



**Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §**

MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA USO DE SUELOS CONTAMINADOS POR DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE TERRESTRE

Miguel Antonio Flores Puente
Sandra Torras Ortiz
Rodolfo Téllez Gutiérrez

**Publicación Técnica No 257
Sanfandila, Qro, 2004**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Medidas de mitigación para suelos
contaminados por derrames de
hidrocarburos en infraestructura de
transporte terrestre**

**Publicación Técnica No 257
Sanfandila, Qro, 2004**

La investigación se realizó en el área de Medio Ambiente, de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por el Quím Miguel Antonio Flores Puente, la Ing Sandra Torras Ortiz, y el M en C Rodolfo Téllez Gutiérrez. Se reconoce la colaboración de la TSU en Tecnología Ambiental, Edith Ruiz Vázquez, por su valiosa participación en el desarrollo del trabajo.

Índice

RESUMEN EJECUTIVO	Página VI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Definición del problema	1
1.3. Justificación	1
1.4. Objetivos	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Suelo y subsuelo	3
2.2 Origen del petróleo	10
2.3 Hidrocarburos	13
2.4 Contaminación	14
2.5 Materiales y residuos peligrosos	14
2.6 Los derrames de sustancias peligrosas (NOM-138)	15
2.7 Emergencia ambiental (EPA)	15
2.8 Contingencia ambiental (NOM-138)	16
2.9 Dilución de suelo contaminado (NOM-138)	16
2.10 Normatividad	16
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	22
4. RESULTADOS	29
4.1 Concepto de remediación	36
4.2 Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos	37
4.3 Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos	38
4.4 Alternativas tecnológicas para la remediación de suelos	42
4.5 La biorremediación como tecnología óptima en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos	52
5. CONCLUSIONES	57
6. RECOMENDACIONES	59
7. GLOSARIO	61
8. BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	65

Resumen

El transporte de mercancías en el país y en la mayor parte del mundo constituye un elemento estratégico e indispensable del proceso de desarrollo nacional desde el punto de vista económico; el transporte influye en la determinación de los costos de producción de bienes y servicios; además, es un factor esencial en el desarrollo de la industria, pero durante estas operaciones de transporte siempre existen riesgos de que ya sea por fallas mecánicas o por fallas humanas de los mismos medios (carretero, ferroviario), se generen alteraciones al medio ambiente, ajenas a los trabajos de construcción de obras tales como derrame de productos durante las diferentes etapas del proceso de transporte; tal es el caso de: carga, descarga y recorrido. Los impactos aunque pueden no tener efectos muy drásticos, en ocasiones son muy severos.

Es por eso que hoy en día los derrames de hidrocarburos y demás sustancias químicas se consideran como emergencias ambientales debido al riesgo de poner en peligro la salud humana y los recursos naturales.

La finalidad principal del estudio es dar a conocer a las personas responsables los principales impactos ambientales que se generan por derrames de hidrocarburos y demás sustancias químicas, mencionando las medidas de mitigación a las que se recurre con mayor frecuencia, y recomendando a su vez la técnica más eficaz.

Abstract

The transport of goods in our country and in most of the world constitutes a strategic and indispensable element of the process of national development from the economic point of view, the transport influences the determination of the costs of production of the goods and services, in addition, it is an essential factor in the development of the industry, but during these operations of transport always there exist risks of which, already it is for mechanical faults or for human faults of the same means (cartwright, railroad worker), alterations are produced to the environment, foreign to the constructed works of the such works as spillage of products that they can present during the different stages of the process of transport as it to be: load, exhaust and tour. The impacts may have no very drastic effects but in occasions they are very severe.

Is because of it that nowadays the spillages of hydrocarbons and other chemical substances, are considered to be environmental emergencies due to the fact that they can put in danger the human health and natural resources.

The principal purpose of this study is to give to know the principal environmental impacts that are generated due to the spillages of hydrocarbons and other chemical substances mentioning the measures of mitigation used with major frequency and recommending in turn the most effective technology.

Resumen ejecutivo

El transporte de mercancías en el país y en la mayor parte del mundo constituye un elemento estratégico e indispensable en el proceso de desarrollo nacional desde el punto de vista económico. El transporte influye en la determinación de los costos de producción de los bienes y servicios; además, es un factor esencial en el desarrollo de la industria. Pero durante estas operaciones de transporte, siempre existen riesgos de que ya sea por fallas mecánicas o por fallas humanas de los propios medios (carretero, ferroviario), se generen alteraciones al medio ambiente, ajenas a los trabajos de construcción de obras, tales como derrame de productos durante las diferentes etapas del proceso de transporte por ejemplo: carga, descarga y recorrido, durante el cual se producen accidentes (en los medios de transporte como pipas, autos tanque, buques, etc), y que por su volumen e impacto son los de mayor trascendencia. Estos percances conllevan al derrame de hidrocarburos o de sustancias químicas que al estar presentes en lugares como suelo o agua representan una afectación significativa que aunque suele ser local y puntual, puede llegar a tener impactos negativos en ecosistemas enteros, afectando de manera evidente los recursos naturales, las zonas urbanas, la economía y la sociedad (pero principalmente al ambiente).

Los impactos aunque pueden no tener efectos muy drásticos en ocasiones son muy severos al grado de que hábitats completos se afectan en forma importante al grado de que su recuperación requiere periodos extremadamente largos, pues la degradación natural de la más simple de estas sustancias puede llevarse decenas de años.

Es por ello que el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) como órgano preocupado y dedicado a la investigación y desarrollo tecnológico del sector transporte se dio a la tarea de realizar este estudio, en el cual se mencionan las medidas de mitigación para remediar suelos contaminados por sustancias derramadas durante cualquier emergencia ambiental ocurrida en el transporte de sustancias químicas.

Los agresores de mayor preocupación son sin duda los hidrocarburos, que no son otra cosa que los compuestos del carbono más simples por estar constituidos únicamente por carbono e hidrógeno; obviamente, dentro de esta condición existen muchas formas moleculares y diversas características físico-químicas. Sin embargo, todas comparten la particularidad de ser lentamente biodegradables de ahí que su impacto sea tan negativo al medio ambiente cuando hay derrames en suelos.

La contaminación de suelos con hidrocarburos es un problema que se ha vuelto muy común en nuestros días, debido principalmente al extensivo uso y consumo de combustibles derivados del petróleo a todo lo largo del país. Estos acontecimientos impactan de manera negativa al entorno ecológico,

entendiendo como tal la flora, fauna, e incluso la población que está en contacto con los sitios contaminados por hidrocarburos y sustancias químicas.

Entre los combustibles destilados del petróleo más comunes se encuentran la gasolina, kerosina o queroseno, turbosina, diesel, gasóleo y combustóleo. Y aunque han sido investigados durante mucho tiempo y su química es bien conocida, el estudio como contaminantes de suelo, e incluso de acuíferos y aire se ha desarrollado en las últimas décadas.

Generalmente, la distribución de algunos de estos productos se realiza por una enorme red de ductos (70%) que recorre gran parte del territorio nacional, conectando las diferentes estaciones y subestaciones de distribución y venta con las refinerías y plantas petroquímicas del país, que son las encargadas del procesamiento de dichos productos. Adicionalmente se utiliza la red de carreteras nacionales (30%) para el transporte de gasolina, diesel y algunos otros derivados del petróleo. Lo cual implica un riesgo latente durante el traslado de estas sustancias.

Es por eso que hoy en día los derrames de hidrocarburos y demás sustancias químicas, se consideran como emergencias ambientales debido a que pueden poner en peligro a la salud humana y recursos naturales.

La finalidad principal de este estudio es dar a conocer a los responsables. los principales impactos ambientales que se generan por los derrames de hidrocarburos y demás sustancias químicas y al mismo tiempo incluir aquellas medidas de mitigación empleadas con mayor frecuencia, con sus respectivas técnicas más eficaces.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Ha sido importante la cantidad de derrames de hidrocarburos en los distintos modos de transporte, trayendo consigo grandes impactos negativos al medio, principalmente al suelo; debido a la industrialización y a la necesidad masiva de hidrocarburos y de mas sustancias químicas, cada vez existe mayor número de derrames, por ellos nuestro medio ambiente tiene cada vez mayor necesidad de remediar sitios contaminados. Además, los derrames de hidrocarburos no sólo representan peligro para el suelo, sino también para el aire, agua y principalmente a quienes están en contacto directo con estos tres factores tan indispensables para nosotros.

Los hidrocarburos tienen el poder de causar daños sumamente graves en humanos, como puede ser algún tipo de cáncer, por ejemplo. De ahí la necesidad de emitir información para influir en la minimización de los derrames de hidrocarburos. Una variedad de sustancias peligrosas contaminantes puede eliminarse mediante distintas tecnologías; una de ellas es la biorremediación, como una opción sumamente innovadora para reducir los efectos de pesticidas, herbicidas, petróleo y sus derivados y metales pesados, entre otros.

1.2 Definición del problema

Los derrames de hidrocarburos en la infraestructura de transporte terrestre, implica pérdidas económicas y de tiempo, así como también grandes impactos negativos al medio (contaminación de suelos, agua subterránea, daños a la salud humana, etc).

1.3 Justificación

Debido a los requerimientos de desarrollo nacional, que generalmente repercuten en la contaminación de suelos, aguas superficiales o subterráneas, e incluso mantos freáticos por derrames de hidrocarburos a través de los diferentes modos de transporte, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se ha dado a la tarea de realizar un estudio sobre los mismos; todo esto para dar a conocer los riesgos, el número de accidentes diversos, los daños a la salud, las posibles pérdidas tanto económicas como naturales. Para lo cual se mencionarán diversas medidas de mitigación más comunes, tratando de crear conciencia en la población en general.

1.4 Objetivos

Emitir información tanto bibliográfica como estadística acerca de la problemática que implican los derrames de hidrocarburos en los diferentes modos de transporte.

Difundir la protección y remediación de los suelos contaminados por hidrocarburos y demás sustancias químicas.

2 Marco teórico

Para lograr comprender la afectación provocada por derrames de hidrocarburos y demás sustancias químicas en vías terrestres, es necesario saber qué es el suelo por ser el primer receptor del contaminante, además de que la palabra suelo tiene muchos significados porque existe una gran diversidad de suelos en el mundo dificultando con ello una definición precisa.

2.1 Suelo y subsuelo

Primero que nada se debe saber que el suelo y el subsuelo son términos que difícilmente pueden emplearse por separado. En un lenguaje coloquial, suelo es la superficie, y subsuelo es hacia la profundidad; sin existir una referencia para saber qué tan profundo es el suelo y donde empieza el subsuelo.

Suelo y subsuelo constituyen un recurso natural que desempeña diversas funciones, entre las que destacan su papel como medio filtrante durante la recarga de acuíferos y de protección a los mismos; también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimenticia, además de ser el espacio en el cual se realizan actividades agrícolas, ganaderas, y áreas verdes de generación de oxígeno.

2.1.1 El suelo

Constituye la capa superficial del manto, cuya profundidad es variable. Está compuesto por partículas minerales, organismos vivos, materia orgánica, agua y sales. La mayoría de los componentes provienen de la meteorización de rocas, descomposición de restos vegetales, y la acción de microorganismos descomponedores. El suelo constituye uno de los recursos naturales más importantes; sin él, la vida vegetal en la superficie terrea no existiría y, en consecuencia, no se producirían alimentos para la vida animal ni para el individuo. El suelo es un medio muy complejo, compuesto de tres fases principales; la sólida (50 %); la líquida, y la gaseosa (entre las dos últimas 50%) que esta dispuesta en diferentes formas, tanto como macroscópico, como en el ámbito microscópico, para formar cientos de diferentes tipos de suelos conocidos en el mundo.

Tabla1
Clasificación de los suelos por tamaño de partículas

División	Tamaño de partícula (mm)
Grava	Mayor de 2
Arena	2,0 a 0,20
Arena muy fina	0,02 a 0,02
Limo	0,02 a 0,002
Arcilla	Menor a 0,002

2.1.2 Formación del suelo

En los suelos se manifiestan los procesos climatológicos, físicos, químicos y biológicos que a continuación se mencionan:

Agentes físicos: las rocas y minerales que se encuentran sobre la superficie de la corteza terrestre, debido a su contacto con la atmósfera sufren la acción permanente de procesos exógenos, como la meteorización, el viento y el agua.

Agentes químicos: ocasionada principalmente por la acción del agua. La disolución de las rocas por el agua abre el camino a la descomposición química de la roca arrastrando consigo los materiales más solubles, y los lleva a capas más profundas.

Agentes biológicos: los constituyen los componentes orgánicos vivos y no vivos. Los líquenes, musgos y pequeñas plantas transforman al suelo por la disgregación fisicoquímica de las rocas. Las raíces de estas plantas van formando el suelo con sus restos orgánicos que al morir se unen al suelo como material orgánico.

2.1.3 Estructura del suelo

Un corte vertical a través de un suelo natural revela una estratificación característica, que se denomina perfil del suelo. Se distinguen en este perfil tres capas superpuestas u horizontes con características distintas. Estos horizontes son:

Horizonte A: es la capa superficial, de color oscuro por su contenido de humus; rica en materia orgánica y actividad biológica. Está formada por partículas de arena y arcilla.

Horizonte B: es de color más claro. En él se asienta el material proveniente desde el horizonte superior como el óxido de hierro y material aluminico.

Horizonte C: es el horizonte más profundo, y constituye el origen de los otros dos horizontes, donde se encuentran fragmentos de la roca madre.

2.1.4 Composición del suelo

Componentes inorgánicos: se pueden presentar en estado líquido, sólido y gaseoso. Los materiales sólidos son partículas minerales que se van alterando. El tamaño de la partícula determina la propiedad física del suelo. Los líquidos y gaseosos son el agua y el aire, que son indispensables para la vida vegetal.

Componente orgánico: son los residuos de vegetales y animales muertos. La descomposición de estos materiales se debe principalmente a la acción de bacterias, hongos, musgos, líquenes e insectos, y logran fijar el nitrógeno que es importante como sustancia útil en los procesos esenciales de las plantas.

2.1.5 Clasificación de los suelos

Su clasificación se empezó a dar desde el inicio de la agricultura hace unos 10,000 años, ya que el hombre empezó a considerar la tierra como medio para el desarrollo de las plantas. Para el año 3000 a C, ya existían ideas de esos primeros agricultores de reconocer diferencias entre algunos tipos de suelos mostrando predilección por los limosos.

Se cree que la clasificación de los suelos más antigua se desarrolló en China hace 4,000 o 5,000 años. Se basaba en la capacidad de los suelos para producir cosechas que se utilizaban para determinar impuestos. Los griegos y los romanos también reconocieron una diversidad de suelos que los llevo a una serie de prácticas de manejo de ellos que todavía se utilizan en la agricultura. (Blanca Elena Jiménez Cisneros, "La contaminación ambiental en México")

Por su origen se clasifican en:

Suelos residuales: se forman en el mismo punto donde las rocas son desintegradas por los agentes físicos, químicos y biológicos.

Suelos sedimentarios: se forman por la acumulación de partículas y restos provenientes de otros sitios que han sido arrastrados por agua o viento.

Por su composición se clasifican en:

Suelos arenosos: compuestos principalmente de arena. Son muy permeables, y de color gris.

Suelos arcillosos: compuestos en su mayoría por arcilla. Son pesados y compactos, y además poco permeables. Son de color rojizo. Son aptos para la agricultura.

Suelos magros o limosos: son una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla; son muy aptos para la agricultura.

Suelos humíferos: poseen gran cantidad de humus, y debido a su alto contenido de materia orgánica resultan aptos para cualquier actividad agrícola. Son de color negruzco.

Suelos calcáreos: en ellos se cultiva maíz y cebada. Requieren ser abonados y regados con abundante agua. Las sales calcáreas les da un color blanquecino.

Desde el punto de vista científico – tecnológico

El suelo se define como un material no consolidado sobre la superficie de la Tierra, que se ha formado mediante una dinámica a partir de la corteza terrestre con la influencia de factores ambientales; proceso que ha tomado miles de años para tenerlo en su estado comúnmente conocido. Es un medio complejo y dinámico de constante evolución.

