su porosidad; los fluidos pueden reaccionar con el suelo reduciendo la movilidad de los contaminantes. En general, se requiere tratar previamente los suelos con alto contenido de materia orgánica y es necesario tratar los vapores generados.

Costos y tiempos de remediación. La inundación y el lavado son tecnologías de corto a mediano plazo. Los costos para la inundación oscilan entre 20 y 200 USD/m³, y para el lavado el costo promedio es de 150 USD/m³.

2.2.6 FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN

El comportamiento de un contaminante en el suelo, así como la efectividad de una tecnología de remediación, están determinados por una variedad de factores que interactúan de manera compleja y que dependen de las características propias del contaminante así como de los suelos. Por consiguiente se deberán tomar en cuenta todos estos factores, para la selección adecuada de la tecnología de remediación con buenas perspectivas de éxito. (Tecnologías de remediación para suelos contaminados; Tania Volke Sepúlveda y Juan A. Velasco Trejo)

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

El suelo constituye un recurso natural que desempeña diversas funciones en la superficie de la Tierra, proporcionando un soporte mecánico así como nutrientes para el crecimiento de plantas y microorganismos.

La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos.

Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo. El aire y el agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25% a 50% del volumen total. La proporción relativa de aire/agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1% (Eweis *et al.* 1998).

Todos estos factores definen el tipo de suelo, que junto con las condiciones particulares de un sitio frecuentemente pueden limitar la selección de un proceso de tratamiento en particular. Por otra parte, la posibilidad de usar una tecnología de tratamiento, puede eliminarse con base en la clasificación del suelo u otras características propias de éste (Van Deuren *et al.* 1997). A continuación se describen algunos de los datos del suelo, que pueden obtenerse con relativa facilidad y que controlan la eficiencia de una tecnología de remediación.

Tamaño de partícula. Los suelos se clasifican en función de su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (< 0.002 mm), los sedimentos (0.002 - 0.05 mm) y las arenas (0.05 - 2.0 mm). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. En general, los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar (Van Deuren *et al.* 1997, Eweis *et al.* 1998).

Heterogeneidad. Un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de tecnologías *in situ* que dependan del flujo de un fluido. Pueden crearse canales indeseables de fluidos en las capas arenosas y

arcillosas, dando como resultado tratamientos inconsistentes (Van Deuren *et al.* 1997).

Densidad aparente. Es el peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo agua y espacios. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. Es útil para realizar cálculos para el transporte del material (Van Deuren *et al.* 1997).

Permeabilidad. Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías *in situ* (Sellers 1999). En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación.

pH. Este determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (Alexander 1994). La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

Humedad. La humedad del sitio a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de biorremediación, así como provocar problemas durante la excavación y transporte, además de aumentar costos durante el uso de métodos de remediación térmicos (Van Deuren *et al.* 1997).

Materia orgánica. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico, disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la eficiencia de ciertas tecnologías (extracción de vapores, lavado de suelo) (Van Deuren *op cit.*, Eweis *op. cit.*).

2.3.1 CROMATOGRAFÍA DE GASES

Se ha definido a la cromatografía como un método físico de separación en el cual los componentes a separar se distribuyen entre dos fases, una de las cuales constituye la fase estacionaria, de gran área superficial, y la otra es un fluido (fase móvil) que pasa a través o a lo largo de la fase estacionaria.

La fase estacionaria puede ser un sólido o un líquido dispuesto sobre un sólido que actúa como soporte, de gran área superficial. La fase móvil es un fluido (puede ser gas, líquido o fluido supercrítico) que se usa como portador de la mezcla.

En la cromatografía ocurren dos fenómenos muy importantes y que son prácticamente los rectores del proceso de separación: la adsorción y la absorción.

La **adsorción** es la retención de una especie química en los sitios activos de la superficie de un sólido, quedando delimitado el fenómeno a la superficie que separa las fases o superficie interfacial. Esta retención superficial puede ser física o química. La adsorción depende de la naturaleza de la sustancia adsorbida, de la temperatura, de la naturaleza y estado de subdivisión del adsorbente, y de la concentración.

La **absorción** es la retención de una especie química por parte de una masa y depende de la tendencia que tiene ésta a formar mezcla o reaccionar químicamente con la misma.

2.3.1.1 Columna

La columna en un cromatógrafo es el lugar donde ocurre la separación. Los materiales con los cuales generalmente se pueden elaborar las columnas son: cobre, aluminio, acero inoxidable, vidrio ó teflón. El relleno puede ser un sólido, ó un líquido recubriendo un sólido. Se pueden clasificar las columnas según el propósito del proceso cromatográfico:

- Empacadas
 - Analítica
 - Preparativas
- Capilares
 - W.C.O.T. (Wall Coated Open Tubular)
 - S.C.O.T. (Support Coated Open Tubular)

2.3.1.2 Factores que Afectan la Eficiencia de una Columna

- Longitud de la Columna
- Diámetro de la Columna (1/4", 1/8", 1/16" de diámetro externo)
- Tamaño de las partículas del relleno
- Naturaleza de las fases
- Cantidad de fase estacionaria
- Temperatura de la columna
- Velocidad del gas portador
- Cantidad de muestra inyectada
- Material del cual está elaborada la columna
- Enrollado de la columna

2.3.1.3 Gas Portador

El gas portador cumple básicamente dos propósitos: transportar los componentes de la muestra y crear una matriz adecuada para el detector.

Un gas portador debe reunir ciertas condiciones:

- Debe ser inerte para evitar interacciones (tanto con la muestra como con la fase estacionaria)
- Debe ser capaz de minimizar la difusión gaseosa
- Fácilmente disponible y puro
- Económico
- Adecuado al detector a utilizar

2.3.1.4 Detectores

Un detector es un dispositivo para revelar la presencia de las sustancias eluidas a la salida de la columna cromatográfica.

El detector es un dispositivo capaz de convertir una propiedad física, no medible directamente, en una señal elaborable y ofrecernos información sobre la naturaleza y magnitud de la propiedad física. En cromatografía un detector funciona comparando una propiedad física entre el gas portador puro y el mismo gas portador llevando cada uno de los componentes que previamente se han separado en la columna, esta acción se traduce en una señal tipo eléctrica, que posteriormente se amplificará mediante un registrador gráfico ó integrador permitiendo indicar el momento que salen de la columna los componentes.

2.3.1.5 Detectores más usados en Cromatografía de Gases

- *Detector de Conductividad Térmica.* Mide la conductividad térmica del gas portador, ocasionada por la presencia de sustancias eluidas.
- *Detector de Ionización a la Llama.* Basado en la medida de las variaciones de la corriente de ionización en una llama oxígeno-hidrógeno debido a la presencia de sustancias eluidas.
- *Detector de Captura Electrónica.* Basado en la electronegatividad de las sustancias eluidas, y su habilidad para formar iones negativos por captura de electrones.
- *Detector de Fotometría a la Flama.* Basada en la medida de la intensidad de la emisión molecular de la fluorescencia de heteroátomos en las moléculas orgánicas.
- *Detector de Ionización de Flama Alcalina*
- *Detector de Espectrometría de Masas*

2.3.1.6 Cromatograma y su Interpretación

Los siguientes términos son los utilizados en un cromatograma típico y recomendados por la IUPAC:

- Línea Base
- Pico Cromatográfico
- Base del Pico
- Área del Pico
- Altura del Pico
- Ancho del Pico
- Ancho del Pico a la mitad de la Altura
-

-Altura del Pico: Medida que se efectúa, para cada pico de interés, desde la línea base hasta el máximo del pico.

Los errores de malas mediciones se pueden atribuir a:

- Insuficiente Resolución
- Variaciones en la línea base
- Picos extremadamente pequeños

Las desviaciones en la línea base se pueden compensar por interpolación de ésta entre el principio y el final del pico

-Área del Pico.

Existen varias técnicas para la determinación del Área de un Pico Cromatográfico:

- Integración Manual
 - Métodos Geométricos
 - *Triangulación:* En esta técnica se trazan líneas tangentes a cada lado del pico. La altura se mide desde la línea base hasta la intersección de las dos tangentes. El ancho se mide tomando la intersección de las dos líneas tangentes con la línea base. Luego se utiliza la fórmula $A = 1/2 * \text{Altura del Pico} * \text{Base del Pico}$. Las limitaciones de esta técnica están en el trazado de las líneas tangentes, un pequeño error al trazar las tangentes puede afectar la medida de la altura.

- *Altura por ancho a la mitad de la Altura:*
 - Métodos Mecánicos
 - *Planimétricos*
 - *Corte y Pesada:* Esta técnica requiere recortar el pico del cromatograma, luego pesarlo en una balanza analítica. El recorte y pesada depende mucho de la habilidad del operador. Pueden introducirse errores por cambios en la humedad del papel, la grasa de las manos del operador, homogeneidad del papel. Generalmente se recomienda utilizar una fotocopia del cromatograma para no destruir el original.
 - Integración Automática
 - Electromecánica
 - Electrónica

2.3.1.7 Análisis Cualitativo

Los procedimientos para identificación de los picos cromatográficos se dividen en dos categorías:

- Identificación Cromatográfica
 - Por Datos de Retención
 - Por Serie Homólogas (Índices de Retención de Kovacs)
- Identificación No Cromatográfica
 - Análisis Clásicos
 - Identificación por:
 - Adición de Estándar
 - Formación de Derivados
 - Sustracción de un Componente
 - Identificación con Técnicas Auxiliares: UV, IR, MS, RMN

2.3.1.8 Análisis Cuantitativo

Existen varios métodos para cuantificar un pico cromatográfico:

- Normalización de Área
- Normalización de Área con Factores de Respuesta
- Estandarización Externa
- Estandarización Interna

CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO

Se tienen tres tanques enterrados de una capacidad aproximada de 10 mil litros que anteriormente eran utilizados para almacenar diesel. Actualmente, ante el cambio de combustible a gas natural, los tanques antes mencionados no tienen ningún uso. Interesados en la protección del ambiente, se desea eliminar cualquier sospecha sobre la existencia de alguna posible fuga de diesel de los tanques de almacenamiento y por consiguiente alguna contaminación del suelo. Debido a esto realizaron pruebas para determinar si existieron o no fugas (de diesel) de los tanques y si hubo o no contaminación por hidrocarburos (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos, BTEX) en el suelo aledaño a los tanques. Asimismo se realizó un estudio técnico que fundamenta la toma de una decisión sobre el destino final de los tanques enterrados.

El proyecto propuesto se ha dividido en tres actividades y cada una de ellas en tres subactividades las cuales se presentan en la tabla presentada a continuación:

Pruebas de hermeticidad de tanques
Inspección e inventario de accesorios y líneas conectadas a los tanques
Preparación de los tanques y accesorios para realizar pruebas de hermeticidad
Pruebas de hermeticidad en tres tanques enterrados
Muestreo y análisis de hidrocarburos en suelos
Rompimiento de piso de concreto y reparación del mismo al final de los muestreos
Perforación de 9 pozos de muestreo hasta 3 m de profundidad
Análisis de BTEX en 27 muestras de suelos
Estudio conceptual para definir el destino final de los tanques enterrados
Revisión de normatividad nacional e internacional relacionada
Revisión documental de prácticas nacionales e internacionales para el manejo de tanques enterrados en desuso
Evaluación de opciones para el caso particular de Ricolino

Las actividades son independientes unas de otras. A continuación se describe cada una y sus respectivas subactividades.

3.1. PRUEBAS DE HERMETICIDAD DE TANQUES

Con el objetivo de determinar si los tres tanques que contenían combustible diesel instalados en el subsuelo de la fábrica tenían fugas, realizaron pruebas de presión a dichos tanques para asegurar su integridad mecánica así como la ausencia de rupturas que puedan haber generado una contaminación del combustible al subsuelo.

3.1.1 Alcance de la actividad

Sellado superficial y presurización de los tanques aplicando una prueba derivada de la NOM-020-STPS-2002 para determinar la existencia de fugas.

NOTA: Los tanques sometidos a prueba de presión, no lo son de acuerdo con la siguiente definición:

Recipiente sujeto a presión: aparato construido para operar con fluidos a presión diferente a la atmosférica, proveniente dicha presión de fuentes externas o mediante la aplicación de calor desde una fuente directa, indirecta o cualquier combinación de éstas.

3.1.2 Definiciones.

La norma NOM-020-STPS-2002 define los recipientes sujetos a presión en su apartado 2.2.1, como aquellos que cumplan con:

- a. Que su sección transversal más amplia sea menor de 15.2 cm. sin importar la longitud del recipiente, y que además contenga fluidos no peligrosos;
- b. Que trabajen con agua, aire y/o fluidos no peligrosos, que su temperatura de operación no exceda de 70 °C y que la presión de calibración del dispositivo de seguridad sea inferior a 5.0 kg/cm². Los equipos que trabajen a vacío sí requieren autorización de funcionamiento;
- c. Que se destinen a contener líquidos criogénicos, cuyo volumen sea menor a 1m³, su diámetro no exceda de 100 cm. en la sección más amplia del recipiente interior, y la presión de calibración del dispositivo de seguridad se encuentre entre 0 y 5.0 kg/cm²;

- d. Que trabajen interconectados en una misma línea de proceso donde la presión de operación del conjunto de equipos, y la de cada uno de los equipos, se encuentre entre 0.3 y 2.0 kg/cm² de presión manométrica, y al final de la línea de proceso se encuentren abiertos a la atmósfera;
- e. Que sean receptores de aire asociados con los sistemas de frenos de equipo móvil.

La prueba neumática para un recipiente a presión según la norma NOM-020-STPS-2002 en el apartado 9.1.3 indica que:

Esta prueba sólo puede ser aplicada en recipientes sujetos a presión en donde la presión de calibración de su dispositivo de seguridad sea igual o menor de 10 kg/cm²; que su capacidad volumétrica no sea superior a 10 m³; que la presión interna máxima sea al menos de 20 kg/cm² (tomando como referencia los espesores reales del equipo) y el fluido que maneje sea exclusivamente aire. La prueba se debe efectuar con una variación máxima de 1°C de la temperatura en el recipiente sujeto a presión y con las medidas de seguridad para garantizar que no existan riesgos a las instalaciones ni al personal.