El suelo y el subsuelo en conjunto, tienen diversas funciones como: filtro amortiguador y transformador, productor de alimentos, hábitat biológico, medio físico para la construcción, fuente de materias primas, y herencia cultural.

Son el filtro que limpia el agua de lluvia que recarga los acuíferos y que los protege contra la contaminación. El agua de lluvia arrastra un sinnúmero de compuestos; durante su recorrido estos son retenidos en el suelo; de ahí que se hable de una capacidad amortiguadora. Algunos compuestos son transformados por la microbiota nativa, antes de llegar a los acuíferos.

Como productor de alimentos, el suelo es la base para la vida humana y animal; permite la implantación de las raíces de las plantas, y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas.

El suelo desempeña también una importante función como hábitat biológico. Puede desarrollar gran cantidad de especies vegetales y animales que forman parte de la cadena alimenticia, y constituyen la riqueza de la biodiversidad.

Para la construcción, el suelo es la base física de las edificaciones, sean

viviendas, industriales, lugares de recreo, sistemas de transporte o sitios para disposición de residuos. También es fuente de materias primas, como arcillas, arena, grava y minerales.

Finalmente, el suelo alberga una gran herencia cultural, representada por tesoros arqueológicos y paleontológicos, que son una fuente única de información que debe ser mantenida como un testimonio de la historia de la Tierra y de la humanidad.

Todo lo anterior lleva a pensar en la necesidad de prevenir el daño al suelo y recuperarlo cuando éste es afectado, por ser un recurso natural difícilmente renovable.

Desde el punto de vista jurídico - administrativo

El suelo es parte del patrimonio nacional, independientemente de su valor y su uso, razón por la que su cuidado es corresponsabilidad de todos los mexicanos. El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que “la propiedad de las tierras y las aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponden originalmente a la nación por lo que se dictarán medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico... Y para evitar la destrucción de los recursos naturales y los daños que pueda sufrir en perjuicio de la sociedad”.

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA), es el instrumento fundamental de referencia que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales. El título IV, Capítulo III, lleva por nombre Prevención y Control de Contaminación del Suelo. Consta de 11 artículos, del 134 al 144, pero en su redacción existe poca precisión.

Menciona que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo, siendo que resultan ser tan solo uno de los tantos ejemplos de afectación. La LGEEPA parece no considerar otros contaminantes que se derraman como parte de actividades industriales, por ejemplo, los residuos del procesamiento del petróleo, incluyendo combustibles y petroquímicos, aceites gastados y metales, los cuales se consideran como residuos peligrosos.

Como producto de estos vacíos en la legislación, no se le ha dado al suelo su valor como recurso natural, por lo que no se ha enfatizado la necesidad de limpiar las zonas aledañas.

Desde el punto de vista internacional

El compromiso que adquirimos recientemente ante la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá, es un reto de competitividad ante estas dos grandes potencias en el terreno comercial, pero también ambiental a través de los acuerdos de cooperación ambiental y laboral. Entre los objetivos prioritarios de

estos acuerdos quedó establecido: fortalecer la conservación, la protección y el mejoramiento del ambiente a partir de la cooperación y el apoyo mutuo en políticas ambientales con un alto nivel de atención; Esto incluye la aplicación de leyes y reglamentos, así como su observancia y cumplimiento.

Estados Unidos cuenta con una legislación bien establecida en materia de prevención y control de la contaminación del suelo y subsuelo. La ley federal directamente exige la limpieza de un sitio contaminado con petróleo, a través del Acta de Conservación y Recuperación de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA).

Otras leyes rigen durante la remediación del sitio, como el Acta Global de Respuesta, Compensación y Responsabilidad (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability, CERCLA) de 1980, mejor conocida como Superfund, y el Acta de Reautorización a las Mejoras del Superfund de 1986, así como el Acta de Seguridad de Agua Potable (Safe Drinking Water Act. SDWA) y el Acta de Agua Limpia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA).

Por lo que respecta a Canadá, el gobierno federal ha promulgado varias leyes ambientales de aplicación general, además de que cada provincia tiene sus propios esquemas que regulan la descarga o emisión de sustancias en el ambiente, y establecen medidas de protección y procedimientos de evaluación ambiental.

En Canadá ha sido muy fácil la toma de acciones a emergencias ambientales debido a que como parte de su cultura, todos los recursos naturales realmente se protegen de la contaminación. Por ejemplo, la declaración inicial del Acta Canadiense de Protección Ambiental (Canadian Environmental Protection Act, CEPA) de 1988, dice que: la protección del ambiente es esencial para el bienestar de Canadá; la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente es de interés nacional, en parte por aspectos de salud y además porque éstas no pueden ser contenidas dentro de barreras geográficas, siendo necesario cumplir con las obligaciones internacionales en materia ambiental.

Una situación que vale la pena señalar es el hecho de que en México la limpieza de sitios contaminados se ha venido dando como una condición de inversionistas extranjeros interesados en la compra de empresas mexicanas. Es decir, para que el inversionista extranjero decida comprar o invertir capital en una empresa mexicana, es necesario demostrar que no hay contaminantes en el subsuelo del terreno donde la empresa ha venido realizando sus actividades desde años atrás, si los hay, se debe limpiar el sitio en un tiempo que legalmente se determina al momento de la transacción. Esta situación ha abierto las puertas del mercado a todo tipo de tecnologías y consultorías ambientales y extranjeras.

2.1.6 Destrucción del suelo

El mayor agente destructor del suelo es la acción del agua. Ésta se desliza por terrenos inclinados, y si hay poca vegetación arrastra gran cantidad de materiales a su paso, produciendo el empobrecimiento y la improductividad de los suelos.

El viento es otro agente destructor del suelo en donde arrastra y transporta partículas de las zonas que no poseen vegetación. Además existen diversos factores; en la tabla 2 se puede observar las principales causas y el porcentaje de acuerdo con la superficie total del país.

Tabla 2
Superficie del suelo degradado por tipo, 1999

Concepto	Superficie (km ²)	Porcentaje a/
Total	1254627,5	64
Erosión hídrica		
Pérdida de la capa superficial	495668,9	25,3
Deformación del terreno	227760,4	11,6
Sedimentaciones	1222,2	0,1
Erosión eólica		
Pérdida de la capa superficial	285856,3	14,6
Deformación del terreno	5855,2	0,3
Degradación química		
Pérdida de nutrimentos	31171,9	1,6
Gleyzación	12989,3	0,7
Salinidad	62421,2	3,2
Contaminación	25967,2	1,3
Degradación física		
Urbanización	7489,2	0,4
Aridificación	10789,7	0,6
Compactación	5473,2	0,3
Inundaciones	11145,6	0,6
Degradación biológica	70817,5	3,6

a/ Porcentaje respecto a la superficie total del país.

FUENTE: INEGI. INDICADORES DE DESARROLLO SUSTENTABLE EN MÉXICO, 2000.

2.1.7 Consecuencias de la degradación del suelo

Pérdida de elementos nutrientes (N, P, S, K, Ca, Mg,...): puede ser de manera

directa, bien al ser eliminados por las aguas que se infiltran en el suelo, o bien por erosión a través de las aguas de escorrentía, o de la forma indirecta, por erosión de los materiales que los contienen o que podrían fijarlos.

Modificación de las propiedades fisicoquímicas: acidificación, desbasificación y bloqueo de los oligoelementos que quedan en disposición no disponible.

Deterioro de la estructura. la compactación del suelo produce una disminución de la porosidad; genera un encostramiento superficial; por tanto, aumenta la escorrentía.

Disminución de la capacidad de retención del agua: por degradación de la estructura o por pérdida del suelo. Esta consecuencia es especialmente importante para los suelos andaluces sometidos a escasas precipitaciones anuales.

Pérdida física de materiales: erosión selectiva (parcial, de los constituyentes más lábiles, como los limosos), o masiva (pérdida de la capa superficial del suelo, o en los casos extremos de la totalidad del suelo).

Incremento en la toxicidad. al modificarse las propiedades del suelo, y una disminución de la masa del suelo.

Estos efectos tienen dos consecuencias generales:

A corto plazo: disminución de la producción y aumento de los gastos de explotación (cada vez, el suelo necesita mayor cantidad de abonos y cada vez produce menos).

A largo plazo: infertilidad total, abandono, desertización del territorio.

Es por ello que se debe tener en cuenta que es algo real, y que en la actualidad grandes porciones de suelo están siendo afectadas por hidrocarburos y demás sustancias peligrosas; para comprender bien el problema se menciona a continuación lo indispensable del petróleo y sus derivados (hidrocarburos).

2.2 Origen del petróleo

Hace mucho tiempo se desarrolló, murió y sedimentó gran cantidad de organismos en los océanos. Este fango, lentamente se volvió roca y fue comprimida por altas presiones y calor en ausencia de aire, dando origen al petróleo y al gas natural

Desde sus comienzos, y prácticamente hasta la década de los años 50 las explotaciones petrolíferas se limitaron a tierra firme; actualmente, el 85% de la producción mundial procede de dicha fuente. (Blanca Elena Jiménez Cisneros, "La contaminación ambiental en México")

2.2.1 Petróleo

El petróleo es una mezcla muy compleja de cientos de compuestos químicos; sus características y la proporción de sus constituyentes varían en función de su origen geológico y geográfico. El petróleo es un producto natural, por lo que la propia naturaleza es capaz de reincorporar una muy pequeña fracción de éste a los ciclos biogeoquímicos, ya que la complejidad química de algunos de sus constituyentes hace que el proceso requiera varios años.

Cuando la cantidad de petróleo en el ambiente es mayor de la que puede ser reciclada, se convierte en un contaminante de impacto negativo, ya que entre sus componentes existen altas concentraciones de sustancias consideradas como residuos peligrosos por su efecto dañino a la salud. Ejemplos de estos son: benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, naftaleno, antraceno, fenantreno, cresoles, fenoles, ciclopentano, ciclohexano y etileno. Algunos de ellos son cancerígenos, como el caso de benceno, naftaleno, antraceno y fenantreno. Por lo anterior, los derrames de petróleo resultan ser residuos peligrosos.

Otros compuestos como los bifenilos policlorados son completamente sintéticos y altamente tóxicos, es decir, muy ajenos a la naturaleza, por lo que no pueden ser degradados de manera natural, ni reincorporados a ésta.

2.2.2 Potencia internacional del petróleo

La explotación y producción del petróleo y gas natural comenzó hace 100 años cuando se encontró un yacimiento en las costas de California. Durante la década de los 30, y después de la Primera Guerra Mundial, los principales campos de producción estuvieron localizados en Estados Unidos (Louisiana y Texas), Venezuela (Lago de Maraca).

2.2.3 Impacto ambiental por el uso del petróleo

Las etapas que componen el procesamiento del petróleo son: explotación, transporte, refinamiento, almacenamiento y uso. Las alteraciones ambientales que cada una provoca varían, y son responsabilidad de diferentes sectores de la población y zonas donde se producen.

La etapa más importante en torno a este estudio es la del transporte de petróleo.

Hay dos formas de transportar el combustible por vías terrestres o por vías marítimas.

2.2.4 Transporte terrestre

Ductos: siempre sujetos a riesgos de accidentes de diversa índole, que de producirse significan derrames, explosiones, incendios, desprendimientos de gases de los tanques de almacenamiento (evapotranspiración: vertimientos de residuos de hidrocarburos).

Carreteras y ferrocarril: Por estos medios se transportan productos ligeros, gases licuados, gasolinas, naftas, etc. En carretera el riesgo es mayor, aunque son menores los volúmenes transportados.

2.2.5 Transporte marítimo

El transporte del petróleo y sus productos se realiza principalmente por mar. Actualmente es del orden de 1,500 millones de toneladas anuales, lo que representa más del 60% del tráfico marítimo mundial.

2.2.6 Destilación del petróleo

Destilación: de (latín) abajo, stillare (latín) gotear. La destilación es una técnica que se emplea para separar sustancias con diferentes puntos de ebullición.

Para separar los importantes componentes del petróleo se usa la destilación fraccionada, mediante la cual el petróleo crudo se calienta en un horno. Los alcanos líquidos se vaporizan y se elevan en una torre de fraccionamiento. Los gases que estaban disueltos en el petróleo se separan por la parte superior de la torre, se condensan hasta hacerse líquidos y se venden en cilindros. La gasolina es una parte del siguiente grupo de materiales que se separan. Después de la fracción de la gasolina siguen mezclas de hidrocarburos más pesados, como queroseno, aceites combustibles y lubricantes, y asfalto (Phillips; Strozak; Wistrom).

Para tener más claro lo definido (en las figuras de los Anexos A y B, y en las tablas 3 y 4 de los Anexos C y D), se puede observar de manera resumida los procedimientos de la destilación del petróleo y los principales productos que se obtienen de esta destilación; y en la tabla 1 del anexo B se indican algunos hidrocarburos su punto de ebullición, su composición y uso, además de que se puede apreciar el contenido de hidrocarburos en ciertos combustibles.

2.3 Hidrocarburos

Están constituidos únicamente por carbono e hidrógeno, y forman la base estructural común de todos los demás compuestos orgánicos. La mayoría se extrae de combustibles fósiles, en particular el petróleo, pero también del gas natural y de la hulla. Otras fuentes importantes incluyen la madera y los productos de fermentación de las plantas. En este caso nos enfocaremos a los derivados del petróleo, por ello es necesario recordar que el crudo es una mezcla compleja de sustancias formadas por restos de animales y vegetales que han estado sometidos a la acción bacteriana y a la catalítica de algunos compuestos inorgánicos durante millones de años. A consecuencia de esto, el petróleo contiene una gran cantidad de hidrocarburos saturados y los productos que se obtienen de él como lo son la gasolina, el aceite combustible, los aceites lubricantes y la parafina consisten principalmente en mezclas de estos hidrocarburos que varían de los líquidos más ligeros a los sólidos, como se mencionó antes en la destilación del petróleo.

2.3.1 Hidrocarburos aromáticos

De aquellos hidrocarburos en los cuales se hará mayor énfasis serán los aromáticos, ya que por sus características fisicoquímicas resultan de mas impacto hacia la salud humana y ambiental.

Se les llama aromáticos debido a que muchos compuestos de esta serie tienen olores intensos y casi siempre agradables.

El hidrocarburo aromático más sencillo es el benceno, que es el compuesto fundamental de toda la serie aromática. La estructura molecular del benceno ha sido estudiada exhaustivamente por numerosos métodos, tanto químicos como físicos.

Los más sencillos pueden considerarse como derivados del benceno, por sustitución de uno o varios átomos de hidrógeno por radicales hidrocarbonados, bien sean saturados, como metilo, etilo, n-propilo, iso-propilo, etc o no saturados, como etenilo o vinilo, etinilo, etc. Existen, además, muchos otros aromáticos con varios anillos, llamados por esto, *polinucleares*; como por ejemplo, el *naftaleno*, *antraceno*, *fenantreno*, etcétera, y todos sus derivados por sustitución de átomos de hidrógeno por radicales hidrocarbonados. Sus propiedades tanto físicas como químicas son de la siguiente manera:

Son todos incoloros (el antraceno presenta fluorescencia azulada), muy aromáticos, insolubles en agua, y menos densos que ésta.

Las reacciones más importantes de los hidrocarburos aromáticos son las de

sustitución, en las que un grupo funcional sustituye a uno de los átomos de hidrógeno del anillo aromático.

Los aromáticos en su mayoría generan actividad carcinogénica en humanos y animales, de tal suerte que la presencia de estas sustancias químicas en suelos, y en yacimientos de agua de consumo humano representa un peligro enorme a la salud de quienes tengan contacto con sitios contaminados con hidrocarburos, ya que se trata de sustancias no metabolizables para el individuo, es decir, que el cuerpo humano no las puede degradar, pero tampoco desechar, de modo que son absorbidas por algún tejido principalmente en el adiposo de cualquier organismo por ser los hidrocarburos solubles en grasa, provocando la mutación de sus células dando como resultado diferentes tipos de cáncer (Miguel Antonio Flores Puente investigador del IMT). (Ing Juan Manuel Lèsser. /Dra Susana Saval, Instituto de Ingeniería, UNAM) y (Blanca Elena Jiménez Cisneros, “La contaminación ambiental en México”) (Anexo G Fig 3).

2.4 Contaminación

El término contaminación puede definirse como la introducción al ambiente de un compuesto, en cantidad tal que incrementa su concentración natural, y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de materia y energía.

2.4.1 Riesgos a la población

Tipos de riesgos a los que se expone la población ante un derrame de hidrocarburos y demás sustancias químicas. En el diagrama 1 del Anexo H se puede observar cómo identificar los residuos peligrosos.

2.5 Materiales y residuos peligrosos

De acuerdo con la LGEEPA, un material o residuo peligroso por sus características, representa un peligro para el ambiente, la salud y los recursos naturales. Para calificar a un material o residuo como peligroso, se debe aplicar el análisis conocido como CRETIB. Su nombre resulta de las siglas que corresponden a cada una de las características del material como sigue: **C**orrosividad, **R**eactividad, **E**xplosividad, **T**oxicidad, **I**nflamabilidad y **B**iológico infeccioso. Dicho análisis se debe practicar conforme la normatividad, y se considerara confiable únicamente cuando se realiza en laboratorios reconocidos por la Entidad Mexicana de Acreditación A.C. Cualquier material o residuo cuyo resultado sea positivo para alguna de las características citadas, se considera

peligroso.

Los suelos contaminados por hidrocarburos se consideran peligrosos por lo que se solicitaba el análisis CRETIB. Sin embargo, el INE a través de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, se ha dado a la tarea de rescatar al suelo como recurso natural, y establecer nuevos criterios basados en estudios químicos. En la actualidad, lo que procede es identificar el tipo y concentración de los contaminantes, lo cual constituye el punto de partida para estudiar las alternativas que permitan su tratamiento. En las tablas 5 y 6 de los Anexos E y F se muestra la concentración máxima permitida de algunas sustancias orgánicas en suelos.

Es precisamente por la agresividad a la salud y a la naturaleza, que debemos saber que:

2.6 Los derrames de sustancias peligrosas (NOM138)

Son cualquier descarga, liberación, rebose, achique o vaciamiento de hidrocarburos u otras sustancias peligrosas en estado líquido, que se presenten en tierra y/o en cuerpos de agua (NOM-EM- 138-ECOL-2002).

2.7 Emergencia ambiental (EPA)

Es una amenaza súbita a la salud pública o al bienestar del medio ambiente, debido a la liberación (actual o potencial) del aceite, los materiales radioactivos, o químicos peligrosos en el aire, tierra, o agua. Estas emergencias pueden suceder por accidentes de transporte, por incidentes en facilidades que emplean o fabrican sustancias químicas, o como resultado de un desastre natural o la acción del ser humano.

2.7.1 Emergencia ambiental (NOM-138)

Es un evento o circunstancia indeseado, que ocurre repentinamente y que resulta en la liberación no controlada, incendio o explosión de una o varias sustancias peligrosas para el medio ambiente y/o la salud humana, de manera inmediata o a largo plazo.

2.8 Contingencia ambiental (NOM-138)

Es una situación de riesgo, derivada de actividades humanas o fenómenos naturales, que pueden poner en peligro la integridad de uno o varios ecosistemas.

2.9 Dilución de suelo contaminado (NOM-138)

Acción de adición de un material que se agrega específicamente para reducir la concentración de uno o más contaminantes en el suelo.

2.10 Normatividad

Una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación de un sitio, suelo y subsuelo se deben plantear opciones para su limpieza y establecer los niveles de limpieza. Es decir el límite máximo de contaminación que se aceptará en un suelo después de haber sido sometido a un tratamiento de remediación.

En la actualidad existen normas que señalan los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para su restauración (NOM-EM- 138-ECOL-2002).

También hay normas que aún están en proyecto, como PROY-NOM-052-ECOL-2001) que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de residuos peligrosos.

Como parte de la normatividad contamos con:

2.10.1 Reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos

Tiene por objeto regular el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos.

Se clasifican las sustancias peligrosas; se regula el envase y embalaje; la identificación de las unidades; las condiciones de seguridad (inspección de unidades), del acondicionamiento de la carga.

Titulo cuarto

De las condiciones de seguridad

El capítulo III: se refiere a la documentación con la que debe cumplir el transportista y el expedidor para el desplazamiento de materiales y residuos peligrosos: autorizaciones correspondientes, descripción e información complementaria del producto que se transporte. La unidad debe contar con:

Documentos de embarque del material o residuo peligroso.

- Información de emergencia de transportación, que indique las acciones a seguir en caso de suscitarse un accidente, de acuerdo con el material o residuo peligroso que se trate, la cual deberá apegarse a la norma que expida la SCT, y colocarse en un lugar visible de la cabina de la unidad, de preferencia en una carpeta portafolios que contenga los demás documentos
- Documento que avale la inspección técnica de la unidad
- Manifiesto de entrega, transporte y recepción, para el caso de transporte de residuos peligrosos
- Autorización respectiva, para el caso de importación y exportación de materiales peligrosos
- Manifiesto para casos de derrames de residuos peligrosos por accidente: cuando en cualquier evento se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de sustancias, se deberá dar aviso a la PROFEPA
- Los demás que se establezcan en las normas

Será obligatorio además de lo anterior, que en la unidad de autotransporte se cuente con los siguientes documentos:

- Licencia federal de conducir específica para el transporte de materiales peligrosos
- Bitácora de horas de servicio del conductor
- Bitácora relativa a la inspección ocular diaria de la unidad
- Póliza de seguro individual, o conjunto del autotransportista, y del expedidor del material o residuo peligroso
- Documento que acredite la limpieza y control de remanentes de la unidad, cuando ésta se realice. La limpieza sólo será obligatoria por razones de incompatibilidad de los productos a transportar.,

En el título octavo (de las obligaciones específicas)

Capítulo II

Del conductor

Artículo: 120 Todo conductor que transporte materiales y residuos peligrosos está obligado a:

- Contar con licencia federal expedida por la SCT que lo autorice a conducir vehículos con materiales o residuos peligrosos
- Aprobar cursos de capacitación y actualización de conocimientos
- Efectuar la revisión ocular diaria del vehículo, para asegurarse que éste se encuentra en buenas condiciones mecánicas y de operación, y en caso de irregularidades reportarlo al transportista de conformidad con la norma que se emita
- En caso de accidentes deberá realizar las condiciones de seguridad estipuladas en la información de emergencia de transportación, y permanecer al cuidado del vehículo y su carga si no presenta peligro para su persona, hasta que llegue el auxilio correspondiente
- Colocar en un lugar visible dentro de la cabina de la unidad motriz, de preferencia en una carpeta portafolios, todos los documentos requeridos en el presente reglamento

Capítulo IV

De la capacitación

Artículo 128: el personal y conductores que intervengan en el transporte de materiales y residuos peligrosos deberán contar con una capacitación específica y actualización de conocimientos.

Artículo 129: los programas de capacitación deberán ser aprobados por la SCT, y para su presentación a ésta ser avalados por el fabricante o generador de las sustancias peligrosas.

2.10.2 Guía de respuesta en caso de emergencia

Para los que responden primero en la fase inicial de un incidente ocasionado por materiales peligrosos.

En esta guía, primero se habla acerca de los documentos de embarque por ser la información más importante en caso de accidente, y sirve para iniciar acciones de protección para seguridad del público, Además, deberá ser información disponible que describa los riesgos del material que pueda ser usado en la mitigación de un accidente.

Los documentos de embalaje se guardan en:

La cabina del vehículo

En poder de la tripulación del trenes

En poder de capitán de una embarcación

En el poder de un piloto de una aeronave

Placa y cartel con número ID

El número de ID de cuatro dígitos puede ser mostrado sobre el cartel en forma de diamante, o sobre una placa naranja puesta en los extremos y a los lados de un autotanque, vehículo o carro tanque.

En esta guía se encuentra la clasificación de las sustancias por número de identificación, por nombre del producto involucrado, y se especifican los riesgos potenciales (incendio o explosión a la salud), seguridad publica (ropa protectora y evacuación) y la respuesta de emergencias según el tipo de la misma (fuego, derrame o fuga y primeros auxilios). Después se presenta la tabla de aislamiento inicial y acción protectora. Y finalmente se muestra una lista de materiales reactivos al agua que producen gases tóxicos.

2.10.3 Ley que reforma y adiciona diversos artículos de la LEGEEPA del estado de Querétaro.

Incluso a nivel estatal existe la Ley que reforma y adiciona diversos artículos de la LEGEEPA del estado de Querétaro, en la cual se incluye un título séptimo que trata de emergencias y contingencias ambientales. Los artículos en materia de suelos son: 168 y 169 (cuando se declara contingencia ambiental), 172 (medidas de seguridad). En el capítulo III se mencionan las sanciones administrativas, siendo los siguientes artículos en materia de suelos: 188,189 y193.

La legislación existente en casi todo el mundo, norma los parámetros y concentraciones máximas que se permiten en una emisión según sea el caso. No obstante, no se ha logrado aun tener normativas que se apoyen en estudios que evalúen el daño crónico que se genera en los organismos expuestos por largos períodos de su ciclo vital a concentraciones “bajo la norma” de contaminantes como metales, hidrocarburos, radiaciones, temperatura, etc. Por ejemplo, existen organismos marinos filtradores que tienen la capacidad de acumular metales pesados en sus sistemas digestivos; ¿cuál es la incidencia en la cadena trófica?. Por otra parte, existen sustancias mutagénicas y cancerígenas de las cuales se requiera, tal vez de una sola molécula para lograr cambios metabólicos y heredables en un organismo.

Los derrames de hidrocarburos y demás sustancias nocivas para el medio en los diferentes modos de transporte traen consigo daños económicos, sociales y

ambientales. Es por eso que se debe saber cuales son las alternativas para remediar los suelos contaminados con hidrocarburos. Para ello se toma como herramienta la biorremediación, ya que son técnicas de tratamiento innovador que se aplican a desechos peligrosos o materiales contaminados para alterar su estado en forma permanente por medios químicos, biológicos o físicos. La biorremediación son técnicas que han sido ensayadas, seleccionadas o utilizadas para el tratamiento de desechos peligrosos o materiales contaminados, aunque todavía no se dispone de datos bien documentados sobre su costo, y resultados en diversas condiciones de aplicación, pero lo que si se sabe es que la biorremediación es una herramienta eficaz y de bajo costo.

2.10.4 Normas oficiales mexicanas (SCT)

Son de observancia obligatoria para los expedidores, transportistas y destinatarios de las sustancias, materiales y residuos peligrosos que se transporten por las vías generales de comunicación terrestre, marítima y aérea.

NOM-002-SCT: en esta norma se enlistan las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados

NOM-043-SCT2: en la que se señala el documento de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos

NOM-005-SCT2: en ésta se menciona la información de emergencia para el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

3 Desarrollo del proyecto

Se realizó la recopilación de información estadística generada por la PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente), en términos de derrames de sustancias peligrosas y en especial de hidrocarburos en los diferentes modos de transporte, con la finalidad de analizar los impactos ambientales generados por estos derrames y considerar sus posibles medidas de mitigación.

El número de emergencias ambientales nacionales asociadas con materiales peligrosos ocurridas durante el 2002 suman un total de 471, las cuales se presentan a continuación incluyendo donde ocurrieron y ordenadas de menor a mayor número de emergencias.

Tabla 7
Emergencias ambientales asociadas con materiales peligrosos ocurridas (durante el 2002)

Estado	No de emergencias
Aguascalientes	0
Baja California	0
Baja California Sur	1
Campeche	1
Chiapas	2
Chihuahua	2
Coahuila	2
Colima	3
D F	3
Durango	3
Estado de México	3
Guanajuato	4
Guerrero	4
Hidalgo	4
Jalisco	5
Michoacán	5
Morelos	6
Nayarit	9
Nuevo León	11
Oaxaca	12
Puebla	13
Querétaro	13
Quintana Roo	16
San Luis Potosí	17
Sinaloa	19
Sonora	20
Tabasco	25

Tabla 7. Continuación

Estado	No de emergencias
Tamaulipas	30
Tlaxcala	32
Veracruz	41
Yucatán	73
Zacatecas	92

Total de emergencias: 471

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), 2003.

Tabla 8

Daños a la población por emergencias ambientales reportadas a PROFEPA (durante el período 1998-2002)

Estado	Afectados				
	D	L	I	E	TOTAL
Veracruz	62	449	147	10667	11325
Guanajuato	62	391	171	10420	11044
México	38	154	274	5592	6058
Jalisco	0	19	243	5648	5910
Nuevo León	2	14	452	2905	3373
Morelos	1	0	6	3000	3007
Baja California	3	3	35	2910	2951
Chihuahua	0	0	242	2665	2907
Distrito Federal	7	60	49	2190	2306
Coahuila	17	18	253	1456	1744
Sinaloa	1	40	155	1004	1200
Aguascalientes	0	2	80	1090	1172
Michoacán	7	28	5	850	890
Tamaulipas	9	11	0	850	870
Oaxaca	9	21	317	350	697
Hidalgo	17	26	17	548	608
Sonora	2	16	9	470	497
Colima	1	1	8	400	410
Puebla	2	1	14	258	275
Campeche	4	10	0	236	250
Tabasco	6	19	0	120	145
Durango	0	2	3	120	125
Querétaro	0	1	50	30	81
Yucatán	0	0	0	40	40

Tabla 8 Continuación

Estado	Afectados				
	D	L	I	E	TOTAL
Chiapas	1	17	5	0	23
Guerrero	3	0	20	0	23
Tlaxcala	7	11	0	0	18
Nayarit	9	3	0	0	12
San Luis Potosí	6	2	3	0	11
Quintana Roo	0	4	3	0	7
Zacatecas	2	0	3	0	5
Baja California Sur	0	3	0	0	3
Total	278	1326	2564	53819	57987
Afectados / Día	0,15	0,73	1,40	29,49	31,77

Defunciones (D)

Lesionados (L)

Intoxicados (I)

Evacuados (E)

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Tabla 9
Emergencias ambientales reportadas a PROFEPA (durante el Periodo 1993-2002)

Estado	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	No	%
Tabasco	69	96	140	113	116	57	100	85	89	92	957	19,73
Veracruz	6	39	66	105	121	130	107	103	97	73	847	17,46
Campeche	1	20	14	15	70	55	45	34	42	41	337	6,95
Guanajuato	4	11	23	29	16	35	24	31	37	6	216	4,45
Chiapas	-	20	27	34	24	19	18	21	21	32	216	4,45
Coahuila	9	11	28	25	27	16	14	24	19	12	185	3,81
Nuevo León	-	15	18	19	20	28	14	19	23	25	181	3,73
Tamaulipas	1	28	23	17	10	7	9	8	32	30	165	3,40
Jalisco	30	19	28	27	15	13	9	6	8	5	160	3,30
Oaxaca	4	10	16	12	14	25	14	15	20	16	146	3,01
México	3	22	17	25	10	13	7	4	22	20	143	2,95
Sonora	2	15	14	20	25	20	10	11	15	4	136	2,80
Puebla	1	5	17	15	22	18	8	12	15	19	132	2,72
Hidalgo	7	8	13	2	17	20	14	16	20	13	130	2,68
San Luis Potosí	1	6	13	11	15	10	12	9	15	17	109	2,25