La prueba consiste en someter al recipiente sujeto a presión, sin estar en funcionamiento, desconectado de sus partes eléctricas, mecánicas y neumáticas hasta la primera brida no soldada, con un graficador de presión o manómetro conectado al recipiente y utilizando aire o gas inerte y a una temperatura no mayor de 40°C, a un valor de presión de prueba que debe estar entre 10% y 15% por arriba del valor de la presión de calibración del dispositivo de seguridad, y se debe aplicar el siguiente procedimiento genérico:

- a. Determinar el valor de la presión de prueba;
- b. Al llegar al valor de la presión de prueba, bloquear el suministro de presión; esperar al menos 15 minutos y observar. Cualquier comportamiento del equipo que a juicio del inspector o de la unidad de verificación represente un riesgo (abombamientos, deformidades o fugas, por ejemplo) será motivo para suspender la prueba y determinar el resultado de ésta como no satisfactoria;
- c. Si existe decremento de presión de más del 5% del valor de la presión de prueba, ésta se considerará no satisfactoria.

Nota: Esta prueba es considerada de alto riesgo, por lo que se recomienda realizar un análisis de los riesgos que implica optar por esta opción. El patrón asume la responsabilidad de la seguridad de los que intervienen durante su realización.

3.1.3 Inspección e inventario de accesorios y líneas conectadas a los tanques

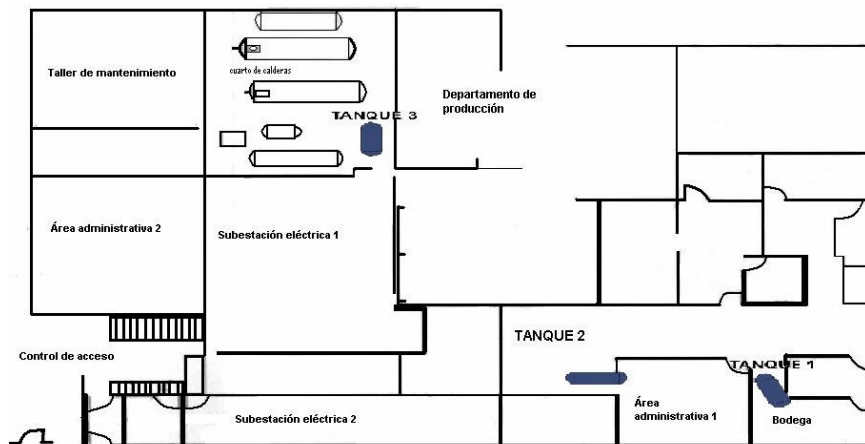
Se realizó una inspección en cada uno de los tanques verificando que sus conexiones, líneas visibles y accesorios estuviesen clausuradas y en caso contrario se les colocaron tapones roscados.

3.1.4 Preparación de los tanques y accesorios para realizar pruebas de hermeticidad

La preparación de los tanques se efectuó mediante el siguiente procedimiento:

3.1.4.1 PROCEDIMIENTO

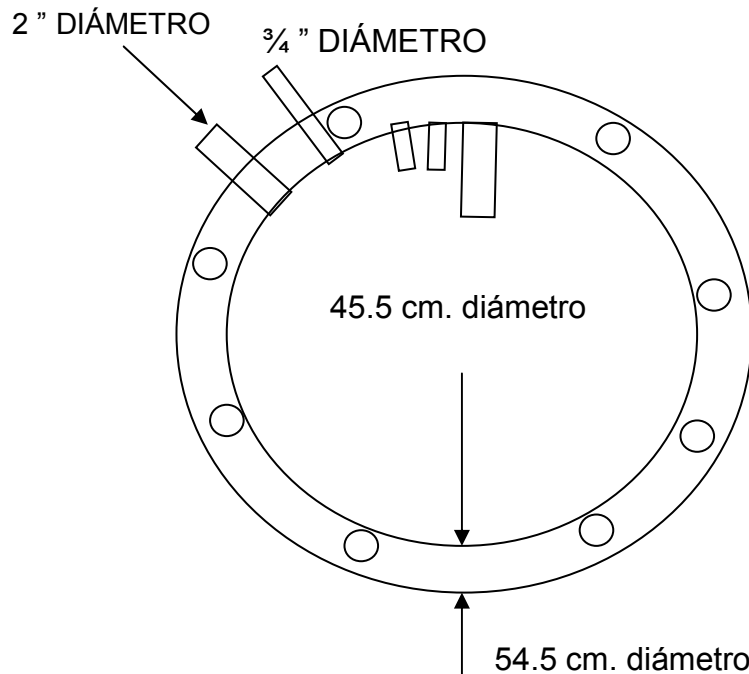
Se tomaron las dimensiones de tapas y accesorios de cada uno de los tanques.



Figuras 1. Ubicación esquemática de los tanques

Una vez obtenido el material necesario para la preparación del sellado de los tanques, se procedió al barrenado de bridas ciegas y al barrenado de las bridas de la entrada de cada tanque.

Se colocaron los accesorios, tapones, sellos de neopreno adheridos con silicón y bridas ciegas a cada una de las entradas de los tanques de acuerdo al siguiente croquis:



Figuras 2. Dimensiones de las tapas de los tanques

Cabe mencionar que antes de colocar las tapas para sellar cada uno de los tanques fue necesario esperar por treinta minutos el secado de las capas de silicón.

Pruebas de hermeticidad en tres tanques enterrados.

El suministro de aire se tomó de una línea de aire de proceso, la presión suministrada en dicha línea es de 7 kg/cm^2

Se procedió a presurizar el tanque 3, ubicado en cuarto de calderas. Se presurizó con aire inicialmente a 1.28 kg/cm^2 abs. Se detectaron fugas con jabonadura y se corrigieron. El criterio utilizado para la prueba fue de 1.5 veces la presión de operación (P_{OP}) de acuerdo a la ecuación siguiente.

$$P_{OP}=(0.78+0.4)*1.5 = 1.77 \text{ kg/cm}^2$$

Se presurizó nuevamente a 1.28 kg/cm^2 y posteriormente se incrementó la presión hasta 1.78 kg/cm^2 , se mantuvo a dicha presión por **15 minutos** y se verificó que no hubiera fugas, el tanque continuó presurizado durante 40 minutos. No hubo una reducción de la presión mayor al 5% durante ese tiempo.

Dado que la prueba consistía en determinar si los recipientes presentaban fugas o no, la prueba no se realizó en estricto apego a la norma, por razones de seguridad, sin embargo se considera una prueba satisfactoria y se afirma **que el tanque 3 no presenta fugas**.

Posteriormente se procedió a presurizar el tanque 2. El tanque no se pudo presurizar.

Se selló el tanque 1 para evitar que el aire escapara por éste pues ambos tanques están interconectados. Se intentó nuevamente presurizar el tanque y no se logró. Se continuó el intento de presurización con el tanque 1, manteniendo el tanque 2 sellado, pero tampoco se pudo presurizar.

Se abandonaron las pruebas debido a que es necesario entrar a los tanques y sellar internamente las fugas a fin de poder presurizarlos y realizar las pruebas de presión. Sin embargo, dichas actividades no se encuentran dentro de los alcances del presente trabajo.

3.2. MUESTREO Y ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS EN SUELOS

3.2.1 ROMPIMIENTO DE PISO DE CONCRETO Y REPARACIÓN DEL MISMO AL FINAL DE LOS MUESTREOS

El rompimiento del piso se efectuó mediante una sierra circular con un disco de corte, la herramienta integraba un suministro de agua que evitaba en lo posible la dispersión de polvos que se provoca al ir abriendo la capa superficial del piso, para el rompimiento del concreto presente se utilizó marro y cincel, se marcaron y horadaron cuadros de 15 cm. por lado.

Posterior a la toma de muestra se reparó el suelo con un terminado rústico, señalando cada punto perforado con cintas de prevención y conos de señalamiento con el fin de evitar accidentes.

Durante los tres días de perforación se horadaron 10 puntos, tres de ellos se clausuraron ya que en el suelo se encontraban piedras de gran tamaño que no permitían la perforación, de los 7 puntos restantes se tomaron 21 muestras.

3.2.2 PERFORACIÓN DE 7 POZOS DE MUESTREO HASTA 3 m DE PROFUNDIDAD

Se horadaron 10 puntos, teniendo éxito en 7, por cada punto de muestreo abierto se efectuaban 3 tomas de muestra a una profundidad de 1 metro, 2 metros y 3 metros (los tanques tienen una profundidad de 1.5 m.). Las muestras colectadas en frascos herméticos se rotularon en el sitio y se elaboraron las cadenas de custodia correspondientes, el transporte al laboratorio para su análisis se efectúa el mismo día que se toma la muestra. La localización de los puntos de muestreo es la siguiente:

Tanque 1 y punto de muestreo 1

El punto de muestreo 1 se localiza a 3.70 metros de distancia del tanque 1.

Tanque 2 y punto de muestreo 7

Tanque 2, el punto de muestreo 7 se ubica a 2.40 metros de distancia de la tapa del tanque.

Tanque 3 y puntos de muestreo 4, 5 y 6

Tanque 3, el punto de muestreo 4 se localizó a 1.40 metros de distancia del tanque tomando como referencia el centro de la tapa de dicho tanque. El punto de muestreo 5 se encuentra localizado, con respecto al centro de la tapa del tanque 3, a 4.30 metros de distancia, medidos verticalmente, y a 1.57 metros de forma horizontal, el punto de muestreo 6 está localizado a 6.70 metros de distancia, medidos verticalmente tomando como referencia el centro de la tapa de dicho tanque.

Cada una de las 21 muestras tomadas fueron colocadas en frascos de vidrio de boca ancha, etiquetados y sellados en el sitio de muestreo para su traslado al laboratorio, el traslado al laboratorio se efectuó el mismo día de la toma de muestra y se resguardaron en un cuarto frío a una temperatura de 4°C para su análisis posterior.

Tabla 3.1. Clave de las muestras de suelo colectadas

Punto de muestreo	Profundidad de colecta de muestra (m)	Clave asignada a la muestra
1	1	1
1	2	3
1	3	5
2	1	1 A
2	2	2 A
2	3	3 A
3	1	1 B
3	2	2 B
3	3	3 B
4	1	1 C
4	2	2 C
4	3	3 C
5	1	1 D
5	2	2 D
5	3	3 D
6	1	1 AA
6	2	2 AA
6	3	3 AA
7	1	1 E
7	2	2E
7	3	3E

3.2.3 ANÁLISIS DE BTEX EN LAS MUESTRAS DE SUELO

El análisis de BTEX en las muestras obtenidas, se efectuó mediante lo establecido en la Norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 “Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación”.

3.2.3.1 Descripción

De acuerdo a lo establecido en la Tabla 3 de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 los límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo de uso industrial* son los siguientes:

COMPUESTO	(mg/kg base seca)
Benceno	15
Tolueno	100
Xilenos (suma de isómeros, (o, m, p))	100
Etilbenceno	25

*industrial incluye suelo comercial

La determinación de benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (suma de isómeros) se realizó conforme a lo estipulado en el anexo A.4 de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

El equipo empleado para la determinación de estos compuestos fue un cromatógrafo de Gases-Masas (CG-Masas) Marca Fissions GC-800. El análisis se llevó a cabo empleando una columna cromatográfica de marca Zebron, (ZB-WAX de 100% polietilenglicol) de 30 m de longitud, 0.25 cm de diámetro interno, y de 0.50 μm de espesor de película. El certificado de la mezcla de los estándares empleados: benceno, tolueno, mezcla de xilenos (o, m, p) y etilbenceno fueron proporcionados por la compañía ChemService cuyo lote de número 320-125A y con fecha de expiración de 02/06

Condiciones Cromatográficas

Las condiciones del equipo para la realización del análisis fueron las siguientes:

- Temperatura de inyector: 220°C
- Temperatura de detector: 240°C
- Flujo de gas acarreador (Helio): 0.95 mL/min
- Temperatura del horno: Para el análisis cromatográfico se realizó la siguiente rampa de temperatura:

Tiempo	Temperatura del horno	Intervalo
3	40	5
0	80	15
3	150	10

3.2.3.2 Procedimiento para el análisis de las muestras:

Se realizó una curva de calibración con la mezcla de los compuestos estándares mencionados anteriormente dependiendo de los límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo de uso industrial establecidos en la **Tabla 3 de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**. Las concentraciones realizadas fueron las siguientes: 10, 25, 75 y 100 mg/kg (ppm). La cantidad inyectada en el CG-EM fue de 1.0 μL de cada una de las concentraciones y las determinaciones se realizaron por duplicado. Las muestras se analizaron mediante la técnica de “Head-Space” conforme a lo establecido en la NOM de referencia, en donde una cantidad de muestra es colocada dentro de un vial para “Head Space” y calentada bajo un tiempo y temperaturas determinados hasta que los compuestos son volatilizados.

Posteriormente una cantidad conocida de muestra es retirada del vial por medio de una jeringa de gases e inyectada en el puerto de inyección del cromatógrafo de gases, obteniéndose por un lado el cromatograma de la muestra, y por el otro, los iones moleculares de los compuestos de interés.

3.2.3.3 Resultados del análisis de muestras

Después de haber preparado cada una de las muestras por triplicado se procedió a su análisis por gases - masas. En el Anexo C se presentan los cromatogramas obtenidos durante el análisis de las muestras, cabe mencionar que en base a lo obtenido, **no se logró detectar concentraciones superiores a 100 mg/L en ninguna de las muestras**. Debido a los resultados arrojados por el análisis de las muestras, se recomienda realizar los análisis respectivos a la fracción pesada, media y ligera indicados en la **Tabla 1 de la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003**, debido a que se encontraron fragmentaciones de otros compuestos y que no correspondían a los BTEX y que seguramente pertenecen a otras fracciones de hidrocarburos más pesados, con ello se podría creer de una manera más específica el contenido de ellos en dicho suelo ya que es perceptible un fuerte olor a combustible.