Tabla 9. Continuación

Estado	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	No	%
Baja California	7	17	9	10	18	9	8	5	12	11	106	2,19
Michoacán	1	2	7	15	11	12	12	8	14	13	95	1,96
Chihuahua	6	15	22	17	11	5	4	1	8	3	92	1,90
Sinaloa	2	8	7	11	5	1	6	6	6	9	61	1,26
Tlaxcala	-	6	11	8	6	8	5	6	9	1	60	1,24
Distrito Federal	-	12	8	6	13	2	0	12	3	4	60	1,24
Morelos	-	6	10	10	7	4	4	3	1	2	47	0,97
Durango	-	5	2	2	4	6	3	10	10	4	46	0,95
Aguascalientes	-	1	1	11	10	6	3	3	5	3	43	0,89
Querétaro	-	5	1	3	7	5	4	8	3	5	41	0,85
Guerrero	2	3	2	10	5	3	2	2	3	0	32	0,66
Yucatán	-	-	1	2	5	6	4	3	5	2	28	0,58
Nayarit	1	6	1	3	2	0	2	4	3	1	23	0,47
Zacatecas	-	1	1	2	2	0	3	1	4	3	17	0,35
Baja California Sur	-	3	4	2	1	0	2	0	4	0	16	0,33
Colima	-	-	2	3	2	3	2	0	0	1	13	0,27
Quintana Roo	-	1	1	3	1	2	0	0	0	3	11	0,23
Total	157	416	547	587	632	538	469	470	565	470	4851	100,00
Eventos/Día	0.43	1.14	1.5	1.61	1.73	1.47	1.28	1.29	1.55	1.29	1.33	

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Tabla 10
Número, localización y tipo de las emergencias ambientales reportadas a
PROFEPA (durante el periodo 1993-2002)

Año	Número de eventos	Localización				Tipo							
		Terrestre		Marítima		Fuga o derrame		Explosión		Fuego		Otro	
		No	%	No	%	No	%	No	%	No	%	No	%
1993	157	154	98,1	3	1,9	141	89,8	9	5,7	3	1,9	4	2,5
1994	416	389	93,5	27	6,5	359	86,3	21	5,0	28	6,7	8	1,9
1995	547	540	98,7	7	1,3	428	78,2	35	6,4	53	9,7	31	5,7
1996	587	578	98,5	9	1,5	460	78,4	34	5,8	70	11,9	23	3,9
1997	632	574	90,8	58	9,2	541	85,6	49	7,8	26	4,1	16	2,5
1998	538	483	89,8	55	10,2	467	86,8	18	3,3	39	7,2	14	2,6
1999	469	426	90,8	43	9,2	446	95,1	7	1,5	16	3,4	0	0,0
2000	470	437	93,0	33	7,0	441	93,8	10	2,1	16	3,4	3	0,6
2001	565	530	93,8	35	6,2	517	91,5	17	3,0	19	3,4	12	2,1
2002	470	436	92,8	34	7,2	419	89,1	16	3,4	27	5,7	8	1,7
TOTAL:	4851	4547	93,7	304	6,3	4219	87,0	216	4,5	297	6,1	119	2,5

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Tabla 11
Número, ubicación y medio de transporte de las emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA (durante el período 1993-2002)

Año	Número de eventos	Ubicación						Total
		Planta		Transporte		Otro		
		No	%	No	%	No	%	
1993	157	38	24,2	107	68,2	12	7,6	107
1994	416	92	22,1	221	53,1	103	24,8	221
1995	547	110	20,1	322	58,9	115	21,0	322
1996	587	149	25,4	332	56,6	106	18,1	332
1997	632	145	22,9	477	75,5	10	1,6	477
1998	538	96	17,8	429	79,7	13	2,4	429
1999	469	64	13,6	395	84,2	10	2,1	395
2000	470	68	14,5	392	83,4	10	2,1	392
2001	565	118	20,9	424	75,0	23	4,1	424
2002	470	114	24,3	337	71,7	19	4,0	337
TOTAL	4851	994	20,5	3436	70,8	421	8,7	3436

Medio de transporte									
FFCC		Carretero		Marítimo		Ducto		Otro	
No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
3	2,8	27	25,2	5	4,7	69	64,5	3	2,8
15	6,8	65	29,4	2	0,9	139	62,9	-	-
13	4,0	90	28,0	7	2,2	212	65,8	-	-
13	3,9	96	28,9	9	2,7	214	64,5	-	-
8	1,7	132	27,7	58	12,2	279	58,5	-	-
13	3,0	133	31,0	55	12,8	228	53,1	-	-
14	3,5	107	27,1	43	10,9	231	58,5	-	-
5	1,3	118	30,1	33	8,4	236	60,2	-	-
10	2,4	158	37,3	6	1,4	245	57,8	5	1,2
9	2,7	140	41,5	6	1,8	179	53,1	3	0,9
103	3,0	1066	31,0	224	6,5	2032	59,1	11	0,3

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Tabla 12
Estados con mayor número de emergencias ambientales durante el transporte terrestre de materiales peligrosos durante el Periodo (1993-2001)

Hidalgo	29
San Luis Potosí	25
México	24
Oaxaca	18
Guanajuato	13
Michoacán	12
Puebla	12
Tlaxcala	12
Veracruz	12
Tamaulipas	11
Nuevo León	11
Sonora	11
ZMCM	10
Jalisco	9
Querétaro	8
Morelos	7

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Tabla 13
Principales sustancias involucradas en las emergencias ambientales reportadas a PROFEPA durante el periodo (1996-2001)

Petróleo crudo	42,08
Gasolina	7,83
Diesel	6,8
Combustóleo	5,39
Amoniaco	4,05
Gas L P	3,19
Gas natural	2,3
Aceites	2,27
Ácido sulfúrico	2,27
Solventes orgánicos	1,1
Subtotal	77,28
Otras sustancias	22,72
Total:	100

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Información estatal de emergencias ambientales que se reportaron a profepa (en el periodo 1999-2003)

La siguiente información se obtuvo de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente; corresponde sólo a derrames de hidrocarburos y demás sustancias peligrosas durante su transporte, ya sea ferroviario o carretero.

Tabla 14
Tipo de transporte donde ocurrieron las emergencias ambientales

Tipo de transporte		
Transporte	Frecuencia	Porcentaje(%)
Ferroviano	1	8
Carretero	12	92

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Tabla 15
Principales sustancias involucradas en las emergencias ambientales

Los hidrocarburos son las sustancias que con mayor frecuencia están involucradas en emergencias ambientales.

Sustancias involucradas por tipo		
Sustancia	Frecuencia	Porcentaje
Hidrocarburos	6	55
Elementos alcalinotérreos	1	9
Ácidos	1	9
Alcoholes	1	9
Otros	2	18

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Tabla 16
Emergencias ambientales por tipo de accidente

Las volcaduras y choques son el tipo de accidente que ocurre con mayor frecuencia durante el transporte terrestre de sustancias peligrosas.

Tipo de accidente		
Accidente	Frecuencia	Porcentaje (%)
Volcaduras y choques	7	54
Falla mecánica	1	8
Accidentes naturales	2	15
Otros	3	23

FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Específicamente en el estado de Querétaro durante el periodo 1999-2003, se registraron 13 emergencias ambientales únicamente de derrames de hidrocarburos y sustancias químicas; la mayor parte se presenta en carreteras y con mayor frecuencia el tipo de transporte en el que ocurren es el autotank principalmente en volcaduras y choques. El tipo de sustancias involucradas prácticamente corresponde a los hidrocarburos y derivados del petróleo.

4 Resultados

Los siguientes resultados se obtuvieron en torno a información proporcionada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

En ella se señala que el mayor número de emergencias ambientales ocurren en vías terrestres.

La fuga o derrame de sustancias ocupa un alto porcentaje, y principalmente ocurrieron en ductos, aunque en el carretero también se genera gran número de emergencias ambientales. Durante el transporte terrestre los derrames son el principal tipo de eventos que desembocan en afectaciones ambientales.

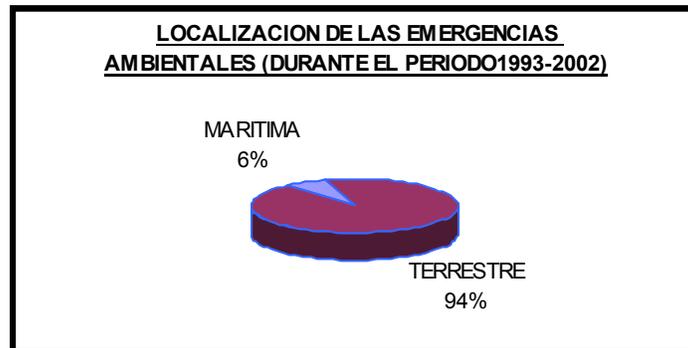
Este gran número de accidentes trae consigo impactos negativos para el ambiente (suelo, agua y aire), principalmente al suelo debido a que es el primer receptor del contaminante.

Las emergencias ambientales son causadas principalmente por fallas humanas representadas por volcaduras y choques derramando algún tipo de sustancia (principalmente hidrocarburos) en el suelo, y con ello la contaminación del suelo en una primera fase debido a que también ocasionan daños a la flora y fauna, al agua y aire, incluso afecta la salud en forma de irritación de vías respiratorias, ojos, piel, etc. Así como a largo plazo, con algún tipo de cáncer, por ejemplo.

Es por eso que a continuación se muestran algunas gráficas en las cuales se puede observar la situación actual de una manera rápida y precisa, y más adelante se algunos elementos técnicos que pueden servir como base para señalar el daño que ha sufrido un sitio contaminado con hidrocarburos además de las medidas de mitigación para la reparación del mismo.

En la siguiente gráfica se puede apreciar que las emergencias ambientales terrestres ocupan un mayor porcentaje.

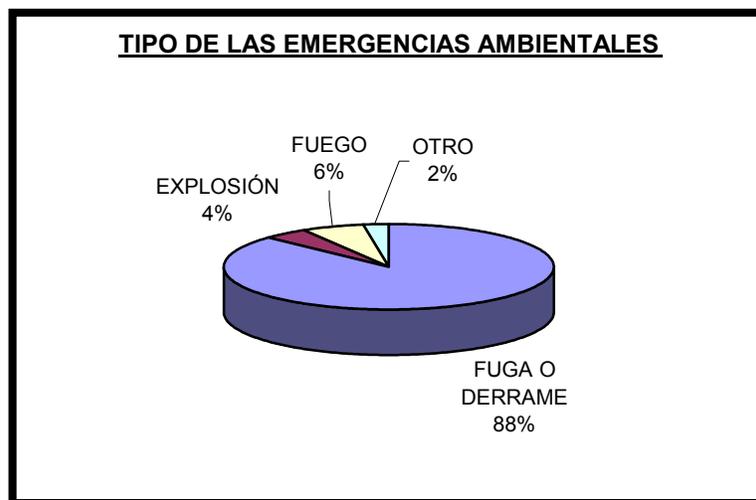
Gráfica 1
Localización de las emergencias ambientales (durante el periodo 1993-2002)



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

La fuga o derrame de sustancias químicas ocupa el mayor porcentaje del tipo de emergencias mencionadas en la siguiente gráfica.

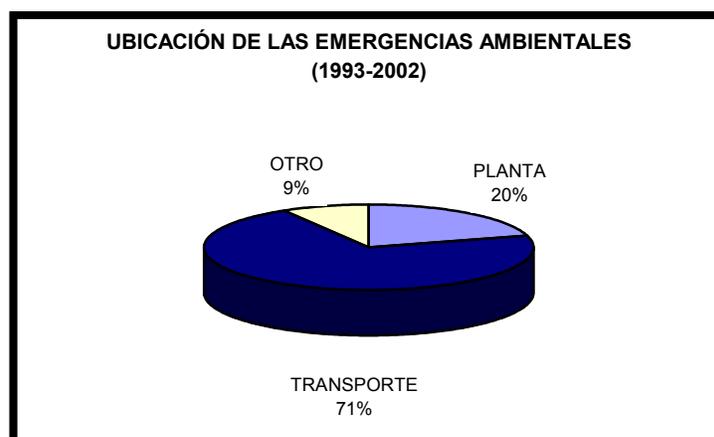
Gráfica 2
Tipo de emergencias ambientales



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Como se puede observar en la siguiente gráfica, el mayor porcentaje de emergencias ambientales ocurrieron durante el transporte de sustancias.

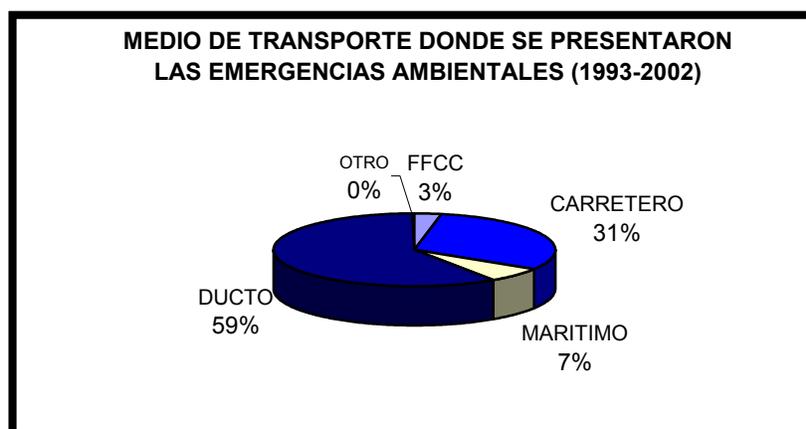
Gráfica 3
Ubicación de las emergencias ambientales reportadas a PROFEPA durante el periodo 1993-2002



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003

Después del transporte por ducto, el carretero es el modo de transporte de hidrocarburos y demás sustancias químicas en el cual se presentó el mayor número de emergencias ambientales.

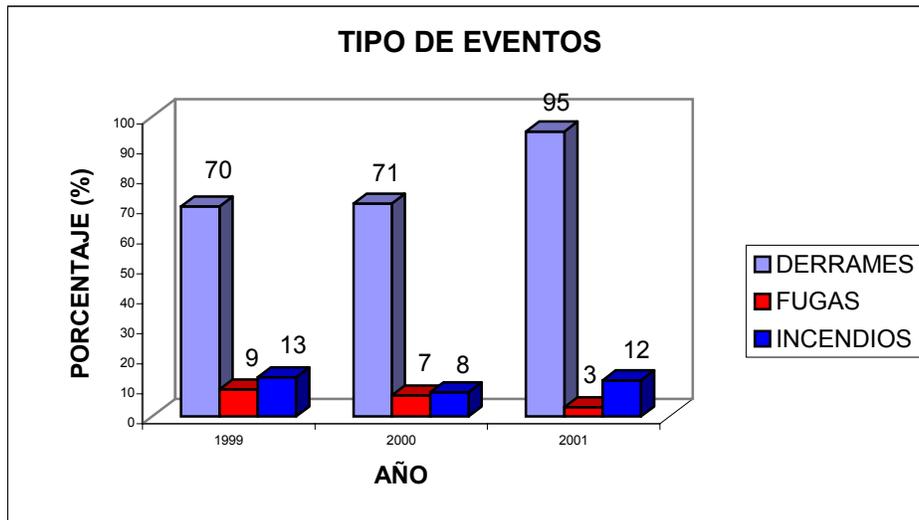
Gráfica 4
Medio de transporte donde se presentaron las emergencias ambientales durante el periodo 1993-2002



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

En la gráfica 5 se hace alusión los tres tipos de eventos que sobresalen en emergencias ambientales.

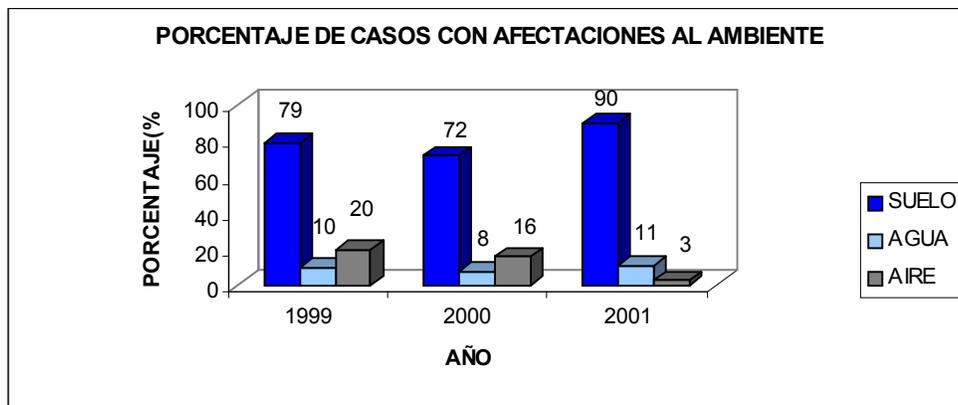
Gráfica 5
Emergencias ambientales durante el transporte terrestre de materiales peligrosos (durante el periodo 1999-2001)



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

A continuación se muestra de forma gráfica las afectaciones al ambiente debido a emergencias ambientales en el periodo 1999-2001.

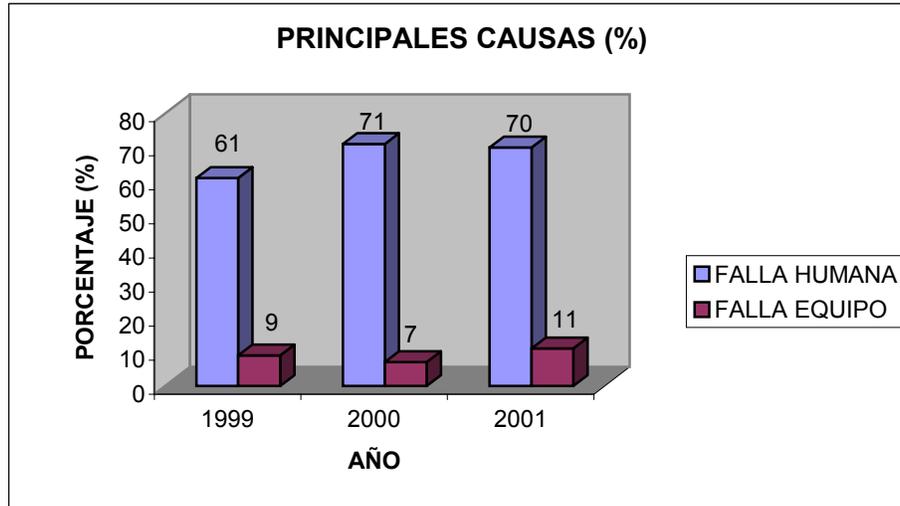
Gráfica 6
Porcentaje de casos con afectaciones al ambiente



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

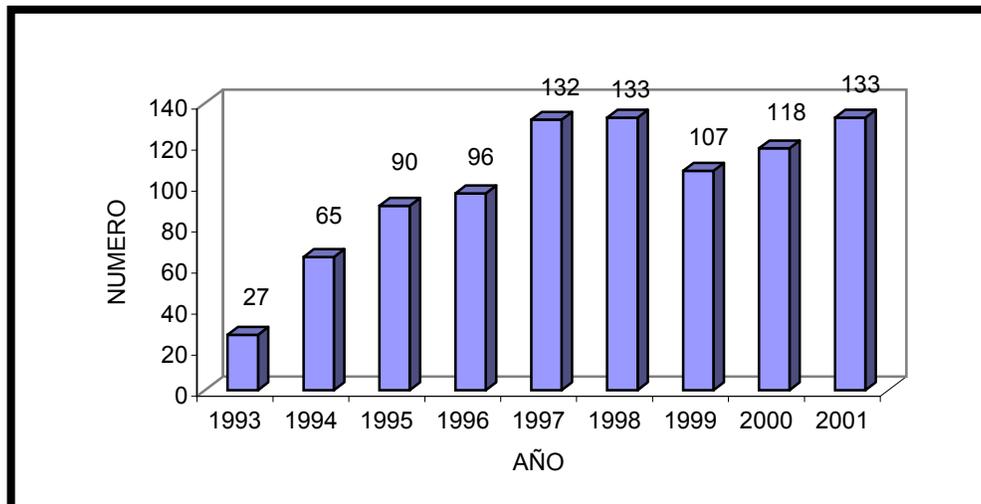
La siguiente gráfica corresponde a las dos principales causas que originan emergencias ambientales.

Gráfica 7
Principales causas de emergencias ambientales



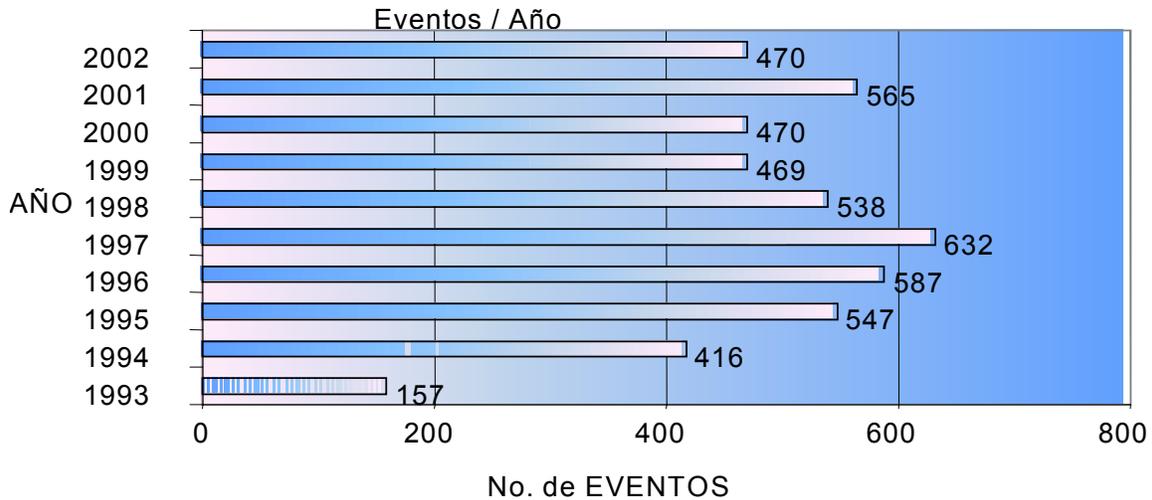
FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Gráfica 8
Emergencias ocurridas durante el transporte terrestre de materiales peligrosos durante el periodo 1993-2001



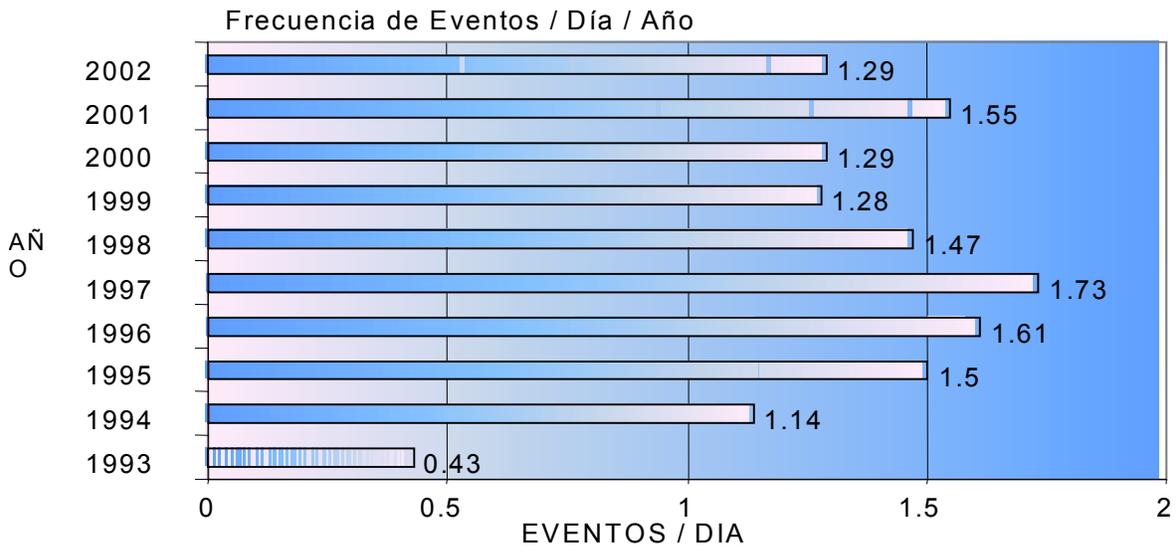
FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Gráfica 9
Número de eventos reportados a PROFEPA en el periodo (1993-2002)



En las gráficas se observa el número de eventos por año y eventos por día/año en los que se involucran sustancias químicas.

Gráfica 10
Frecuencia de eventos/día/año reportados a PROFEPA durante el periodo 1993-2002

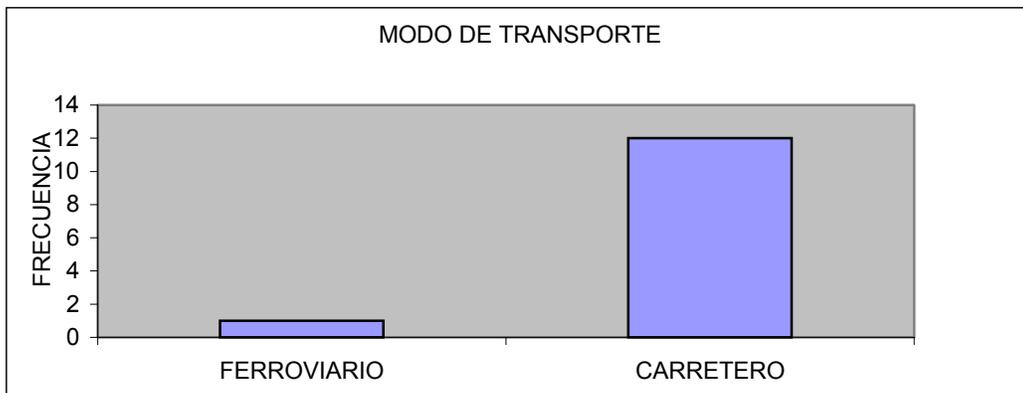


FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Información estatal

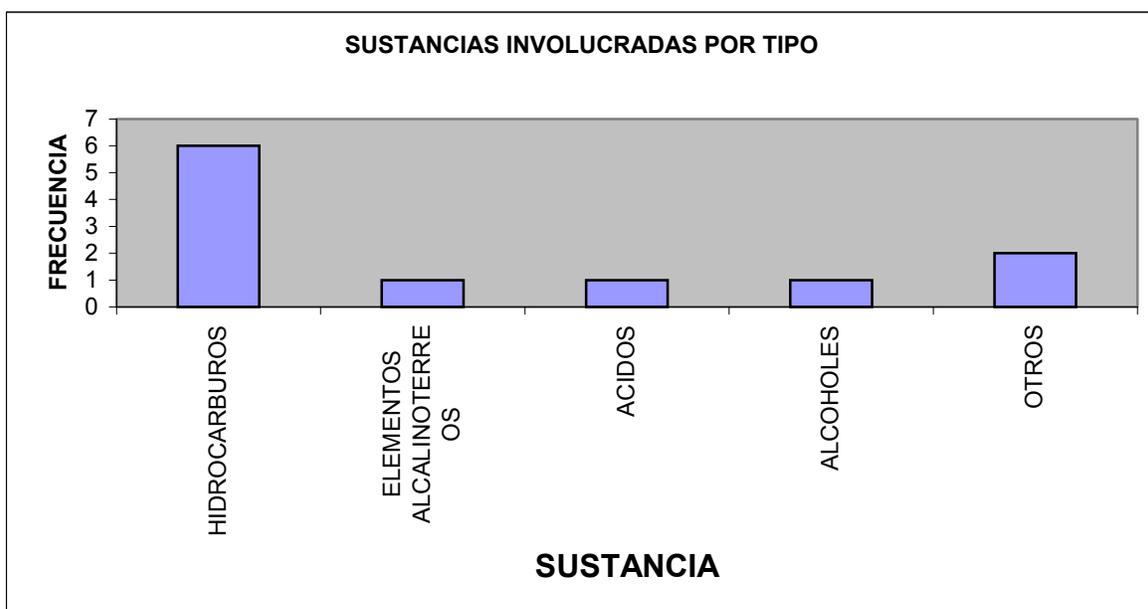
En la siguiente gráfica se aprecia que el transporte carretero genera mayor número de emergencias ambientales.

Gráfica 11
Modo de transporte donde ocurrieron las emergencias ambientales



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003

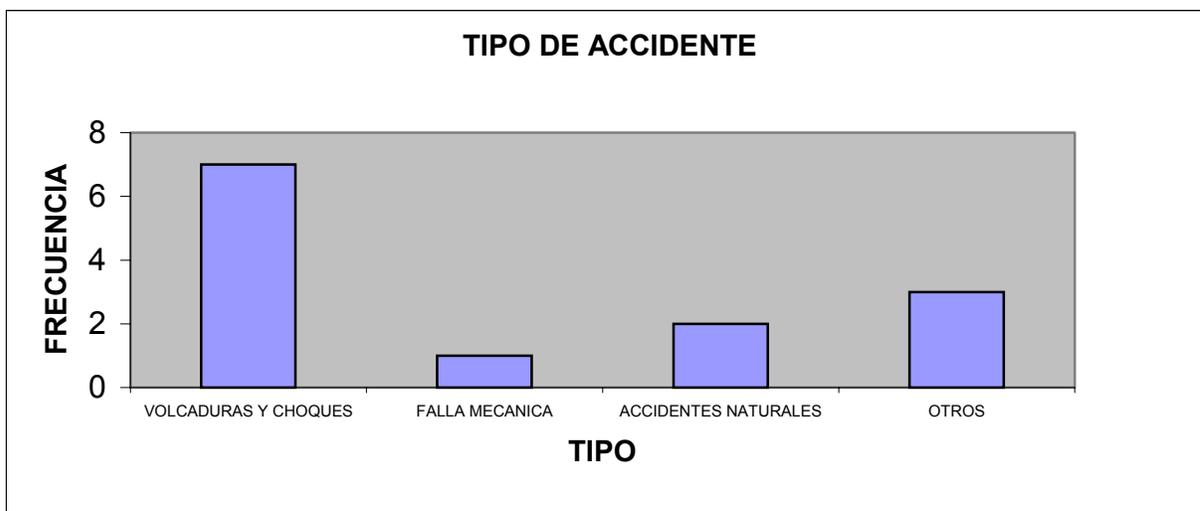
Gráfica 12
Principales sustancia involucrada en las emergencias ambientales



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003

Las volcaduras o choques son el principal tipo de accidente.

Gráfica 13
Emergencias ambientales por tipo de accidente



FUENTE: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2003.

Debido a la problemática que enfrenta el ambiental tener un gran número de sitios contaminados con hidrocarburos y demás sustancias peligrosas, a continuación se van a estudiar algunos elementos técnicos que puedan servir como base para evaluar el daño de un sitio ante la presencia de contaminantes y la manera de como se debe proceder a la reparación del mismo.

4.1 Concepto de remediación

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, restauración se define como el conjunto de actividades tendentes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

De acuerdo con el diccionario de la Lengua Española, 1992, restaurar es reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que antes tenía.

Aunque el término remediación no está registrado en los diccionarios de la lengua española, y que no ha sido incluido en documentos oficiales mexicanos, ha empezado a ser utilizado en cierto tipo de investigaciones relacionadas con la limpieza de sitios contaminados.

Un término que sí aparece en los diccionarios de la lengua española es el verbo remediar, cuya definición es poner remedio al daño; corregir o enmendar una cosa; socorrer una necesidad o urgencia; evitar que suceda algo de que pueda derivarse algún daño o molestia. Si nos ubicamos en el marco de lo ambiental, esta definición es precisamente lo que se busca una vez que se detecta un daño por contaminación.

4.2 Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos

Es indispensable tener en cuenta la dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos, ya que una vez que ha ocurrido un derrame en el primer caso se presentan diversos fenómenos naturales que tienden a dirigirlo hacia las aguas subterráneas. Esto hace necesario entender la forma en que los contaminantes penetran, migran y se dispersan en el subsuelo.

En términos generales, el comportamiento de los contaminantes va en función de sus características fisicoquímicas, en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad (Tabla 18 ANEXO I muestra la solubilidad de algunos hidrocarburos en agua), y viscosidad, además de las características del medio que los rodea como son el tipo de suelo, su permeabilidad, el tamaño de las partículas, su contenido de humedad y de materia orgánica, incluyendo la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales también tienen gran influencia. Todas las variables en su conjunto, definen el tamaño y la distribución tridimensional de la pluma de contaminación en una zona específica.