3.3. ESTUDIO CONCEPTUAL PARA DEFINIR EL DESTINO FINAL DE LOS TANQUES ENTERRADOS

3.3.1 Normatividad Aplicable

La normatividad aplicable en cuanto al retiro de tanques de almacenamiento es escasa en México, por lo que se recurre frecuentemente a códigos y guías como referencia, como lo demuestra los procedimientos EPA/530/UST-90/005 y EPA/530/UST-90/010, en los cuales establecen procedimientos estándares para la evaluación y detección de fugas en tanques de presión, con respecto al diseño y pruebas efectuadas a tanques a presión, se mencionan recurrentemente el código ASME sección VII, así como el proyecto de norma propuesto por PEMEX el cual es el PROY-NRF-150-PEMEX-2004.

Alguna de las especificaciones técnicas recurrentes para la instalación de tanques enterrados, las encontramos en los normas UNE109502-IN, UNE62350-1, UNE62351-1 Y UNE109501-IN, sin embargo para el retiro y disposición de tanques se recurre a guías ambientales como lo es la Guía Ambiental para Estaciones de Servicio.

Es indispensable tener en cuenta que quien efectuó las labores de desmantelamiento debe tener presente el funcionamiento y condiciones de seguridad en recipientes sujetos a presión, las cuales se encuentran referenciados en la norma NOM-020-STPS-2002, como se ha mencionado los tanques en estudio no son sujetos a presión, pero a falta de una regulación específica, normalmente se toma como referencia dicha norma.

En cuanto a normatividad relacionada a la protección ambiental, se debe tener presente la norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, la cual especifica los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. La ley ambiental del Distrito Federal ofrece un apoyo en cuanto a las actividades a efectuar ya sea en cuestión de daños al entorno y una serie de disposiciones legales al respecto de protección ambiental

Las empresas dedicadas al desmantelamiento de tanques enterrados así como la disposición final de los mismos deben ser certificadas y registradas ante la SEMARNAT.

CAPÍTULO 4. Evaluación de opciones para el destino final de los tanques enterrados

El objeto del presente documento es ofrecer información técnica, económica y ambiental que permita tomar una decisión con respecto al destino final de los tanques enterrados. Estos tanques que ya no son utilizados pueden en principio tener al menos tres destinos finales: 1). Retirarlos, lo cual conlleva a ser extraídos y dispuestos como chatarra, 2). Ser dejados en el sitio mismo donde se encuentran con un acondicionamiento adecuado de los mismos ó bien 3). Ser reutilizados para contener fluidos diferentes al fluido original (agua por ejemplo).

4.1. Retiro de los tanques

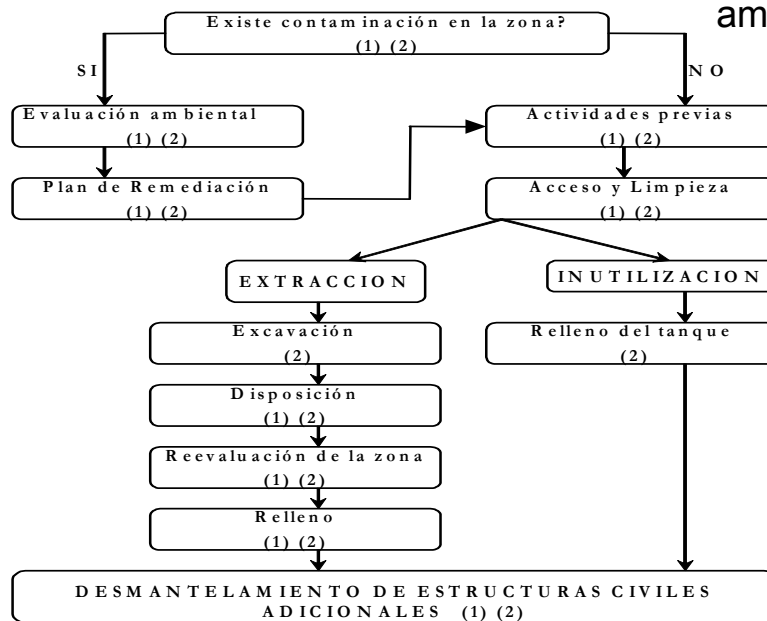
En varios casos de cierre permanente, en donde el tanque de almacenamiento se retira, se prepara el lugar para usarse con otros fines. En este caso, el lugar se limpia y se procede a la recuperación para rehabilitar el lugar a su condición anterior o a estándares aceptables, libres de contaminación. Un pre-planeamiento de la operación de cierre debe de tomar en consideración una evaluación del impacto ambiental resultante y las normas para la protección ambiental dentro de los requisitos del programa de recuperación de cierre del tanque. El cierre definitivo incluye una serie de labores que tienden a determinar el estado ambiental de la zona y las acciones a seguir en caso de que exista presencia de combustible en suelos y agua producto de la operación de los tanques de almacenamiento de combustible, además que durante la excavación se remueven los equipos asociados al tanque y la totalidad de las líneas de conducción. Si por algún motivo parte de la tubería queda en el sitio, esta se lava y se desgasifica usando nitrógeno, hielo seco o cualquier otro método que garantice que la tubería quede inerte; posteriormente, se procede a soldar tapones en todos sus uniones y a rotularlas indicando la fecha en que se selló y el tipo de combustible que almacenaba el tanque al cual estaban conectadas.

En este tipo de cierre donde el tanque debe de ser trasladado para retirarlo del lugar se deberá tomar en cuenta la Norma Oficial Mexicana NOM-005-SCT2/1994, que refiere a la información de emergencia para el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos y pueden seguirse cinco pasos básicos:

- 1 Retiro del producto del tanque
- 2 Retiro de todos los vapores de la parte interna del tanque
- 3 Limpieza del tanque de lodo, productos sobrantes y residuos
- 4 Eliminar todo el lodo y residuos del producto
- 5 Enjuagar el tanque y los desechos producidos se deberán tratar de una manera segura para el medio ambiente en cumplimiento con la normatividad.
- 6 Planificar el traslado y disposición del suelo y/o aguas contaminadas de una manera aceptable

4.1.1 Desmantelamiento

La Figura 3 presenta una lista de las actividades a seguir durante el desmantelamiento de los tanques de almacenamiento de combustible indicando las actividades que aplican para la remoción de tanques superficiales y de tanques subterráneos, previo concepto de la autoridad ambiental.



(1) Tanques superficiales (2) Tanques subterráneos

Figuras 3. Actividades a desarrollar durante el desmantelamiento de tanques de almacenamiento de combustible (tomado de las guías ambientales para estaciones de servicio)

4.1.2 Actividades previas

Antes de la extracción del tanque se debe elaborar un plan de salud y seguridad industrial para prevenir los posibles efectos que puedan tener los combustibles almacenados en el tanque. Se recomienda

avisar previamente a las autoridades competentes acerca de la extracción del tanque (SEMARNAT, PROFEPA y Protección Civil Delegacional), por lo cual se deben llevar a cabo los procedimientos para obtener permisos y coordinar visitas de inspectores y especialistas si se requiere. Así mismo, antes de la remoción del tanque se debe suspender el suministro eléctrico a cada uno de los sistemas asociados a él (Protección catódica, sistemas de bombeo, así como sistemas de instrumentación). Es necesario señalar correctamente el sitio de la obra para evitar accidentes.

Durante la extracción del tanque se debe procurar que las labores de drenaje de líneas, extracción de combustible, remoción de residuos y desgasificación del tanque se realicen inmediatamente antes de empezar la excavación.

Si la remoción de los residuos exige la entrada de personal al tanque, este debe realizarse siguiendo estrictamente el procedimiento de entrada a espacios confinados y solicitar el permiso respectivo. El procedimiento incluye el monitoreo de la atmósfera (niveles de oxígeno y el límite inferior de explosividad LEL), protección respiratoria y cualquier otra protección personal pertinente. Este procedimiento, sólo debe realizarlo personal entrenado para ello.

Al igual que en el proceso de instalación, en la extracción la zona de los tanques de almacenamiento de combustible debe protegerse con barricadas o cualquier otro tipo de cerramiento que impida el acceso de personal ajeno a la obra. Así mismo, debe verificarse continuamente los niveles de explosividad y garantizar que el personal utiliza los elementos de protección personal correspondientes.

La extracción de los tanques elimina futuras sospechas, problemas y responsabilidades por el manejo del tanque y además, permite examinar las condiciones ambientales del suelo y del agua cuando se realiza la excavación.

Por lo general las estructuras que proporcionan doble contención al tanque (fosas de concreto, geomembranas, entre otros) pueden dejarse en el sitio, sin embargo, la decisión depende de varios factores, entre ellos:

- Evidencia de contaminación bajo la doble contención
- La instalación de un tanque nuevo

- Interferencia de la fosa de concreto o la geomembrana (en caso de existir) con las obras de restauración.
- Riesgos a los cuales puede verse sometida la integridad de edificaciones vecinas por remoción de la doble contención.

4.1.3 PURGA DE TANQUES

Esta actividad consiste en:

- Extracción de los vapores a través del orificio a 3.5 m por encima del nivel de la tierra
- Se utiliza un Indicador de Gas Combustible (ICG) y se deberá asegurar que el nivel de explosividad (LEL) se encuentre por debajo de un 10%, antes de entrar o cortar el tanque

La desgasificación del tanque: Puede realizarse a través de diferentes métodos:

Hielo seco

Posterior a la remoción de los materiales de acumulación, se eliminan todos los vapores inflamables que se encuentren dentro del tanque. Los vapores presentes en el tanque pueden removerse desplazándolos con gases inertes, usando dióxido de carbono, comúnmente conocido como hielo seco, en una cantidad de 1.5 libras por cada 100 galones de capacidad del tanque. El hielo seco se tritura y se introduce uniformemente dentro del tanque abriendo todos los accesos del mismo a la atmósfera para permitir la rápida disipación del hielo seco. Es muy importante hacer notar que el contacto del hielo seco con la piel puede producir quemaduras, por lo cual es indispensable el uso de guantes y demás equipos apropiados para su manipulación; así mismo, es necesario tener presente que al desgasificar el tanque, los vapores pueden migrar a sótanos, ductos u otras áreas por lo que se debe observar y hacer cumplir todas las normas de seguridad pertinentes a líquidos inflamables, especialmente la señal de **NO FUMAR**; además, se debe contar con un explosímetro para monitorear periódicamente las concentraciones de vapores.

Agua Jabonosa

Llenar el tanque con agua jabonosa, requiere tratar el agua antes de su vertimiento, lo que hace este método bastante costoso. Durante el llenado se inicia la desgasificación del tanque, ya que a medida que el agua entra desplaza los gases almacenados en él. El agua que se utiliza en estas tareas, debe extraerse del tanque y disponerse, para su tratamiento.

Vapor

Se introduce al tanque a través de una de sus bocas. La tasa de aplicación del vapor debe ser suficiente para exceder la tasa de condensación de tal manera que el tanque se caliente alcanzando una temperatura cercana al punto de ebullición del agua. Debe aplicarse el suficiente para vaporizar todos los residuos adheridos a las paredes del tanque. Las lecturas del LEL, usando el explosímetro, deben hacerse a través de un tubo con material secante, como cloruro de calcio, para asegurar que el vapor no afecte el instrumento; si no se dispone de material secante debe esperarse a que el tanque se enfríe y el exceso de vapor se haya concentrado.

Se considera que el tanque ha sido correctamente desgasificado, cuando al tomar lecturas de nivel de explosividad, a lo largo de la profundidad del tanque y en todos sus accesos, estos están por debajo del 10% del nivel inferior de explosividad (NIE). Si estos niveles no se alcanzan después de la primera desgasificación se debe repetir el procedimiento y revisar nuevamente los niveles de explosividad.

4.2. RELLENO DE LOS TANQUES

Los tanques siempre deben extraerse, salvo en sitios en que el tanque se encuentra cerca a cimentaciones de edificaciones u otros tanques en servicio que pueden resultar afectados por la excavación y posibles deslizamientos de tierra en la zona, previo concepto de la autoridad ambiental a la que se le enviará un mapa de ubicación del tanque abandonado. Sin embargo esta alternativa no elimina sospechas de contaminación en la zona en la cual se encuentra el tanque.

El cierre del tanque en el lugar es un método menos conveniente que el traslado, pero es inevitable en algunos casos e implica las siguientes etapas:

- Completar una evaluación ambiental para determinar si se ha producido algún tipo de contaminación.
- Desarrollar un plan para el cierre y cualquier acción de recuperación que se requiera
- Retirar el lodo del producto y residuos del tanque y tuberías.
- Tapar todos los orificios, excepto los de ventilación y llenado.
- Purgar para la evacuación vapores inflamables en el tanque y las tuberías.
- Enjuagar tres veces el tanque.
- Llenar el tanque con material inerte, como arena y/u hormigón que fluya libremente, lodo de perforación limpio, etc.
- Retirar la línea de ventilación y tapar, además de quitar todas las tuberías existentes.
- Notificar a todos los cuarteles de bomberos locales, a la autoridad ambiental y a la autoridad encargada del registro sobre el cambio de estado del sistema de tanque de almacenamiento enterrado.

A continuación se mencionan algunos materiales utilizados en el relleno de tanques de almacenamiento.

4.2.1 ARENA y HORMIGÓN

En el caso de la arena como material de relleno es más fácil de conseguir, pesa menos que el hormigón y el relleno fluido, este material no es auto-nivelante provocando espacios y rincones vacíos, por lo cual su uso requiere compactación, antes de ser relleno debe quitarse todas las tuberías y de retirarse la tapa de la boca de hombre. En caso de retirarse la arena debe de tratarse como sustancia peligrosa. *Un tanque de 10 mil litros relleno con arena pesa unas 17 toneladas.*

El hormigón por otro lado, al ser una mezcla en forma de líquido pastoso y que se usa como material de relleno, se puede colocar dentro del tanque siendo necesaria la compactación o la vibración, haciéndolo un proceso difícil.