De acuerdo con su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor a la del agua se denominan ligeros; mientras que los que poseen una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos. Esta clasificación es importante, ya que es lo que determina el comportamiento de los contaminantes en el acuífero.

Los ligeros tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático, y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, como las gasolinas, los aceites y el petróleo crudo.

Los densos, por el contrario, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden ir en dirección al flujo del agua subterránea, contaminando así el acuífero en toda su profundidad; ejemplo de estos, son los bifenilos policlorados.

La combinación de las características del subsuelo, de los contaminantes y las condiciones climatológicas del sitio puede dar lugar a los diferentes procesos de

transporte y distribución de contaminantes. Para entender el proceso respectivo es necesario realizar una buena caracterización del sitio con la cual se conocerán la carga hidráulica y la estratigrafía, así como los coeficientes de adsorción y la permeabilidad del terreno.

4.3 Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos

La caracterización de un suelo afectado por hidrocarburos u otras sustancias peligrosas permite conocer las características de funcionamiento del subsuelo como filtro amortiguador, y el comportamiento de los contaminantes en él. Los estudios preliminares de dicha caracterización corresponden a los de una auditoría ambiental.

La evaluación del daño es algo que debe ser muy preciso, ya que de ahí se genera la información que será utilizada tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las medidas de mitigación, limpieza y en su caso, restauración. Es una actividad en la que necesariamente confluyen diversas disciplinas, mismas que deben interactuar para arrojar resultados completos.

Cuando ocurre un derrame en suelos o en cuerpos de agua, los contaminantes inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio físico lo permite. Las características fisicoquímicas del contaminante, así como las propias del sitio, determinan su permanencia o migración. Esta es la razón por la que derrames subterráneos que ocurrieron en el pasado, años después se detectan fuera del predio donde acontecieron, y alejados varios metros e incluso kilómetros en dirección de la corriente de agua subterránea. Ejemplos de lo anterior se presentan comúnmente en zonas aledañas a poliductos, centros de almacenamiento y distribución de combustibles, así como en estaciones de servicio

Todos los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua, y por ser menos densos que ésta tienden a flotar. Esta característica es importante porque marca la estrategia de diagnóstico en un sitio contaminado. Los combustibles no siempre se ven, pero tienen la ventaja de que huelen y de que su olor es fácilmente reconocido. Otros productos químicos no se ven, tampoco huelen; únicamente son percibidos por análisis químicos. Los derrames de petróleo crudo y de residuos de perforación tienen la característica de detectarse por su color y aspecto.

En los países avanzados no se practican las auditorías ambientales en esta forma; basta con detectar la presencia de un contaminante en suelo o aguas subterráneas para proceder directa e inmediatamente a la caracterización geohidrológica y química del sitio, y de los alrededores. La meta final de estas

actividades es proponer alternativas para la limpieza del sitio.

La evaluación del daño constituye un estudio completo de caracterización que incluye: un estudio del sitio y sus alrededores; un análisis geohidrológico; un análisis químico de los contaminantes; y un análisis fisicoquímico de suelo, o agua contaminados.

4.3.1 Análisis del sitio y sus alrededores

En principio se requiere un plano del terreno donde se encuentran las instalaciones a fin de identificar la infraestructura subterránea (tanques y ductos), los talleres de mantenimiento, las zonas de disposición de desechos e instalaciones antiguas. Estos datos servirán para detectar la fuente de contaminación, por lo que es de gran utilidad ubicar las instalaciones en un plano que incluya las zonas circundantes y así definir sitios que servirán de control. También resulta procedente recopilar datos hidrogeológicos, relacionados con la profundidad del nivel freático, la dirección del flujo de la corriente subterránea y la conductividad hidráulica; información que servirá para pronosticar la migración hacia el acuífero. Un plano de ubicación de los pozos existentes y su caudal de extracción permitirá predecir el efecto sobre la población aledaña.

Para esta actividad es indispensable visitar el lugar; una parte importante de la información se puede obtener cuando se entrevista a los trabajadores y a los pobladores del lugar, pero también es necesario recurrir a los acervos bibliográficos. A continuación se enlistan los conceptos que deben ser investigados:

- ⇒ Ubicación geográfica del sitio contaminado
- ⇒ Tipo de instalación que dio origen a la afectación
- ⇒ Plano de instalaciones subterráneas con identificación
- ⇒ Ubicación de las zonas urbanas aledañas
- ⇒ Resultados de estudios previos que se hayan realizado (auditorías ambientales, gasometrías, mediciones de la profundidad del nivel freático)
- ⇒ Apariencia del material contaminante
- ⇒ Ubicación de la(s) fuente(s) de contaminación
- ⇒ Antigüedad de la contaminación
- ⇒ Precipitaciones pluviales
- ⇒ Escorrentías
- ⇒ Ubicación de los cuerpos de agua aledaños
- ⇒ Uso del suelo afectado
- ⇒ Topografía
- ⇒ Tipo de vegetación

En la visita a campo se podrá contrastar toda la información recabada. En caso de instalaciones petroleras o petroquímicas, se podrán registrar las áreas

visiblemente contaminadas así como instalaciones o zonas potencialmente agresivas.

Las muestras deberán llevarse a un laboratorio químico para la identificación y cuantificación de los contaminantes presentes. En la actualidad ya existen equipos analíticos para realizar pruebas en campo, lo que evita la pérdida de contaminantes de características volátiles. Con la información obtenida será posible realizar un diagnóstico del sitio, haciendo factible identificar las manchas de contaminación y los gradientes que se forman en función de las características del suelo.

4.3.2 Análisis geohidrológico

La importancia del análisis geohidrológico del sitio es su aportación de elementos para entender la forma en que se han movido los contaminantes del punto específico donde ocurrió un derrame y hacia donde se tienen zonas afectadas. Esta investigación ayuda a conocer si la migración de los factores de riesgo ha sido producto de un proceso natural, o bien ocasionado por la acción del hombre. Durante la caracterización geohidrológica se debe obtener la siguiente información:

Profundidad del nivel freático

Dirección y velocidad del flujo del agua subterránea

Espesor de producto libre (cuando este ha alcanzado el nivel freático)

Definición tridimensional de la mancha de contaminación subterránea

Perfiles estratigráficos.

La información respectiva servirá para definir los puntos donde se deberán perforar los pozos de monitoreo, y donde se habrán de tomar muestras de suelo a diferentes profundidades.

4.3.3 Análisis químico de los contaminantes

Los análisis químicos que se practican en las muestras de suelo y agua, sirven para conocer la naturaleza y concentración de los contaminantes; así se podrá tener una idea de la distribución que guardan éstos en la zona afectada; para ello se utilizan análisis químicos, entre los cuales los más utilizados son los siguientes:

Compuestos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xileno

(BTEX), método EPA 8020 por cromatografía de gases o método EPA 8060 o EPA 8240 por espectrometría de masas

Hidrocarburos totales de gasolina y diesel, método EPA 8015

Hidrocarburos totales de petróleo (HTP's), método EPA 418.1 M

Hidrocarburos polinucleoaromáticos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros, método EPA 8310

Bifenilos policlorados, método EPA 8080

Metales pesados: arsénico, bario, cadmio, cromo VI, níquel, mercurio, plata y selenio, de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993

Plaguicida de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993

Las muestras tendrán que conducirse a un laboratorio químico para la identificación y cuantificación de los contaminantes. En la actualidad existen equipos analíticos para pruebas en campo, lo que evita la pérdida de contaminantes de características volátiles. Con la información obtenida se realiza un diagnóstico del sitio a fin de identificar las manchas de contaminación y los gradientes que se forman en función de las características del suelo.

4.3.4 Análisis fisicoquímico

Se lleva a cabo para conocer qué tan afectado se encuentra un suelo por la presencia de contaminantes; se practica simultáneamente en una muestra de suelo no contaminado que sirva como control para hacer comparaciones. La muestra control se toma de una zona no contaminada, cercana a la zona dañada para asegurar que comparta sus características. Las determinaciones que se realizan son:

- PH
- Humedad
- Capacidad de retención del agua
- Concentración de materia y carbono orgánicos
- Contenido de materia inorgánica
- Contenido de carbono inorgánico
- Porosidad
- Permeabilidad
- Tipo de suelo

4.3.5 Diagnóstico de la contaminación in situ

Permite obtener información de manera relativamente rápida y simple. Se puede conocer la ubicación de la mancha de contaminación en el suelo, sobre un plano y a una profundidad; con estas técnicas se facilita detectar otros métodos para el diagnóstico in situ; dos de los más comunes, son los geoelectricos y la gasometría; de ahí se derivan otros. Lo importante es saber cuál es el más adecuado en cada caso.

Los métodos geoelectricos provocan muy poco disturbio en el sitio, porque solamente se encajan los electrodos a una profundidad no mayor de 20 cm mientras se toman las lecturas. A través de estos electrodos se hace pasar una señal eléctrica, y en cada punto se toman las lecturas para medir la conductividad o resistividad. Aparentemente, el método se puede aplicar con éxito a diversos tipos de derrames y tiene la ventaja de dar información sobre el tipo de material geológico que se encuentra en el subsuelo. La toma de lecturas en campo es relativamente sencilla, pero la interpretación de los resultados requiere personal muy especializado.

Las gasometrías se aplican exitosamente cuando los contaminantes son compuestos volátiles y semivolátiles, básicamente combustibles. Para esta determinación es necesario hacer perforaciones someras, de diámetro reducido, que puede ser incluso de 2,5 cm. y llegar hasta 3 m de profundidad. Las lecturas se toman con gasómetros portátiles que cuantifican la concentración de hidrocarburos volátiles. Simultáneamente se pueden tomar lecturas de explosividad con explosímetros también portátiles. En los puntos donde se presenta una alta concentración de hidrocarburos volátiles corresponde un alto grado de explosividad.

El trabajo en campo es un poco más laborioso que el método geoelectrico pero la interpretación es más sencilla, incluso en el momento de las lecturas se pueden ubicar las manchas de contaminación más importantes, en las que es conveniente tomar muestras para efectuar los análisis pertinentes.

Las muestras de suelo y de agua que se tomen deben ser inalteradas y representativas del problema que se está analizando. Una vez que se toman, hay que protegerlas de la intemperie para conservar sus características originales; si es posible, se mantienen en refrigeración durante su traslado al laboratorio, y deben procesarse lo más pronto posible.

4.4 Alternativas tecnológicas para la remediación de suelos

El desarrollo de las tecnologías de remediación en el ámbito mundial, se inició en

los países desarrollados hace más de 10 años. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos que abastecían de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados como peligrosos en concentraciones que sobrepasan los límites permitidos.

Con la finalidad de proteger la salud del individuo, los gobiernos de países del primer mundo establecieron como una actividad prioritaria la búsqueda de opciones para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos. En el caso de los Estados Unidos, fueron la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía, a través del superfund, los que organizaron a las diferentes instituciones de investigación públicas y privadas para el desarrollo de tecnologías tendientes a la limpieza de suelos y acuíferos afectados con desechos militares en las localidades que funcionaron como puntos estratégicos en la Segunda Guerra Mundial.

Las actividades de investigación realizadas en Estados Unidos dieron origen a diversas tecnologías de remediación, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento. Las que primero se desarrollaron fueron de tipo fisicoquímico, como la incineración, y la solidificación estabilización. Posteriormente surgieron otras innovadoras como la desorción térmica, la extracción con vapor, el lavado de suelo y las de tipo biológico. Otras más recientes fueron la vitrificación, la encapsulación, y el venteo seguido de condensación.

De manera simultánea a la aplicación de tecnologías de remediación se dio el auge de técnicas de caracterización y monitoreo hidrogeológico. De esta forma se desarrollaron diferentes arreglos de piezómetros que permitían conocer de manera rápida la conductividad hidráulica, así como técnicas de perforación para la toma de muestras inalteradas, sin dejar atrás modelos matemáticos y paquetes computacionales para generar mapas tridimensionales de la distribución de contaminantes.

Existen en el mercado mundial diversas tecnologías para remediación que ya se han comercializado. Debe tomarse en consideración que no todas son aplicables a todos los casos. Para estar seguros de esto se deben realizar estudios de tratabilidad a nivel laboratorio, y de ser posible pruebas de demostración en campo.

Antes de iniciar un tratamiento de remediación es muy importante cerrar la fuente de contaminación, para asegurar la efectividad de cualquier estrategia planeada.

A continuación se analiza de manera general, la base de funcionamiento de las diferentes tecnologías de remediación disponibles en el mercado, tratando de hacer énfasis a su aplicación de sitios contaminados con hidrocarburo de petróleo.

4.4.1 Arrastre por aire

Esta tecnología se aplica a contaminantes volátiles presentes en el agua subterránea. El aire se inyecta a profundidad y la recuperación de los contaminantes se realiza en una torre empacada o en un tanque de aireación, y requiere acoplarse a otro tipo de proceso para recuperar o destruir los contaminantes retirados del sitio. Esta tecnología es muy empleada por su efectividad y tiene la ventaja de un bajo costo de operación. Las desventajas son:

- Uso limitado a compuestos volátiles
- Generación de ruido
- Los contaminantes no se destruyen, por lo que requiere acoplarse a otro tipo de tecnología

4.4.2 Extracción al vacío

Este tipo de tecnología se aplica solamente para la extracción de compuestos volátiles, por lo que no es una opción recomendable para la remediación de suelos contaminados con petróleo, pero si es recomendable para manchas superficiales de gasolina. Sobre la zona afectada se colocan cubiertas que permiten captar los gases extraídos. Este proceso requiere ser acoplado a otro para eliminar los contaminantes o bien recuperarlos y reciclarlos.

4.4.3 Solidificación / estabilización

Las tecnologías de solidificación y estabilización se emplean en la inmovilización de contaminantes, reduciendo la generación de lixiviados. Son muy útiles para el tratamiento de residuos altamente peligrosos y que no pueden ser destruidos o transformados, como es el caso de los compuestos inorgánicos.

El origen de las tecnologías de solidificación es muy antiguo, se conocen como mezclas suelo-cemento y se han empleado para mejorar la capacidad de soporte de carga de un terreno. Dada la experiencia de su uso en la construcción de terraplenes y su facilidad de manejo, fueron adaptadas posteriormente a la remediación de suelos. Para que estas metodologías tengan éxito, se debe asegurar un perfecto mezclado entre el cemento y el suelo, y la humedad necesaria para lograr el fraguado. No son adecuadas para suelos con alto contenido de grasas y aceites, por lo que no se recomiendan para suelos contaminados con hidrocarburos.

La mezcla suelo-cemento, producto de la solidificación, tiene características de resistencia a la compresión que dependen de los aditivos empleados, que no son más que catalizadores del fraguado. Los valores de resistencia alcanzados son los

que determinarán la utilidad del material obtenido como puede ser la base de un camino, terreno de recreación o cimiento de una pequeña construcción, aunque en términos generales el suelo tratado pierde algunas de sus propiedades originales.

4.4.4 Lavado de suelo

Dicho proceso es solamente para procesos ex situ. Con el suelo contaminado se construyen pilas las cuales se bañan con solventes orgánicos o mezclas de ellos; es común permitir una recirculación para optimizar el uso del solvente. Tanto los solventes como los hidrocarburos pueden separarse y reciclarse, sin embargo, implica un gasto importante de solventes, un costo de separación de estos, y un alto riesgo de explosión.

4.4.5 Desorción térmica

Se realiza ex situ; el suelo contaminado se introduce al sistema con ayuda de un tornillo sinfín, y se aplica temperatura para que los contaminantes vayan desorbiéndose y puedan recuperarse de manera muy similar a una destilación. La desorción térmica tiene un menor costo que la incineración; el tiempo de tratamiento depende de las características del suelo y del contaminante, con la ventaja de que el suelo es factible de ser reutilizado. Sin embargo, no es una alternativa recomendable para suelos contaminados por petróleo, ya que conforme aumenta la temperatura el manejo del material se hace más difícil, y no se logran recuperar los contaminantes.

4.4.6 Arrastre de vapor

Se basa en el mismo principio que la técnica de arrastre con aire; la diferencia radica en la inyección de vapor a través de pozos. Los contaminantes que logran desorberse del suelo son los que se recuperan para reciclarse o bien acoplarse a otro tipo de proceso y puedan ser destruidos. No es muy recomendable en suelos contaminados con petróleo.