Un tanque de 10 mil litros relleno con hormigón pesa unas 27 toneladas, causando en muchos casos el hundimiento del tanque en el propio suelo creando cavidades.

4.2.2 Relleno Fluido

El relleno fluido es un material auto-compactante de baja resistencia con una consistencia fluida, que es utilizado como un material de relleno económico, como alternativa al relleno granular compactado. El relleno fluido no es concreto (hormigón) y no es utilizado para reemplazar el concreto. Otros términos utilizados para este material son: Relleno sin retracción, relleno de densidad controlada, mortero fluido o mezcla pobre de relleno.

En términos de la durabilidad de los rellenos fluidos, estos no están diseñados para resistir heladas, deshielos, abrasiones, erosiones o ataques químicos agresivos. Si esto fuera necesario deben usarse los cementos y dosificaciones adecuados de acuerdo con el requisito de durabilidad correspondiente. Los materiales de relleno son normalmente enterrados o confinados, con lo que si el material de relleno se deteriora en la obra, actuará siempre como si fuera un relleno granular normal.

4.2.3 Espuma

La espuma es un tipo de resina, con la capacidad de absorber rápidamente diversas sustancias de alto peso específico como los hidrocarburos, también a sustancias como acetona, benceno, tricloroetileno, fluoro benceno, etc.

Los residuos incrustados en la pared del tanque, serán absorbidos y fijados por la espuma durante la inyección eliminando o disminuyendo los riesgos para el medio ambiente.

El proceso requiere sólo una abertura de 2" para el inyector y una para el venteo, la velocidad de inyección es de 18 m³/h, una vez que la espuma endurece pasa a un estado estable y duradero con un tiempo de vida de 150 años, con un peso de 25 kg. por cada 1000 L, presenta una resistencia a la compresión de 230 kPa/cm² y resiste temperaturas de hasta 220°C. La espuma debe cumplir con la norma ISO844 referente a la determinación de las propiedades de compresión en plásticos rígidos celulares.

4.3. REHABILITACIÓN DE LOS TANQUES

El tanque puede volver a usarse después de haber sido cerrado temporalmente dentro de un período de 3 a 12 meses, en el cual el contenido del tanque después del tratamiento de limpieza podría ser una sustancia diferente a la original. A continuación se describen los requisitos mínimos:

- Todas las líneas de ventilación deben dejarse abiertas
- Todas las demás líneas deben de ser cubiertas y aseguradas con el fin de prevenir su uso indebido o ilegal.
- Cualquier producto debe de extraerse del tanque y de las tuberías interconectadas. Si esto no es posible debido a la antigüedad, tipo o peculiaridades de la construcción de la instalación y más del 3% del producto permanece en el sistema, la detección de filtraciones debe de ser continua y verificada regularmente (30 días)
- Desconectar el suministro de energía a todos los dispensadores para poder ser retirados.
- Asegúrese que se mantenga el suministro de energía en el sistema de protección contra la corrosión cuando sea necesario.

La opción para relleno del tanque de almacenamiento para su nuevo uso es el siguiente:

- RELLENO DEL TANQUE CON AGUA

El agua se mezcla con el producto residual y los lodos formando una sustancia peligrosa que requiere ser tratada cuando se retira. La presencia de agua durante un largo tiempo en un tanque acelera la corrosión y supone un continuo peligro ambiental.

4.4. RESUMEN DE LAS OPCIONES PARA EL DESTINO FINAL DE LOS TANQUES ENTERRADOS

En las Tablas subsecuentes se presenta en forma resumida las ventajas e inconvenientes de las opciones para definir el destino final de los tanques enterrados. En dichas tablas también se muestra algunas de las empresas al servicio y suministro de materiales de relleno en tanques enterrados, muestra una cotización reciente en cuanto al servicio que presta. Para la cotización de los productos de relleno se procuró contar con las empresas ubicadas dentro del D. F., con el fin de no elevar el costo que representa el traslado de equipo y material necesario para las labores específicas en cada caso.

En cuanto al suministro de hormigón y relleno fluido las empresas que ofrecen dichos servicios son Cementos APASCO y CEMEX, ambas presentan cotizaciones similares ofreciendo diferencias en el producto que ofrecen, APASCO (teléfono de contacto 57-24-00-00), en cuanto al suministro de hormigón presenta su cotización de la siguiente manera, \$1,008.00 por m³ + IVA, más trabajos de bombeo \$120.00 + IVA por 25 m³ bombeados, adicionando el costo por el préstamo del equipo de bombeo el cual es de \$ 3,450.00.



CEMEX (teléfono de contacto 57-23-44-00, directo: 10-19-79-48), a su vez describe con detalle el costo del hormigón que provee en función de la resistencia del mismo, la cotización que presenta es la siguiente:

Hormigón liviano



RESISTENCIA	\$/m ³
75 densidad 1200 kg/m ³	1403 + IVA
75 densidad 1500 kg/m ³	1112 + IVA



Sistema de bombeo \$2737.00, IVA incluido

Las especificaciones técnicas, así como el costo por metro cúbico, que presentan cada una de las compañías consultadas (CEMEX y APASCO), en cuanto al relleno fluido son las siguientes.

MATERIAL DE RELLENO	EMPRESA																	
	 CEMENTOS APASCO																	
Relleno Fluido	<p>Bomba con 50 m lineales de tubería , hasta 15 m de altura COSTO:\$120.00 x m³+ IVA COSTO DE BOMBA:\$3,450.00</p> <p>Costos en base a la resistencia del material</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>RESISTENCIA [kg/cm²]</th> <th>\$/m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7</td> <td>\$501+ IVA</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>\$564+ IVA</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>\$633+ IVA</td> </tr> <tr> <td>35</td> <td>\$710+ IVA</td> </tr> </tbody> </table>	RESISTENCIA [kg/cm ²]	\$/m ³	7	\$501+ IVA	15	\$564+ IVA	25	\$633+ IVA	35	\$710+ IVA	<table border="1"> <thead> <tr> <th>RESISTENCIA [kg/cm²]</th> <th>\$/m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>14</td> <td>\$543+ IVA</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>\$564.5+ IVA</td> </tr> </tbody> </table> <p>Servicio de bombeo COSTO: \$2,800.00</p>	RESISTENCIA [kg/cm ²]	\$/m ³	14	\$543+ IVA	25	\$564.5+ IVA
RESISTENCIA [kg/cm ²]	\$/m ³																	
7	\$501+ IVA																	
15	\$564+ IVA																	
25	\$633+ IVA																	
35	\$710+ IVA																	
RESISTENCIA [kg/cm ²]	\$/m ³																	
14	\$543+ IVA																	
25	\$564.5+ IVA																	

RETIRO DE LOS TANQUES			
VENTAJAS	INCONVENIENTES	EMPRESAS	COSTO
<ul style="list-style-type: none"> • El espacio que ocupaba el tanque se puede volver a usar. • Es más fácil aplicar un tratamiento al suelo, si éste se encuentra contaminado 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario ventilación de baja presión que mantenga una atmósfera segura a través de una ventilación continua. • Las bombas para el arrastre de vapores debe de ser de baja presión. • Se debe de sellar todos los orificios • El espacio para retirar el tanque debe ser lo suficientemente grande para maniobrar sin peligro. • Posibles deslizamientos de tierra en la zona. • Posible afectación a cimentaciones de edificaciones cercanas. 	<p>QUÍMICA Wimer S. A. de C. V</p> <p>Tel. 58600203 58601549 58600221 Fax. 58601273</p>	<p>A reserva de inspección de instalaciones en promedio el retiro de un tanque es de \$ 25,000.00</p>
REHABILITACIÓN DE LOS TANQUES			
<ul style="list-style-type: none"> • El tanque se puede volver a usar. • El tanque puede almacenar una substancia muy diferente a la contenida con anterioridad por ejemplo agua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe de sellar todos los orificios antes de la limpieza y de reusarlo. • El tanque almacenando agua por largo tiempo puede acelerar la corrosión del mismo • La detección de filtraciones debe ser por lo menos cada 30 días • La substancia almacenada en el tanque al mezclarse o contaminarse con el producto residual debe de manejarse como residuo peligroso. 		

RELLENO DE LOS TANQUES				
MATERIAL DE RELLENO	VENTAJAS	INCONVENIENTES	EMPRESAS	COSTO
Arena	<ul style="list-style-type: none"> • Es más ligero que el hormigón y el relleno fluido. • Es más barato • Es el material mas utilizado 	<ul style="list-style-type: none"> • Es casi imposible rellenar por completo el tanque, por que siempre quedan espacios y rincones vacíos • Debe quitarse todas las tuberías y de retirarse la tapa de la boca de hombre. • Un tanque de 10 mil litros relleno con arena pesa unas 17 toneladas. • En caso de retirarse la arena debe de tratarse como sustancia peligrosa. 	Cualquier tipo de empresa de materiales de construcción	
Hormigón	<ul style="list-style-type: none"> • No deja espacios vacíos por lo cual llena completamente el tanque 	<ul style="list-style-type: none"> • El proceso de llenado es particularmente difícil • Un tanque de 10 mil litros relleno con hormigón pesa unas 27 toneladas. • Hundimiento del tanque en el propio suelo creando cavidades 	 CEMENTOS APASCO	\$ 45,540.00 en promedio *
			 CEMEX	\$ 51,595.00 en promedio *

Relleno Fluido	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil eliminación con un equipo adecuado como una retro excavadora • Se aboca a la cavidad que se requiere llenar • No precisa de vibrado o compactado • La resistencia del material depende del diseño de la mezcla 	<ul style="list-style-type: none"> • Los materiales de relleno no están diseñados para resistir heladas, deshielos, abrasiones, erosiones o ataques químicos agresivos. • Deben usarse los cementos y dosificaciones adecuadas de acuerdo con el requisito de durabilidad. • Son pesados y durante la colocación antes del fraguado ejercen una alta presión hidráulica • No se le puede agregar agua 		Costo promedio ofrecido por la empresa \$35,380.00 *
				Costo promedio \$27,505.00 *

* Precios de cotización en pesos mexicanos hasta el 1 de junio del 2005

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las pruebas de hermeticidad efectuadas a los tres tanques enterrados, no son determinantes en cuanto a la presencia de contaminación por derrames de diesel en el período de servicio de dichos tanques. Es recomendable introducir a los tanques personal especializado adecuadamente equipado, con el propósito de sellar ó indicar las conexiones internas de cada tanque, esta actividad asegurará la plena identificación de conexiones no visibles en cada tanque, así como las condiciones estructurales de los mismos.

En base a los resultados obtenidos para la determinación de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos (BTEX), se concluye que no existe contaminación de diesel en las inmediaciones de los tanques.

Con respecto al destino final de los tanques, se debe tomar en cuenta las implicaciones inherentes al efectuar alguna de las alternativas presentadas. Las autoridades competentes que deben estar informadas del procedimiento de retiro de los tanques son: SEMARNAT, Protección Civil, PROFEPA y el H. Cuerpo de Bomberos. Al decidirse a quitar dichos tanque es necesario tramitar los permisos correspondientes, ya sea de supervisión y/o traslado ante, PROFEPA, SEMARNAT y Protección Civil de la delegación correspondiente, así como a las autoridades delegacionales.

De las tres opciones analizadas para el destino final de los tanques, se recomienda no retirar los tanques del sitio donde están debido a que pueden presentarse problemas de estabilidad de las estructuras civiles que se encuentran encima de los tanques, no es recomendable la rehabilitación de los tanques enterrados debido al tipo de sustancia que contenían que es altamente toxico y peligroso. En caso de que se desee clausurar definitivamente los tanques podrá implementarse un relleno fluido el cual asegurará la estabilidad de la estructura de los tanques y de las construcciones civiles encima de ellos.

ANEXOS

A. MATERIAL REQUERIDO PARA PREPARACIÓN DE PRUEBA DE HERMETICIDAD

1 brida ciega de 54.5 cm. diámetro con muesca de 1 cm. con 8 barrenos de 1/2 “

1 tapón macho de 1/2 “

1 tapón macho de 2 “

1 tapón macho de 3/4“

1 tocón de madera para sellar tubo de 2 “ sin rosca

8 pernos de 3/8” con tuerca y 2 arandelas cada uno

HERRAMIENTA REQUERIDA

1 cincel y martillo

2 llaves Stillson, una grande 24”, una mediana 14”

1 llave perico grande 14”

3 llaves españolas de 1/2” x 3/8”

1 taladro de 1/2” con 3 brocas de 3/8” afiladas

TANQUE 2 (ubicado en oficinas después del tanque 1 e interconectado con éste)

1 brida ciega de 57 cm. diámetro x 1/4” con 8 barrenos de 1/2 “

1 manómetro de 1 a 5 kg/cm²

3 nipples de cuerda corrida de 1/4”

6 nipples de 4” c/u 1/4”

3 “t” s 1/4”

3 tapones 1/4” 8 pernos de 3/8” con tuerca y 2 arandelas cada uno

TANQUE 3 (ubicado en cuarto de calderas)

1 brida ciega de 49.7 cm. diámetro con muesca de 1”, 8 barrenos de 1/2“

4 tapones macho de 3/4 “

1 tapón macho de 1 1/2” o 2 “

1 tapón macho de 3/4“

1 placa de 1/4” y 5.2 cm. de diámetro

8 pernos de 3/8” con tuerca y 2 arandelas cada uno

1 sello de neopreno de 1/4” y diámetro de cada una de las bridas ciegas

CONSUMIBLES

Estopa

Solvente y 3 tubos de silicón

B. CURVAS DE CALIBRACIÓN DE LA MEZCLA DE COMPUESTOS ESTÁNDARES DE BTEX

Benceno t.r = 5.65		
Concentración (ppm)	Área bajo la curva*	
10	21740	a = 16901
25	37344	b = 698.18
75	68011	c = 0.9942
100	87126	

Donde: **a** =ordenada al origen, **b** = pendiente, **c** = coeficiente de correlación