4.4.7 Incineración

Es el tratamiento de elección para la destrucción de residuos peligrosos y la solución efectiva en suelos con alta concentración de contaminantes orgánicos, los cuales se llevan a una completa mineralización transformándolos en dióxido de carbono, mismo que se descarga a la atmósfera; como se genera una alta concentración de partículas suspendidas un buen equipo debe contar con

sistemas de emisiones para asegurar que se trata de una tecnología limpia.

El material inorgánico resultante requiere tratarse como residuo peligroso antes de su disposición final, si rebasa las concentraciones permisibles. Cuando esto ocurre se debe enviar a confinamiento. La operación de un proceso de incineración implica un alto costo, que está influido por la necesidad de transportación a la planta de tratamiento.

4.4.8 Confinamiento

No es precisamente una opción de remediación; se recomienda cuando se tienen residuos peligrosos que no pueden ser tratados mediante otras tecnologías, o bien acoplado a otros procesos como la incineración. Para esta opción debe considerarse el costo de envasado del material en contenedores especiales y el del transporte al sitio de confinamiento. En México, aún no se cuenta con instalaciones seguras para ello, por lo que es preferible buscar otras posibilidades antes de pensar en el confinamiento.

4.4.9 Vitrificación

Consiste en introducir dos electrodos en el suelo donde se localiza la mancha de contaminación, suministrar una muy alta corriente eléctrica para lograr la vitrificación de los contaminantes. La tecnología solamente opera en la zona no saturada, es aún más costosa que la incineración, por lo que no se ha logrado llevar a una escala mayor, solamente se ha realizado a escala de demostración en campo.

4.4.10. Biorremediación

Resulta una promesa para el medio ambiente; consiste en el uso de microorganismos naturales (enzimas, levaduras, hongos, o bacterias) para descomponer o *degradar* sustancias peligrosas en otras menos tóxicas o que no sean tóxicas. Los microorganismos, igual que los seres humanos, comen y digieren sustancias orgánicas, de las cuales obtienen nutrientes y energía. Esta técnica puede llegar a ser la mejor opción a las anteriores debido a que es 100% natural, de bajo costo y menos agresiva hacia la naturaleza.

Tabla 17
Ventajas y desventajas de las técnicas más comunes de remediación de suelos

TÉCNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Arrastre por aire	Se logra la recuperación de contaminantes. Es efectiva, y de bajo costo de operación	Uso limitado para compuestos volátiles Generación de ruido Los contaminantes no se destruyen por lo que se deben acoplar a otras tecnologías
Extracción all vacío	Se logra la recuperación de contaminantes volátiles	Uso limitado para compuestos volátiles Los contaminantes no se destruyen por lo que se deben acoplar a otras tecnologías.
Solidificación estabilización	Se reduce la generación de lixiviados /Es útil para tratar contaminantes que no pueden ser destruidos ni transformados	No funciona para suelos contaminados con grasas y aceites El suelo pierde algunas de sus propiedades originales Es una tecnología costosa
Lavado de suelo	Se logra la extracción de sustancias contaminantes	Se utiliza en procesos ex-situ Se utilizan solventes orgánicos Existe un alto riesgo de explosión Los contaminantes no se destruyen por lo que se deben acoplar a otras tecnologías
Desorción térmica	Se logra la recuperación de contaminantes El costo es menor al de incineración El suelo puede ser reutilizado	Se utiliza en procesos ex-situ No funciona para suelos contaminados con petróleo
Arrastre de vapor	Se extraen sustancias contaminantes	No funciona ante una contaminación con petróleo Generación de ruido Los contaminantes no se destruyen por lo que se deben acoplar a otras tecnologías
Incineración	Sirve para la destrucción de residuos peligrosos y contaminantes en grandes concentraciones	Uso limitado para sustancias orgánicas Requiere sistemas de emisiones Requiere de confinamiento
Confinamiento	Se dispone de sustancias peligrosas que no pueden ser transformadas ni tratadas	No es opción de remediación En México no hay instituciones seguras Alto costo
Vitrificación	Se logra la vitrificación de contaminantes	Costo mayor a la incineración Solo se utiliza en demostraciones a escala
Biorremediación	Se utilizan microorganismos Se logra la transformación de contaminantes Puede adaptarse a las necesidades de cada sitio El suelo puede reutilizarse Bajo costo	Difícilmente funciona cuando los contaminantes están absorbidos en el material geológico o la zona es de baja permeabilidad Requiere de mucho tiempo Existe riesgo de inhibición de los microorganismos

En términos químicos, los compuestos "orgánicos" son aquellos que contienen

átomos de carbono e hidrógeno. Ciertos microorganismos pueden digerir sustancias orgánicas peligrosas para los seres humanos, como combustibles o solventes. Los microorganismos descomponen los contaminantes orgánicos en productos inocuos, principalmente en dióxido de carbono y agua. Una vez degradados los contaminantes, la población de microorganismos se reduce porque ha agotado su fuente de alimentos.

Las poblaciones pequeñas de microorganismos sin alimentos o los muertos no presentan riesgos de contaminación, ya que se quedan en el suelo y forman parte de la materia orgánica. Estas degradaciones o cambios ocurren usualmente en la naturaleza, sin embargo, la velocidad de tales cambios es baja, aunque mediante una adecuada manipulación estos sistemas biológicos pueden ser optimizados a fin de aumentar la velocidad de cambio o degradación, y así utilizarlos en sitios con una elevada concentración de contaminantes. Una variedad de contaminantes pueden ser eliminados por biorremediación; a saber, pesticidas, herbicidas, petróleo, gasolina, y metales pesados, entre otros .

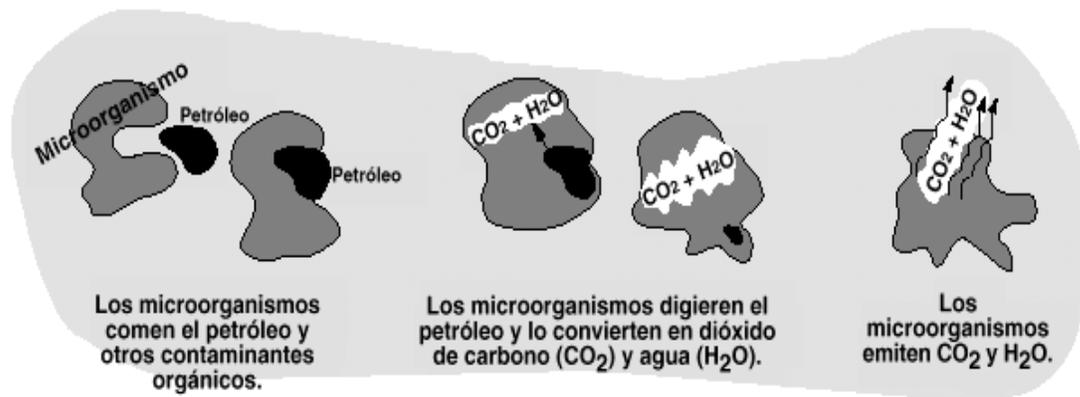


Fig 1
Esquema de la biodegradación aerobia en el suelo

La presencia prolongada de contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchas bacterias ahí presentes, hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos. Esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de biorremediación, que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos.

La biorremediación se considera actualmente como una alternativa tecnológica apta para la limpieza de suelos y de acuíferos contaminados, donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar o transformar residuos orgánicos en compuestos químicamente más sencillos. El proceso obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos; y la actividad biodegradadora puede ser estimulada por la adición de nutrientes básicos. Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados, la biorremediación es la mejor desde los puntos de vista ambiental y económico, sin embargo, no puede aplicarse a todos los casos.

4.4.10.1 Funcionamiento de la biorremediación

Los microorganismos deben estar activos y saludables para poder desempeñar su tarea correctiva. Se facilita el crecimiento de los microorganismos y aumentan la población microbiana creando condiciones ambientales óptimas para disminuir la toxicidad de la mayor cantidad posible de contaminantes. El tipo de biorremediación que se use dependerá de varios factores; entre ellos, el tipo de microorganismos presentes, las condiciones del lugar, y la cantidad y toxicidad de los productos químicos contaminantes. Hay diversos microorganismos que degradan distintos tipos de compuestos, y sobreviven en condiciones diferentes.

Los microorganismos *autóctonos* son los que viven en un lugar determinado. Para estimular su crecimiento, tal vez sea necesario proporcionarles una temperatura apropiada del suelo, oxígeno y nutrientes.

Si la actividad biológica que se necesita para degradar un contaminante en particular *no* está presente en el suelo del lugar, se pueden añadir al suelo afectado microorganismos de otros sitios cuya eficacia se haya comprobado. Estos son microorganismos *exógenos*. Es posible que haya que modificar las condiciones del suelo del lugar nuevo, para que éstos proliferen.

La biorremediación puede aplicarse en condiciones *aerobias* y *anaerobias*. En las aerobias, los microorganismos usan el oxígeno disponible en la atmósfera para funcionar. Con suficiente oxígeno convertirán muchos contaminantes orgánicos en dióxido de carbono y agua. En condiciones anaerobias, la actividad biológica tiene lugar en ausencia de oxígeno, de modo que los microorganismos descomponen compuestos químicos del suelo para liberar la energía que necesitan. A veces, en los procesos aerobios y anaerobios de descomposición de los contaminantes originales se crean productos intermedios de toxicidad menor, igual o mayor.

La biorremediación puede usarse como método para descontaminar el suelo y el agua. Estas medidas se clasifican en dos grandes categorías: *in situ* y *ex situ*. Con medidas biocorrectivas *in situ* se trata la tierra contaminada o el agua subterránea en el lugar donde se encuentra. Las medidas biocorrectivas *ex situ* consisten en excavar el suelo contaminado o extraer el agua subterránea por bombeo para aplicar el tratamiento, obviamente en otro lugar ajeno al que se encuentra en un inicio, la contaminación.

4.4.10.2 Biorremediación *in situ* para el suelo

Con las técnicas *in situ* no es necesario excavar el suelo contaminado, de modo que son menos costosas, levantan menos polvo y liberan menos contaminantes que las técnicas *ex situ*. Además, se puede tratar una gran cantidad de tierra por

vez. Sin embargo, las técnicas in situ pueden llevar más tiempo que las técnicas ex situ, pueden ser difíciles de manejar y son más eficaces en suelos permeables (arenosos o que no sean compactos).

La meta de la biorremediación in situ en condiciones aerobias, es suministrar oxígeno y nutrientes a los microorganismos del suelo. Las técnicas aerobias in situ varían en cuanto al método de suministro de oxígeno a los microorganismos que degradan los contaminantes. Dos de ellos son la bioaireación y la inyección de peróxido de hidrógeno. Se puede suministrar oxígeno introduciendo aire por bombeo en el suelo, arriba de la capa freática (bioaireación), o en forma líquida como peróxido de hidrógeno. Las medidas biocorrectivas in situ, tal vez no den buenos resultados en suelos arcillosos o en aquellos altamente estratificados porque no se puede distribuir oxígeno de manera uniforme en toda la zona que necesita tratamiento. Con medidas biocorrectivas in situ, a veces se tarda años en alcanzar las metas en cuanto a limpieza, dependiendo principalmente de cuán biodegradables sean determinados contaminantes. Con contaminantes que se degradan fácilmente, quizá se tarde menos.

4.4.10.3 Biorremediación ex situ para el suelo

Las técnicas ex situ llevan menos tiempo, son más fáciles de controlar y se usan para tratar una gama más amplia de contaminantes y tipos de suelo que las técnicas in situ. No obstante, requieren la excavación y el tratamiento del suelo afectado antes de la biorremediación en sí y, a veces, incluso después. Entre las técnicas ex situ cabe señalar la biorremediación de fase de lechada, y las de fase sólida.

4.4.10.4 Biorremediación de fase de lechada

La tierra impactada se combina con agua y otros aditivos en un tanque grande denominado "biorreactor"; se mezcla para mantener los microorganismos presentes en la tierra en contacto con los contaminantes, y se añaden nutrientes y oxígeno. Las condiciones en el biorreactor se controlan a fin de crear el medio óptimo para que estos degraden los contaminantes. Una vez concluido el tratamiento, se separa el agua de los sólidos, y se eliminan o se someten a un tratamiento ulterior si todavía tienen contaminantes.

El tratamiento biológico de fase de lechada puede ser relativamente rápido en comparación con otros procesos biológicos, particularmente para la arcilla contaminada. El éxito depende en gran medida del tipo de suelo y de las propiedades químicas del material contaminado. Esta técnica es particularmente útil en los casos en que se necesitan medidas correctivas rápidas.

4.4.10.5 Biorremediación de fase sólida

Se somete la tierra a un tratamiento en la superficie, con sistemas de recolección para evitar la fuga de contaminantes. Se controla la humedad, el calor, los nutrientes y el oxígeno a fin de propiciar la biodegradación para aplicar este tratamiento.

Estos sistemas son relativamente sencillos de usar y de mantener, aunque ocupan mucho lugar y la limpieza lleva más tiempo que con los procesos de fase de lechada. Los de tratamiento de fase sólida abarcan el tratamiento de la tierra, biopilas de tierra y la producción de abonos a partir de desechos.

4.4.10.6 Tratamiento de la tierra

Este método es un tanto sencillo, se excava el suelo contaminado y se esparce la tierra en una plataforma con un sistema incorporado para recoger cualquier "lixiviado" o líquido contaminante que se escurra del suelo. Se da vuelta la tierra periódicamente para mezclar aire con los desechos. Asimismo, se controla la humedad y los nutrientes. La biorremediación llevará más tiempo si los nutrientes, el oxígeno o la temperatura no están bien controlados. En algunos casos, la reducción de la concentración de contaminantes podría atribuirse más a la volatilización que a la biodegradación. Cuando el proceso tiene lugar en lugares cerrados donde se regulan los contaminantes volátiles que se escapan, las pérdidas por volatilización se reducen al mínimo.

4.4.10.7 Biopilas de tierra

La tierra contaminada se amontona en pilas de varios metros de altura sobre un sistema de distribución de aire con el propósito de conseguir la aireación con una bomba de vacío. La humedad y los nutrientes se mantienen en un nivel óptimo para la biorremediación. Los montones de tierra pueden colocarse en lugares cerrados. Los compuestos volátiles son fáciles de controlar porque generalmente se integran a la corriente de aire que se hace pasar por la pila.

4.4.10.8 Producción de abono a partir de desechos

Se mezclan desechos biodegradables con un agente que les dé más volumen, como paja, heno o mazorcas para facilitar el suministro de la cantidad óptima de aire y agua a los microorganismos. Como tipos comunes están: la *producción de abono en pilas estáticas* (se forman pilas de desechos, aireadas con ventiladores impelentes o bombas de vacío); la producción de abono en recipientes con agitación mecánica (los desechos se colocan en un recipiente para el tratamiento

donde se mezclan y airean); y producción de abono en hileras (los desechos se colocan en pilas alargadas, o sea hileras, y se mezclan periódicamente mediante tractores o equipo similar).

4.5 La biorremediación como la tecnología óptima en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México son por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como por la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, entre otros. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en la mayoría de los casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla, y además se encuentran intemperizados.

En general los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando se encuentran en contacto con ella. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto se hacen evidentes a simple vista. Si se depositan en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lixiviados generados por las lluvias arrastran los compuestos solubles.

Gasolina, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo; durante su trayectoria son absorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático; Ahí se dispersan de acuerdo con la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

La característica más importante de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes. Algunos pueden ser completamente degradados, en forma tal que se cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono y agua, entonces se habla de una completa mineralización.

En sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos no atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollan capacidad degradadora. En estos casos la mejor opción es utilizar la flora autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes, probablemente será necesario recurrir a preparados microbianos frescos.