*Promedio de dos inyecciones

t.r= tiempo de retención del estándar

Tolueno t.r = 8.418		
Concentración (ppm)	Área bajo la curva*	
10	27121	a = 5784.8
25	53529	b = 1438
75	86869	c = 0.9935
100	140893	

Donde: **a** =ordenada al origen, **b** = pendiente, **c** = coeficiente de correlación

*Promedio de dos inyecciones

t.r= tiempo de retención del estándar

Etilbenceno t.r=11.194		
Concentración (ppm)	Área bajo la curva*	
10	80588	a = 34970
25	141873	b = 4599.3
75	405500	c = 0.9911
100	477766	

Donde: **a** =ordenada al origen, **b** = pendiente, **c** = coeficiente de correlación

*Promedio de dos inyecciones

t.r= tiempo de retención del estándar

Suma de xilenos (iones orto, meta y para) t.r = 11.435, 11.619, 12.686		
Concentración (ppm)	Área bajo la curva*	
10	145197	a = 20584
25	358528	b = 16384
75	1292643	c = 0.9922
100	1561880	

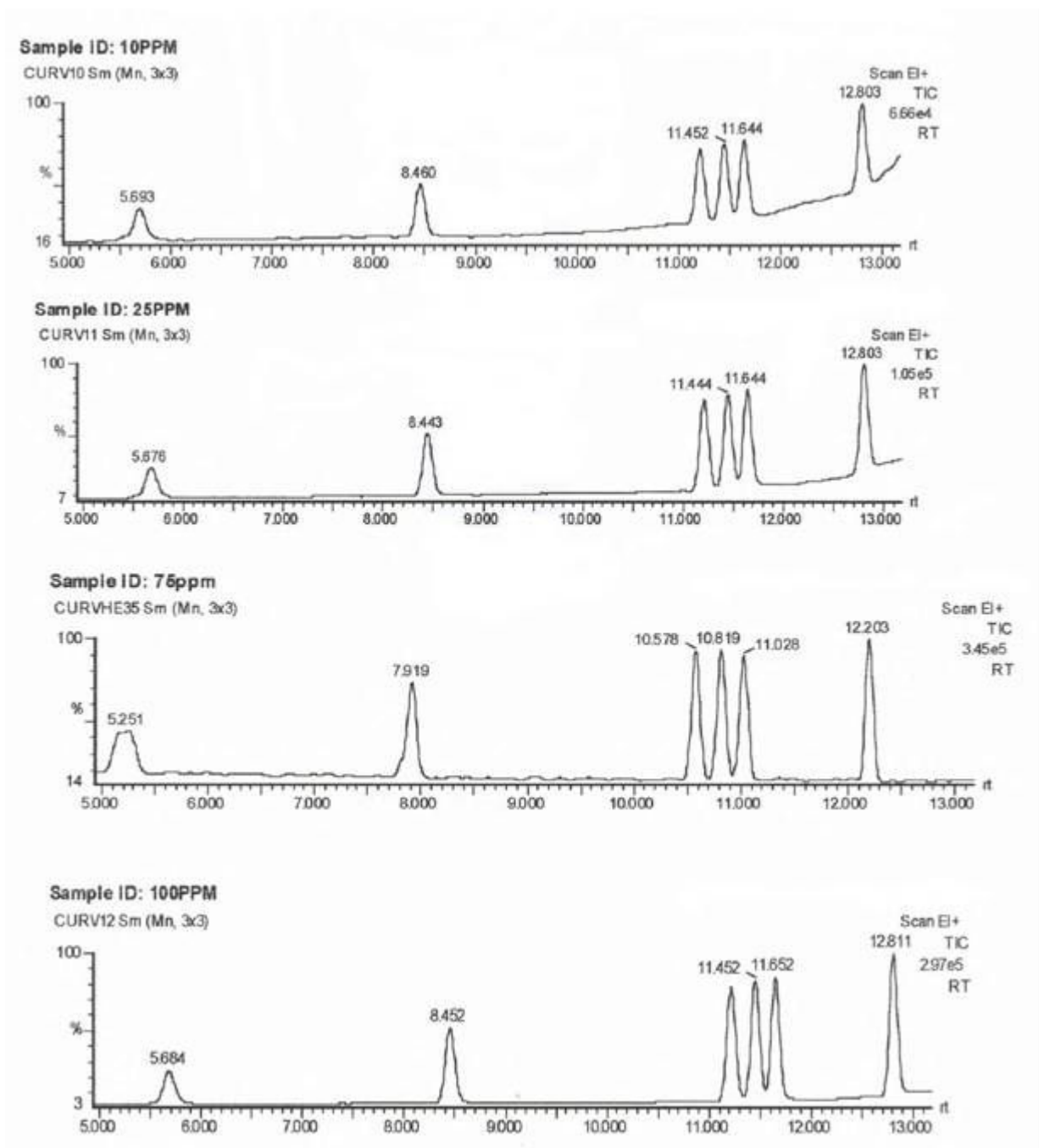
Donde: **a** =ordenada al origen, **b** = pendiente, **c** =coeficiente de correlación

*Promedio de dos inyecciones

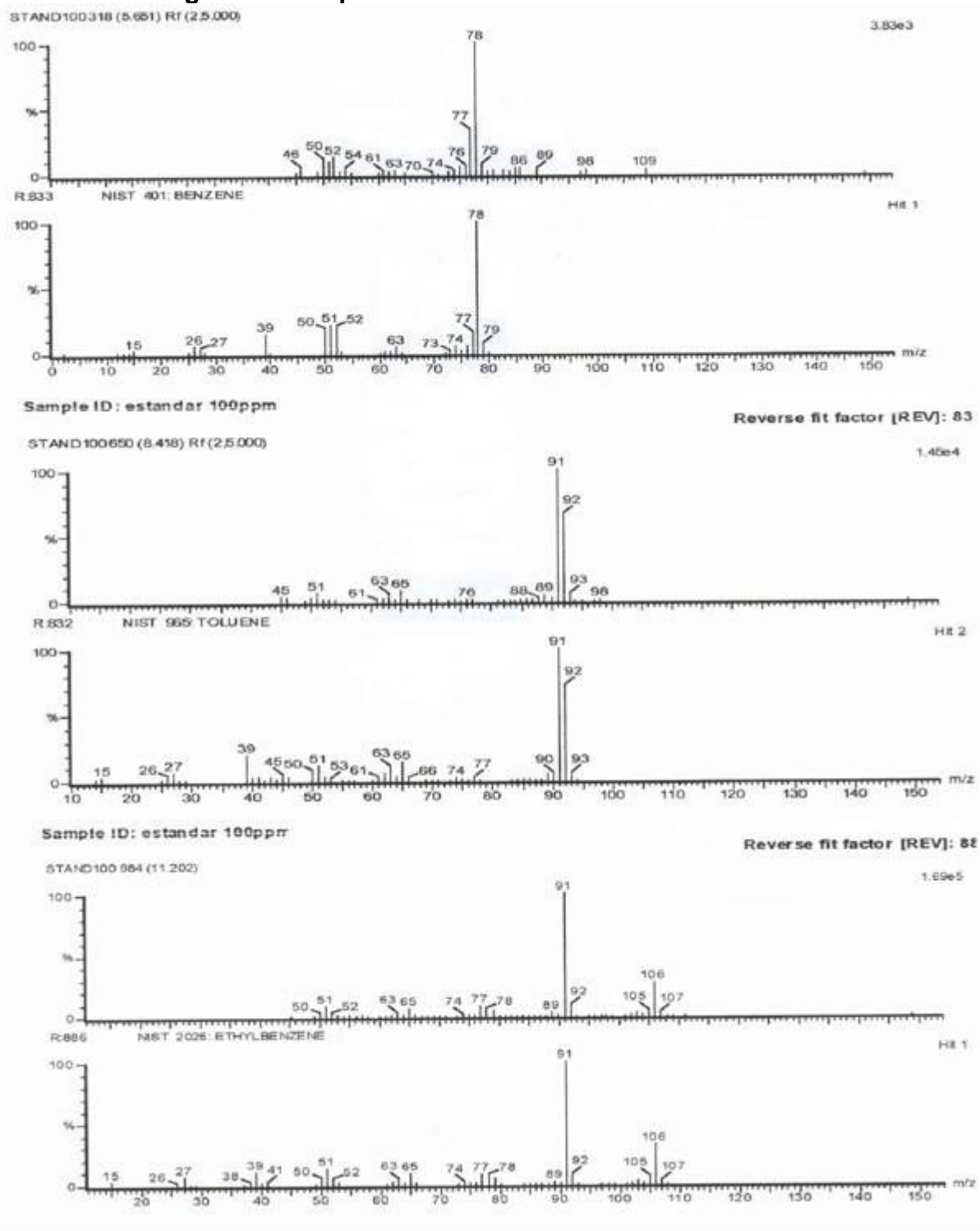
t.r= tiempo de retención del estándar

C. Curvas de calibración de BTEX en concentraciones de 10, 25, 75 Y 100 ppm.

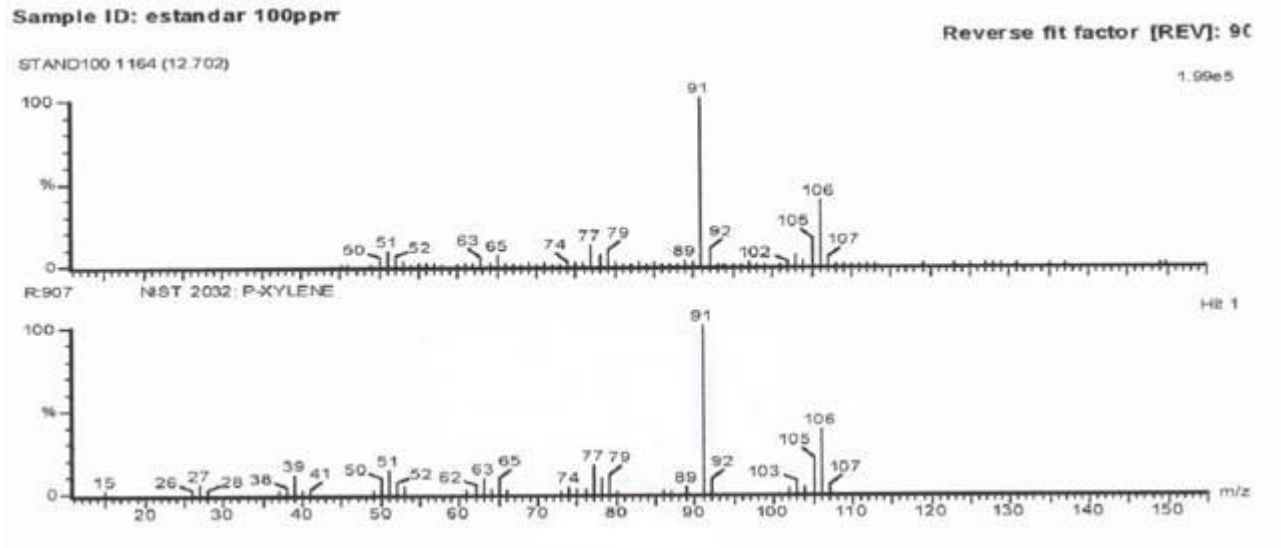
Los compuestos en orden de elusión son a) Benceno, b) Tolueno, c) Etilbenceno y d) mezcla de xilenos (m, o y p)



Patrones de fragmentación para la curva de calibración



Patrones de fragmentación para la curva de calibración (continuación)

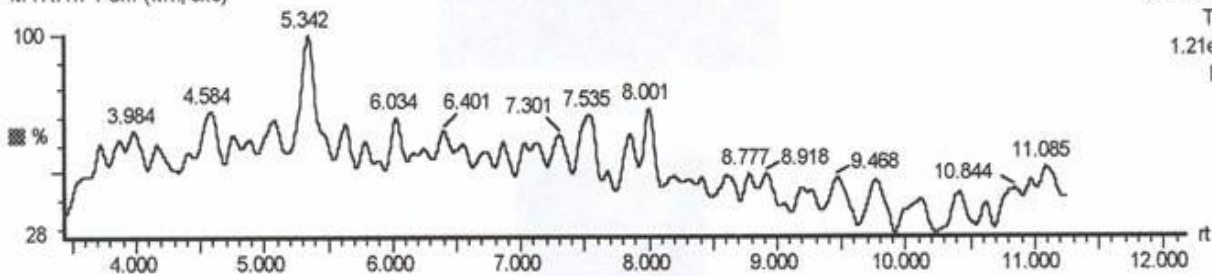


Sample ID: punto de muestreo 1

Acquired on 16-Jun-2005 at 19:08:20

MTRA1P1 Sm (Mn, 3x3)

ScanEI+
TIC
1.21e4
RT

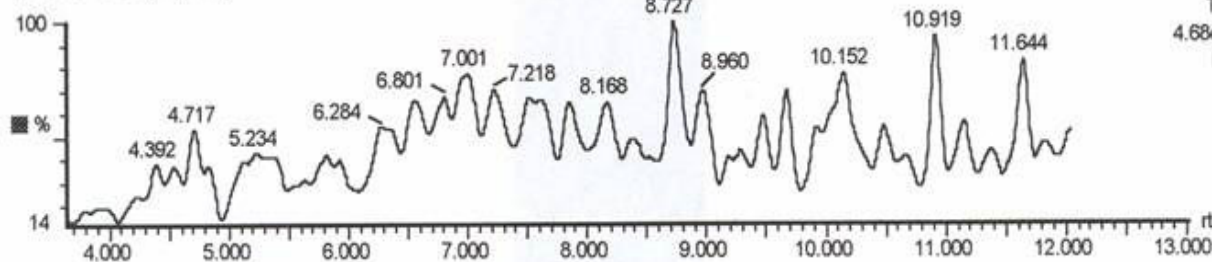


Sample ID: punto de muestreo 1

Acquired on 16-Jun-2005 at 19:58:10

MTRA3P1 Sm (Mn, 3x3)

ScanEI+
TIC
4.68e4
RT

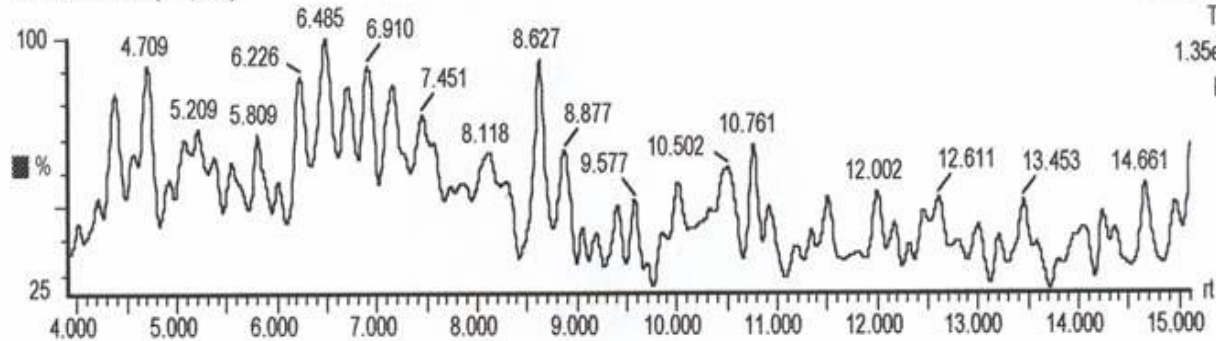


Sample ID: punto de muestreo 2

Acquired on 17-Jun-2005 at 17:23:18

MTRA1AR Sm (Mn, 3x3)

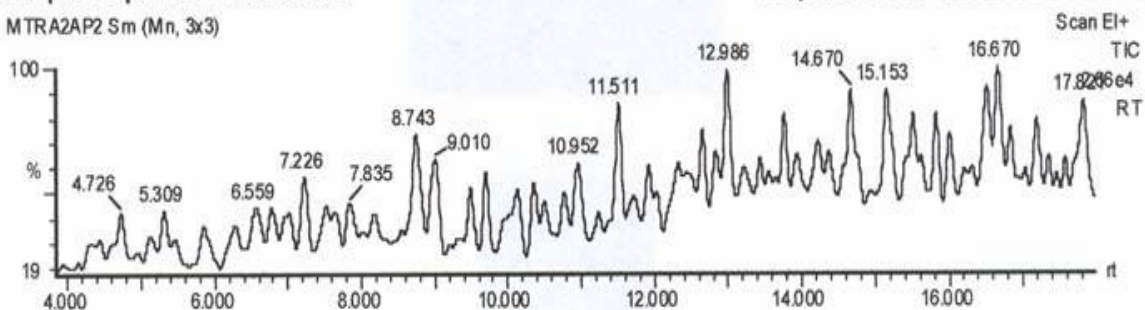
ScanEI+
TIC
1.35e4
RT



Sample ID: punto de muestreo 2

Acquired on 17-Jun-2005 at 15:52:47

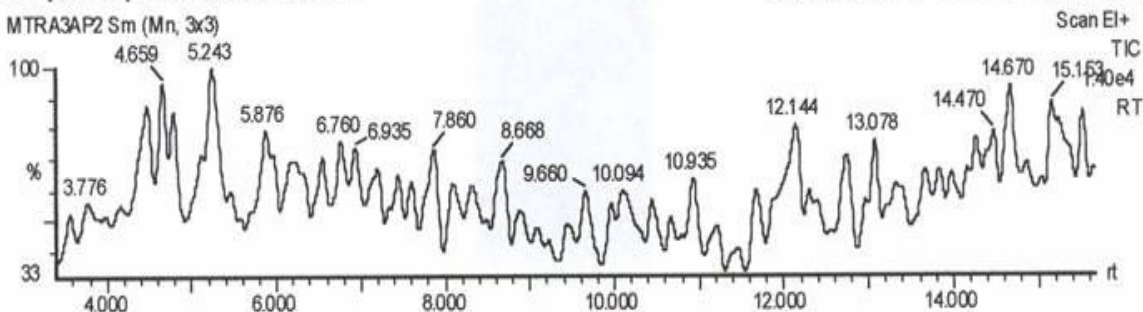
MTRA2AP2 Sm (Mn, 3x3)



Sample ID: punto de muestreo 2

Acquired on 17-Jun-2005 at 12:49:34

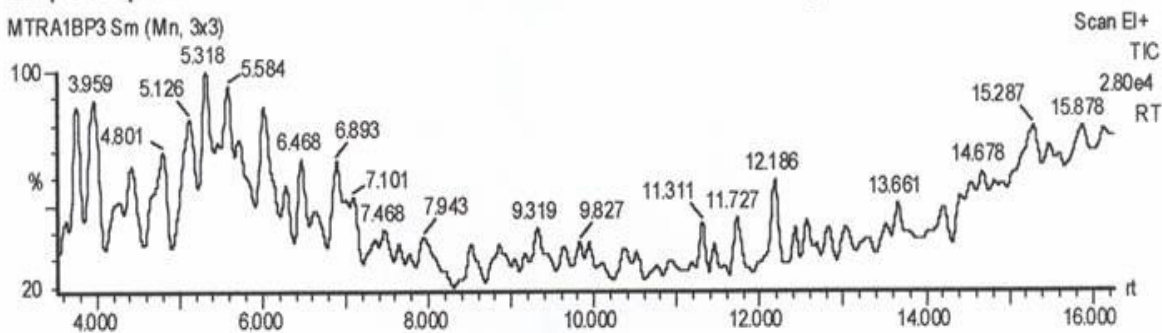
MTRA3AP2 Sm (Mn, 3x3)



Sample ID: punto de muestreo 3

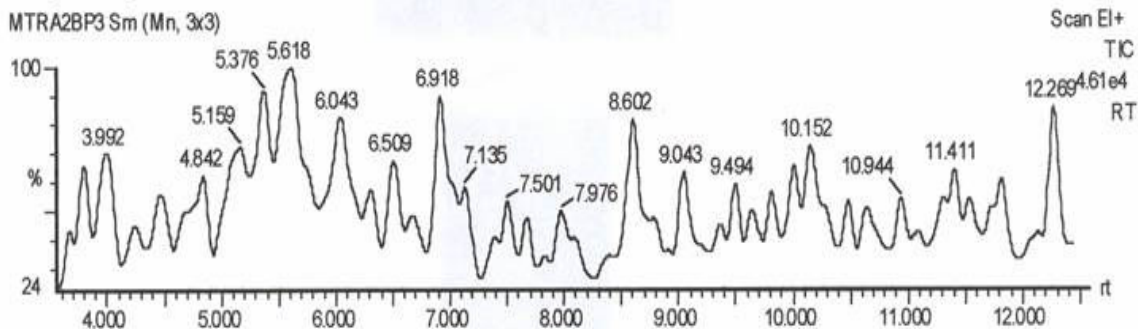
Acquired on 23-Jun-2005 at 13:44:47

MTRA1BP3 Sm (Mn, 3x3)



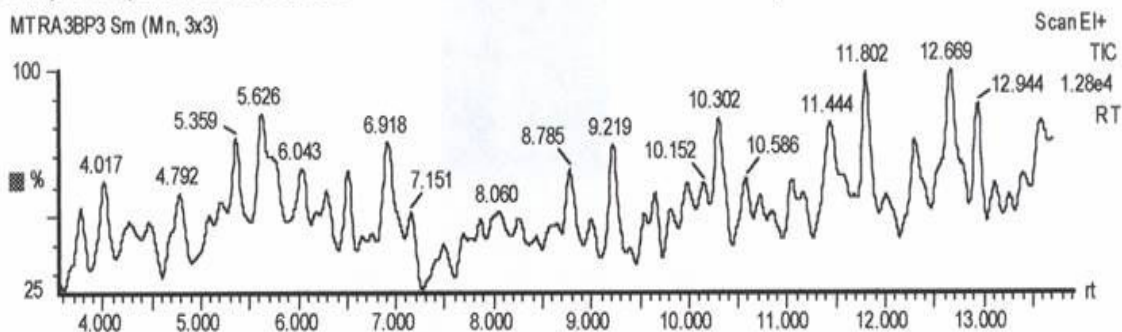
Sample ID: punto de muestreo 3

Acquired on 23-Jun-2005 at 14:48:48



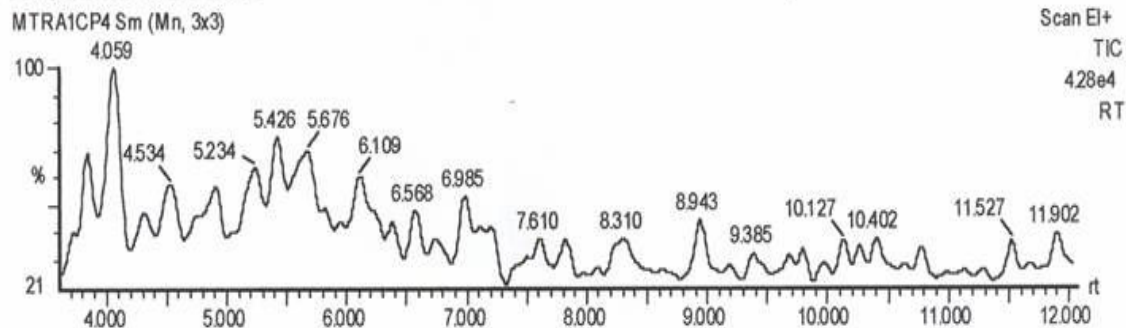
Sample ID: punto de muestreo 3

Acquired on 17-Jun-2005 at 18:39:08



Sample ID: Pta Ricolino

Acquired on 20-Jun-2005 at 15:04:13

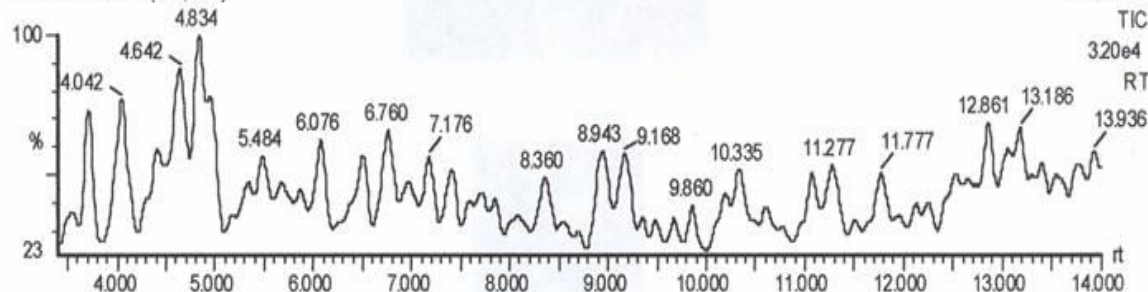


Sample ID: tomada a 2 metros de profundidad

Acquired on 20-Jun-2005 at 15:46:30

MTRA2CP4 Sm (Mn, 3x3)

Scan EI+
TIC
320e4
RT

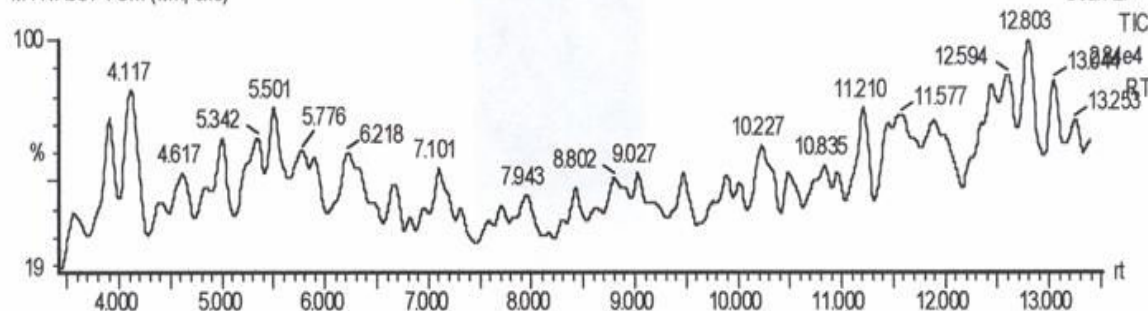


Sample ID: tomada a 3 metros de profundidad

Acquired on 20-Jun-2005 at 16:42:44

MTRA3CP4 Sm (Mn, 3x3)

Scan EI+
TIC
320e4
RT

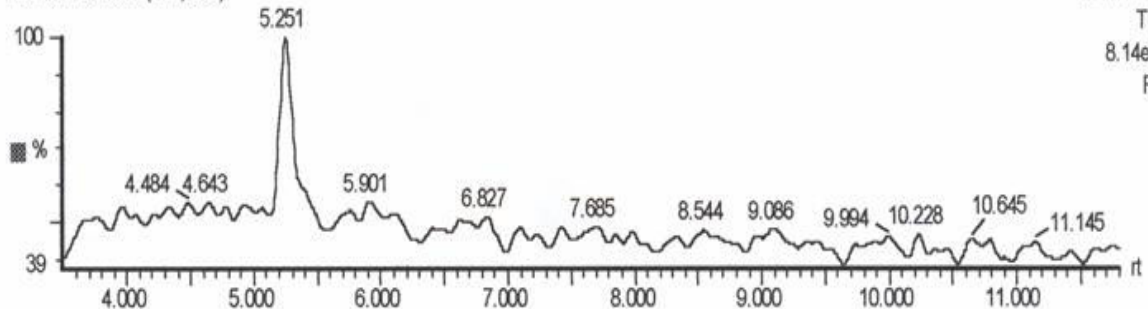


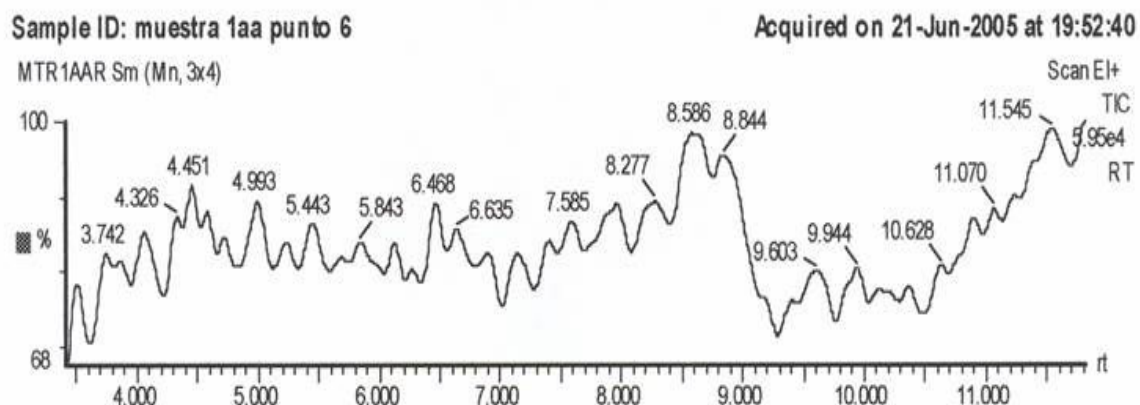
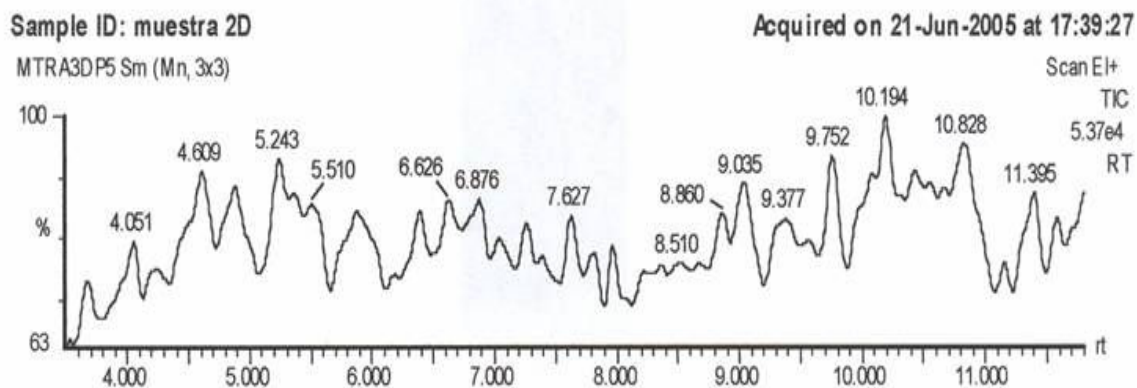
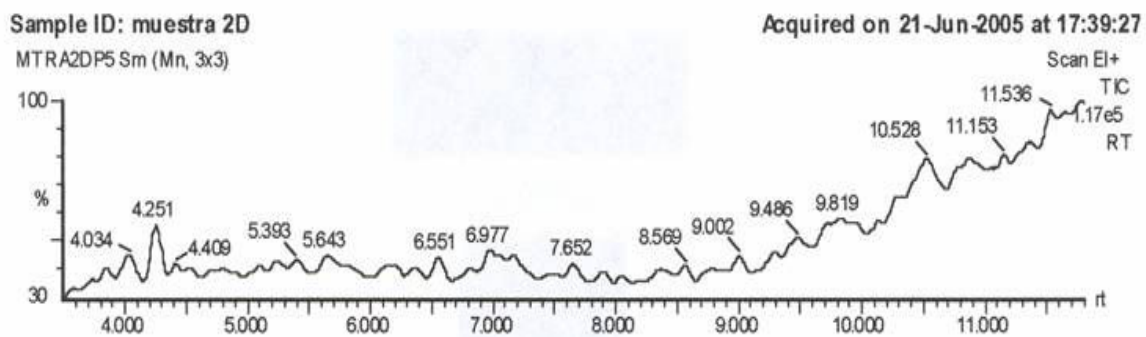
Sample ID: P5 repetición

Acquired on 21-Jun-2005 at 17:08:59

MTRA1DR Sm (Mn, 3x3)

Scan EI+
TIC
8.14e4
RT

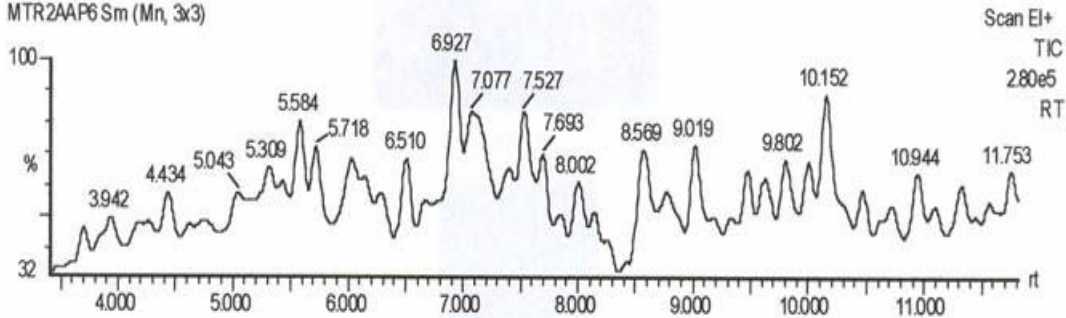




Sample ID: muestra 2AA,punto 6

Acquired on 22-Jun-2005 at 14:32:13

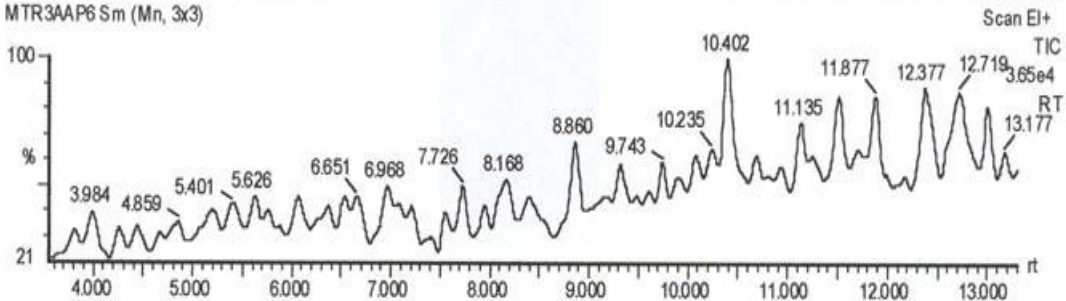
MTR2AAP6 Sm (Mn, 3x3)



Sample ID: muestra 3AA,punto 6

Acquired on 22-Jun-2005 at 16:14:30

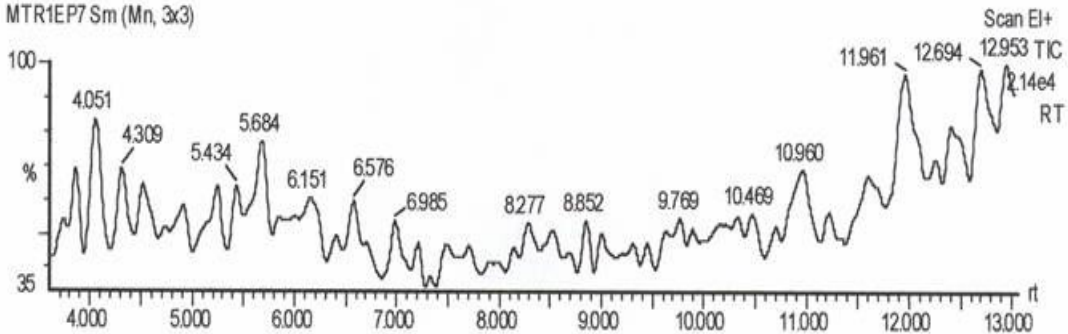
MTR3AAP6 Sm (Mn, 3x3)



Sample ID: muestra del punto 7

Acquired on 22-Jun-2005 at 16:34:46

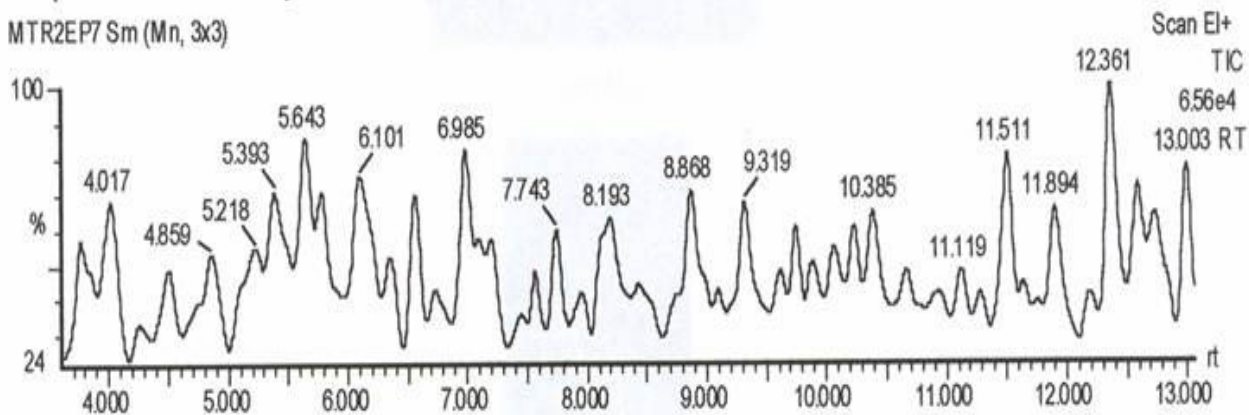
MTR1EP7 Sm (Mn, 3x3)



Sample ID: muestra del punto 7

Acquired on 22-Jun-2005 at 17:26:25

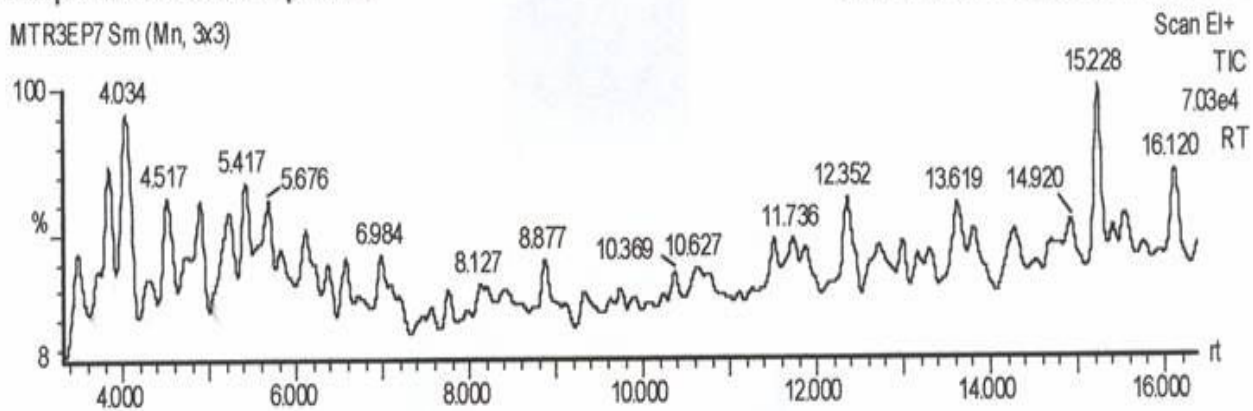
MTR2EP7 Sm (Mn, 3x3)



Sample ID: muestra del punto 7

Acquired on 22-Jun-2005 at 18:26:06

MTR3EP7 Sm (Mn, 3x3)



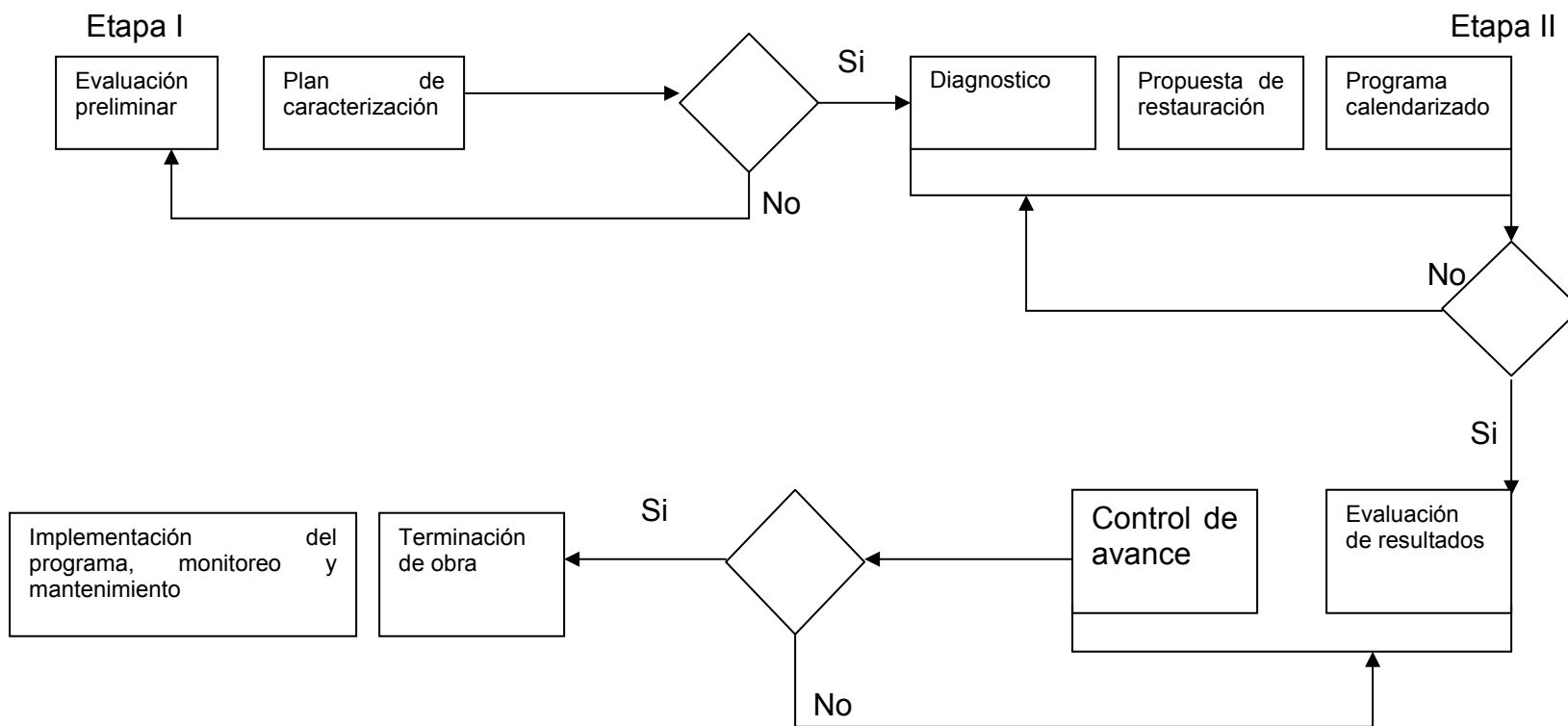
D. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS EN LAS MUESTRAS DE SUELO

Clave de muestra	Punto de muestreo	Resultado	Determinación del porcentaje de humedad de las muestras	Inferior al LMP* establecido en la norma de referencia
1	1	n.d	30.57	Si
2	1	n.d	26.43	Si
3	1	n.d	47.00	Si
1 A	2	n.d	35.86	Si
2 A	2	n.d	32.57	Si
3 A	2	n.d	46.43	Si
1 B	3	n.d	23.14	Si
2 B	3	n.d	26.43	Si
3 B	3	n.d	46.86	Si
1 C	4	n.d	31.14	Si
2 C	4	n.d	39.86	Si
3 C	4	n.d	43.71	Si
1 D	5	n.d	25.57	Si
2 D	5	n.d	25.86	Si
3 D	5	n.d	43.00	Si
1 AA	6	n.d	26.42	Si
2 AA	6	n.d	20.42	Si
3 AA	6	n.d	46.85	Si
1 E	7	n.d	26.14	Si
2E	7	n.d	37.71	Si
3E	7	n.d	44.57	Si

n.d = No detectado por cromatografía de gases espectrometría de masas

*LMP= Límite Máximo Permisible estipulado en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003

E. Diagrama del Procedimiento Técnico Administrativo para Caracterización y Restauración de Sitios Contaminados por Hidrocarburos



*Secretaria del Medio Ambiente (Cumplimiento Ambiental, Suelo Limpio)

F. HOJA TÉCNICA DEL DIESEL

NOMBRE DE LA EMPRESA: PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN	
FECHA DE ELABORACIÓN: Julio 2005	FECHA DE REVISIÓN: Julio 2005

SECCIÓN I: DATOS GENERALES DEL RESPONSABLE DE LA SUSTANCIA QUÍMICA			
1. - NOMBRE DEL FABRICANTE O IMPORTADOR: PEMEX, Refinación		2. -EN CASO DE EMERGENCIA COMUNICARSE A: TELÉFONO: 01525 44735	
3. - DOMICILIO COMPLETO:			
CALLE: Avenida Marina Nacional	No. EXT. 329	COLONIA Huasteca	C. P. 11311
DELEG/MUNICIPIO: Cuauhtémoc	LOCALIDAD O POBLACIÓN: México, D. F.	ENTIDAD FEDERATIVA México, D. F.	

SECCION II: DATOS GENERALES DE LA SUSTANCIA QUÍMICA	
NOMBRE COMERCIAL: Diesel automotriz de bajo Azufre	2. - NOMBRE QUÍMICO: Diesel altamente hidrodesulfurado
3. - PESO MOLECULAR: Variable	4. - FAMILIA QUÍMICA: Hidrocarburos combustibles
5. - SINÓNIMOS:	6. - OTROS DATOS: N/D

SECCIÓN III: COMPONENTES RIESGOSOS			
1. - % Y NOMBRE DE LOS COMPONENTES Diesel sin aromáticos Azufre	2. - No. CAS: 7704-34-9	3. - No. DE LA ONU: 1202	4. - CANCERIGENOS O TERATOGENICOS: NO
5. - LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE CONCENTRACIÓN: TWA _{8 horas} OSHA = 5 mg / m ³ TWA _{15 min} ACGIH = 10 mg / m ³ No se considera tóxico	6.-IDLH/IPVS (p. p. m.): N/D	7. - GRADO DE RIESGO: S=0 I=2 R=0	
		7.1 SALUD 0	7.2 INFLAMABILIDAD 2

SECCIÓN IV: PROPIEDADES FÍSICAS	
1. - TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C): -7 ° C	2. - TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (°C): 288 - 338 ° C
3. - PRESIÓN DE VAPOR: 8.93	4. - DENSIDAD RELATIVA: SÓLIDOS Y LÍQUIDOS (AGUA=1.00 a 4°C): 0.80 GASES Y VAPORES (AIRE=1.00 a C. N.): 20

5. - DENSIDAD RELATIVA DE VAPOR (AIRE = 1.00 a C. N.) 1.5	6. - SOLUBILIDAD EN AGUA (g/100ml): Insoluble
7. - REACTIVIDAD EN AGUA: No reacciona con el agua	8. - ESTADO FÍSICO, COLOR Y OLOR: Líquido, color café claro.
9. - VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN Menor de 1.0	10. - PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C) N/D
11. - TEMPERATURA DE AUTO IGNICIÓN (°C): 257 ° C	12. - PORCIENTO DE VOLATILIDAD: N/D
13. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD (%): Límite inferior: 9.6 Límite superior: 2.15	

N/D No disponible

SECCIÓN V: RIESGOS DE FUEGO O EXPLOSIÓN

1. - MEDIO DE EXTINCIÓN:

NIEBLA DE AGUA:	ESPUMA:	HALÓN:	CO ₂ :	POLVO QUÍMICO SECO:	OTROS:
	Si		Si	Si	No se cuenta con otros datos.

2. - EQUIPO ESPECIAL DE PROTECCIÓN (GENERAL) PARA COMBATE DE INCENDIO:

Utilizar mangueras, boquillas, camiones, cascos, pantallas, chaquetones, botas, llaves, martillos, hachas, palas, garza para la inyección de espuma, camiones o unidades de bomberos, red contra incendio perimetral.

3. - PROCEDIMIENTO ESPECIAL DE COMBATE DE INCENDIO:

Mantener la calma, identificar el sitio y evaluar la magnitud del siniestro para su control y eliminación; avisar a la central contra incendio, a la jefatura o al personal de guardia del área; si las condiciones lo permiten arranque la bomba de agua contra incendio y aplique la cortina de agua en el área afectada a través de los monitores de red contra incendios. Efectuar los movimientos operacionales necesarios para aislar el sitio del siniestro para su control; si la magnitud no lo permite, retírese a una distancia prudente mientras llega la ayuda.

4. - CONDICIONES QUE CONDUCEN A UN PELIGRO DE FUEGO Y EXPLOSIÓN NO USUALES:

Evite el sobrecalentamiento de los contenedores, estos pueden agrietarse violentamente al ser expuestos al calor. Derrames que alcancen una flama. Evitar exponerlo a posibles fuentes de ignición (chispas, sand-blast, entre otros). Evitar vapores que con el aire produzcan mezclas explosivas.

5.- PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN:

Este producto genera Bióxido de Carbono y Agua.

SECCION VI: DATOS DE RECTIVIDAD

1.- SUSTANCIA		2.- CONDICIONES A EVITAR:
ESTABLE En condiciones normales	INESTABLE NO	Fugas, exposición al calor y fuentes de ignición cercanas.

3.- INCOMPATIBILIDAD (SUSTANCIAS A EVITAR):

Presenta un riesgo muy alto para producir fuego y explosión cuando se expone al calor o flama; puede reaccionar vigorosamente con materiales oxidantes como ácido Nítrico.

4.- DESCOMPOSICIÓN DE COMPONENTES PELIGROSOS: Su combustión produce humos tóxicos si es inhalado o absorbido por la piel.		
5.- POLIMERIZACIÓN PELIGROSA:		6.- CONDICIONES A EVITAR:
PUEDE OCURRIR Puede ocurrir.	NO PUEDE OCURRIR No ocurre polimerización peligrosa	Evitar altas temperaturas, fuentes de ignición, fugas y derrames.

SECCIÓN VII: RIESGOS PARA LA SALUD		
VÍAS DE ENTRADA	SÍNTOMAS DEL LESIONADO	PRIMEROS AUXILIOS
1.- INGESTIÓN ACCIDENTAL:	El Diesel provoca quemaduras al tracto intestinal, seguido de náuseas, vómito, depresión, pues ataca el SNC, dolor de cabeza coma e irritación pulmonar.	Llevar de ser al afectado a un lugar libre de contaminación. Si la cantidad es considerable se recomienda aplicar un lavado intestinal. Si al ingerir el diesel, se aspiraron vapores y provoca un paro respiratorio, aplicar respiración artificial y solicitar atención médica inmediata.
2.- CONTACTO CON LOS OJOS	El contacto con esta sustancia puede provocar dolor, punzadas y ceguera.	En caso de contacto lavar con abundante agua 15 min. o con suero fisiológico; si la lesión es seria cubrir con un vendaje sin ejercer presión, sobre los ojos y no intentar retirar cuerpos extraños de los ojos, esto le corresponde al médico. Se requiere atención médica inmediata.
3.- CONTACTO CON LA PIEL	El contacto prolongado puede provocar dermatitis, causando grietas en la piel.	Retirar y confinar ropa y calzado contaminados; lavar y retirar frotando con abundante agua y jabón.
4.- ABSORCIÓN	N/D	N/D
5.- INHALACIÓN	Provoca asfixia, causa depresión, pues ataca el SNC, dolor de cabeza y dificultad respiratoria.	Evitar contacto, pues causa irritación en las mucosas. Se requiere equipo de protección personal.
6.- SUSTANCIA QUÍMICA CONSIDERADA COMO CANCERIGENA (SEGÚN NORMATIVIDAD DE LA STPS Y SSA): STPS: SI _____ NO ___X___ SSA: SI _____ NO ___X___		
OTROS. ESPECIFICAR		

Referencias Bibliográficas

1. Alexander, M. 1994. *Biodegradation and Bioremediation*. Academic Press, San Diego. 302 pp.
2. Bedair, H. M. & H. T. Al-Saad. 1992. *Dissolved and Particulate Adsorbed Hydrocarbons in Water of Shatt Al-Arab River, Iraq*. *Water, Air, Soil Pollution*. 61:397-408.
3. Bidleman, T. F.; A. A. Castleberry; W. T. Foreman; M. T. Zaransk & D. W. Wall. 1990. *Petroleum Hydrocarbons in the Surface Water of Two Studies in the Southeastern United States*. *Est. Coast Shelf Science*. 30:91-109.
4. Calabrese Edward Jj. and Kostecki Paul T. (1992), *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*, Ed. Lewis Publishers.
5. Doran John W. and Jones Alice J. (1996), *Methods for assessing Soil Quality*, Ed. Soil Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
6. Eweis, J.B., S.J. Ergas, D.P. Chang y E.D. Schroeder 1998. *Bioremediation Principles*. McGraw-Hill International Editions. 296 pp.
7. <http://portal.semarnat.gob.mx/semarnat/portal>
8. http://www.cemexmexico.com/co/co_pa_ce_cp.html
9. <http://www.economia-noms.gob.mx/>
10. <http://www.franquiciapemex.com/>
11. <http://www.ine.gob.mx/>
12. <http://www.paot.org.mx/marco/reglamento.html>
13. Martínez M. Victor E. y López S Felipe (2001). Efecto de los hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de los suelos arcillosos, publicado en *Terra* 19:9-17.
14. Menzie, C. A.; B. B. Potocki & J. Santodonato. 1992. *Exposure to Carcinogenic Polycyclic Hydrocarbons in the Environment*. *Environmental Science & Technology*. 26:1278-1284.
15. Mosler, C. 2002. *Situación actual de los residuos peligrosos*. En: Cortinas, C. y C. Mosler (eds.).
16. Paillat, T, E. Moreau, P.O Grimaud y G. Touchard 2000. *Electrokinetic phenomena in porous media applied to soil decontamination*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 7: 693-704
17. *Petróleos Mexicanos (PEMEX) 2001. Informe 2001: Seguridad, salud y medio ambiente*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, PEMEX, México.
18. Proceeding of the seventh international FZK/TNO Conference on contaminated soil 18-22 September 2000, Leipzig, Germany. *Contaminated Soil 2000 vol1*. Ed. Thomas Telford.

19. Proceeding of the seventh international FZK/TNO Conference on contaminated soil 18-22 September 2000, Leipzig, Germany. Contaminated Soil 2000 vol2.Ed. Thomas Telford.
20. *Riser-Roberts, E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. Lewis Publishers. 542 pp.*
21. Sánchez Pachón Carlos. Principios Actuales para la Caracterización de Suelos Contaminados en los EE.UU. IGME.MADRID 2003. ISBN:84-7840-485-6
22. *Saval, B. S. 1995. Acciones para la Remediación de Suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo. Instituto de Ingeniería. UNAM.*
23. *Sellers, K. 1999. Fundamentals of hazardous waste site remediation. Lewis Publishers. 326 pp.*
24. SEMARNAP 1996. Los Suelos de Tabasco Restauración, Conservación y Uso . Gobierno Constitucional del Estado de Tabasco.
25. *Semple, K.T., B.J. Reid y T.R. Fermor 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. Environ. Pollution 112: 269-283.*
26. Trujillo Bolio Ernesto Eduardo. Cumplimiento Ambiental Suelo Limpio. Secretaria de medio ambiente del distrito federal, 29 de junio de 2005.
27. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2001. *Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report.10th Edition. Office of Solid Waste and Emergency Response.*
28. *Van Cauwenberghe, L. 1997. Electrokinetics. Technology Evaluation Reports TO-97-03. GWRTAC E Series. USA.*
29. *Van Deuren, J., Z. Wang, Z. y J. Ledbetter 1997. Remediation Technologies. Screening Matrix and Reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA.*
30. Volke Sepúlveda Tania y Velasco Trejo Juan A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología(INE),ISBN 968-817-557-9