Una ventaja importante de la biorremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos. Es difícil hacer una comparación de costos, de ahí que

conviene conocer las características de cada sitio en particular; pero en términos generales, se puede decir que es por lo menos diez veces más económica que la incineración y tres veces más económica que algunas tecnologías fisicoquímicas de inmovilización. Este bajo costo se debe a varios factores, como son un menor gasto de energía; bajo costo de los nutrientes; y la operación en condiciones ambientales. Eso hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo, como México.

La biorremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados en compuestos inocuos, como el bióxido de carbono. Además, cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La versatilidad de esta alternativa tecnológica se basa en que puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica degradadora de la flora bacteriana autóctona; bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesario añadir microorganismos degradadores exógenos; o bien bioventeo, cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para estimular la actividad microbiana degradadora presente en el lugar. En cualquiera de las opciones anteriores puede realizarse fuera del sitio (*ex situ*) si la contaminación está en el suelo superficial, pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado grandes profundidades, e inclusive el manto freático.

Cuando el tratamiento se hace fuera del sitio pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficies impermeables que permiten coleccionar lixiviados de tal manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la biorremediación, el suelo puede destinarse al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas originales.

En el caso de aguas subterráneas, la biorremediación se aplica a través del bombeo-tratamiento-recarga, que consiste en extraer el agua subterránea, promover la biodegradación de los contaminantes en biorreactores instalados en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero, o bien inyectar nutrientes y bacterias, de tal forma que se establezca una recirculación y el sitio mismo se convierta en un biorreactor.

A pesar de ser la tecnología más empleada en el ámbito mundial, existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación, por ejemplo; los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa.

Por lo que respecta a las técnicas de base microbiológica, inicialmente se aplicaron el composteo y la biolabranza (*land-farming*), así como el uso de reactores con cepas puras de bacterias degradadoras combinado con el de

bombeo e inyección del agua subterránea a través de pozos. Posteriormente se aplicaron otras técnicas innovadoras como la bioestimulación y el bioventeó. La diferencia entre las diversas tecnologías de biorremediación se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla 18
Base de funcionamiento de cada tipo de tecnología utilizada en la biorremediación de suelos contaminados

Tecnología	Base de funcionamiento
Bioestimulación	Adición de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias nativas
Bioaumentación	Adición de bacterias previamente seleccionadas por su capacidad de degradar contaminantes
Bioventeó	Suministro de aire para estimular la actividad de las bacterias nativas
Biolabranza	El suelo se extiende en una capa de tamaño regular, y se revuelve periódicamente

Además, durante la remediación de suelos y de agua subterránea contaminada por hidrocarburos se utilizan las siguientes tres técnicas principales.

Tabla 19
Remediación de suelo y de agua subterránea contaminada por hidrocarburos

Remediación de suelo y de agua subterránea contaminada por hidrocarburos	
Remediación física	Extracción por bombeo de producto libre
Remediación química	Inyección de agentes tenso-activos y extracción de agua, hidrocarburos disueltos y tenso-activos
Biorremediación	Eliminación de hidrocarburos mediante microorganismos.

FUENTE: (Susana Saval, Instituto de Ingeniería, UNAM)

Observación

No todos los tipos de desechos y no todas las condiciones de los sitios son comparables. Es necesario investigar cada sitio y someterlo a pruebas por

separado. Se deben emplear criterios científicos y técnicos para determinar si una técnica es apropiada para un sitio en especial. (EPA).

4.5.1 Ventajas de la biorremediación

- Se usan microorganismos naturales cuyo hábitat es el suelo, para descomponer sustancias peligrosas en sustancias menos tóxicas, o que no sean tóxicas.
- Es un proceso natural, eficaz en función del costo, que puede aplicarse a muchos desechos orgánicos comunes.
- Por su costo y eficiencia ofrece ventajas sobre otros sistemas utilizados para la degradación, o separación de contaminantes en suelo y agua
- El suelo puede ser reutilizado
- Las bacterias exógenas o degradadoras de los contaminantes mueren cuando los nutrientes y los contaminantes orgánicos se agotan

4.5.2 Desventajas de la biorremediación

- En las arcillas es muy difícil llevar a cabo una biorremediación (permeabilidad)
- Requiere de mucho tiempo (depende del tipo de contaminante)
- En ocasiones, las bacterias se inhiben por la alta concentración de la contaminación
- Muchas veces la disminución de hidrocarburos es por la volatilización

4.5.3 Características de las técnicas de biorremediación

- Económicas: más baratas que otras tecnologías
- Efectivas: los contaminantes son realmente transformados
- Versátiles: el proceso se adapta a las condiciones del sitio según sus requerimientos

- Seguras: “amables con el ambiente”

La biorremediación funciona para:

- Compuestos orgánicos en suelos y cuerpos de agua (biodegradables o biotransformables)
- Compuestos inorgánicos en cuerpos de agua (bioacumulables o biotransformables)
- Compuestos orgánicos e inorgánicos en suelos (biotransformable)
(Susana Saval, Instituto de Ingeniería, UNAM.)

La biorremediación no funciona para

- Compuestos orgánicos recalcitrantes (no son biodegradables)
(Susana Saval, Instituto de Ingeniería, UNAM.)

5 Conclusiones

Si observamos los gráficos y tablas que se presentan podemos decir que:

El transporte terrestre de hidrocarburos y demás sustancias químicas trae consigo accidentes, provocando con ellos el derrame de las sustancias transportadas.

El transporte más representativo es el carretero, lo cual implica un mayor riesgo aunque los volúmenes transportados sean menores.

Las sustancias involucradas con mayor frecuencia son los hidrocarburos.

Las diferentes técnicas de remediación permiten elegir cuál es la más apropiada de acuerdo con las características y necesidades del sitio contaminado para así lograr el saneamiento adecuado conforme a las necesidades del ambiente y las posibilidades principalmente económicas de la empresa responsable del accidente.

Existe un gran número de sitios contaminados que requieren ser saneados, lo cual implica un gran costo para llevarse a cabo; esto obliga a buscar técnicas menos costosas por lo que creemos que la técnica más acorde con este tipo de necesidades es la biorremediación, que posee características que benefician tanto a la economía como al ambiente.

6 Recomendaciones

Detectar y regular el tipo de transporte más propenso a originar accidentes en vías terrestres.

Que la industria instale sistemas de seguridad para prevenir la avería en carreteras, de los vehículos o unidades que transportan sustancias peligrosas.

Que la empresa encargada del transporte verifique que el personal operador de las unidades realice su trabajo en óptimas condiciones.

Que las autoridades den el mantenimiento necesario a las carreteras para disminuir los riesgos de volcaduras y demás accidentes.

Adaptar estas recomendaciones como una forma de inversión, ya que con ello se reducirá el número de accidentes y por tanto las pérdidas económicas disminuirán también.

Promover la biorremediación como forma de remediar suelos contaminados con hidrocarburos y demás sustancias químicas.

7 Glosario

Ambiente: El conjunto de elementos naturales o inducidos por el ser humano, que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados

Conservación: La gestión de los recursos ambientales, aire, agua, suelo y organismos vivos, para obtener su permanencia y conseguir el nivel más alto en la calidad de vida; la gestión en este contexto incluye estudios, investigación, legislación, administración, preservación, utilización, y supone educación y formación

Contaminación: La introducción al ambiente de un compuesto en cantidad tal que incrementa su concentración natural, y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de materia y energía, provocando con ello una intervención negativa en el bienestar y la salud de los organismos vivos

Contaminante: Toda materia o energía que al incorporarse al ambiente resulte nociva para los organismos vivos que lo habitan, y para los bienes materiales del individuo

Desarrollo sustentable: Proceso participativo para mejorar continuamente la calidad de vida de las actuales y futuras generaciones, que implica el respeto a la naturaleza y la distribución equitativa de los beneficios del progreso

Ecosistema: La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el medio físico, en un espacio y tiempo determinados

Evaluación de impacto ambiental: Procedimiento mediante el cual las autoridades competentes determinan la procedencia o no de obras o actividades específicas, estableciendo en su caso, las condiciones a que éstas deban sujetarse para evitar o atenuar efectos negativos en el equilibrio ecológico o el ambiente

Impacto ambiental: Todo aquel efecto positivo o negativo ocasionado por diversas acciones inherentes a proyectos de desarrollo, sobre los factores naturales, sociales y culturales en un lugar y tiempo determinados

LEGEEPA: Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

Material peligroso: El elemento, sustancia, compuesto o la mezcla o residuo de ellos que independientemente de su forma o estado físico represente riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas

Norma Oficial Mexicana (NOM): La regla, método o parámetro científico o tecnológico emitido por la dependencia federal competente, para establecer los requisitos, especificaciones, condicionantes, procedimientos o límites permisibles a observarse en el desarrollo de las actividades humanas, o destino de bienes que causen o puedan causar desequilibrio ecológico, o que permitan uniformar los principios, criterios y políticas en la materia

Prevención: El conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro del ambiente

Protección: El conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente, y prevenir y controlar su deterioro

Residuos peligrosos: Todos aquellos residuos en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológico-infecciosas, irritantes o mutagénicas, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente

8 Bibliografía

Grega Michael D , Buckingham Phillip y L.Evans Jeffrey C. Gestión de residuos tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos, Mc Graw Hill, México, (2000).

Blanca Elena Jiménez Cisneros. La contaminación ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa, S A DE C V México (2001).

Constitución Política de los Estado Unidos Mexicanos. SISTA S A de C V México. (1994).

Carmen Imelda González Gómez y Lorena Erika Osorio Franco. Cien años de industria en Querétaro. México, (jun 2000).

Phillips, Strozak y Wistrom. Química conceptos y aplicaciones. Mc Graw Hill Interamericana Editores, S A de C V. México (1999).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos. Imprenta Bío Bío, S A de C V. México (1993).

Transporte de Canadá, Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América, y Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México. Guía de respuesta en caso de emergencia 2000 (GRE2000). Una guía para los que responden primero en la fase inicial de un accidente ocasionado por materiales peligrosos. México (2000).

NOM-SEMARNAT-138-1993. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de agosto de 2002, y su aviso de prórroga publicado en el D O F el 20 de febrero de 2003.

PROY-NOM-052-SEMARNAT-2001, (que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos).

Ley que reforma y adiciona diversos artículos de la LEGEPA del estado de Querétaro (El gobernador Ing Ignacio Loyola Vera, expido y promulgo la presente Ley en el Palacio de la Corregidora, sede del Poder Ejecutivo del Estado el 19/10/2000, para su debida publicación y observancia).

Bibliografía electrónica

<http://www.imt.mx/Espanol/notas/61/art3.htm>. 08/05/03

<http://www.geocities.com/jojoel99/principal/che.html>. 20//05/03

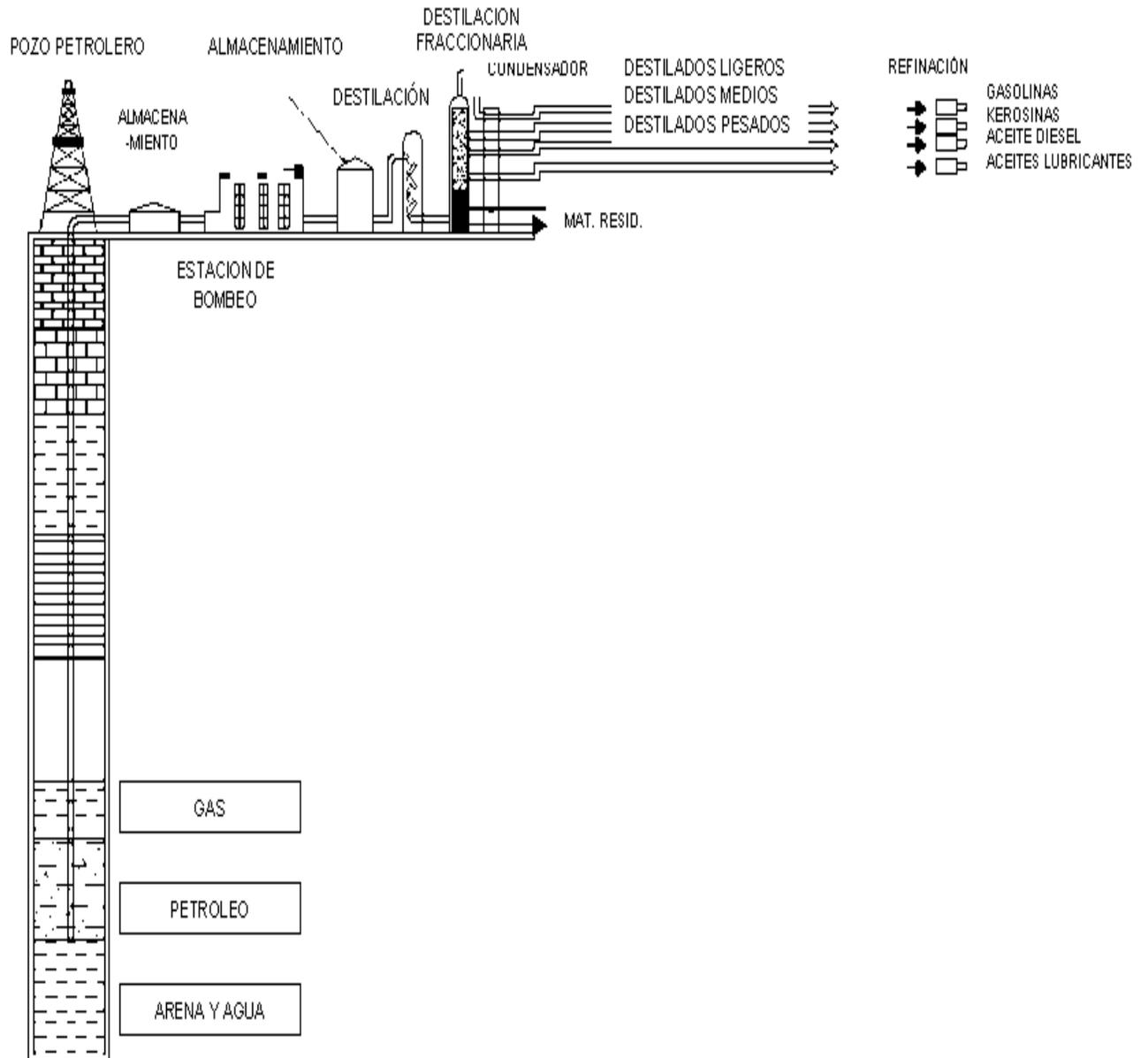
http://www.bioplanet.net/magazine/bio_sepoct_2000/bio_2000_sepoct_industria.htm. 29//05/03

<http://www.materialpeligroso.uqroo.mx/materialp/reg1997.htm>. 20//05/03

<http://lauca.usach.cl/ima/bio1.htm>. 05//06/03

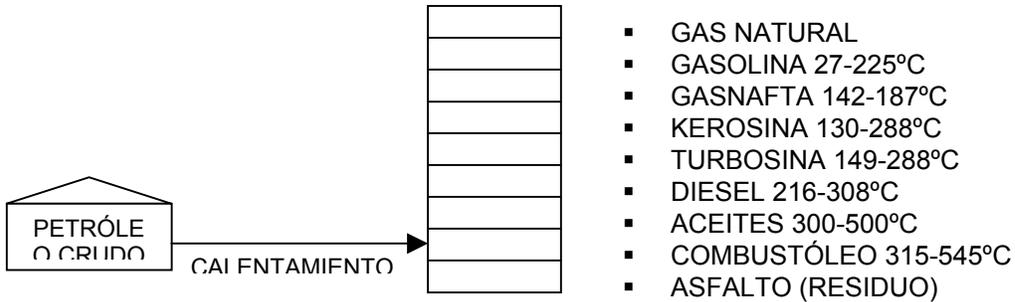
ANEXOS

ANEXO "A" Destilación del petróleo



ANEXO “B”

Principales productos obtenidos de la destilación del petróleo.



En la siguiente tabla se indican los hidrocarburos más comunes, su punto de ebullición, su composición y su uso

Tabla 1

Nombre	Punto ebullición (°C)	Composición aproximada	Usos
Gasolina ligera	20 - 100	C5H12—C7H16	Disolvente
Bencina	70 - 90	C6H14—C7H16	Limpieza en seco
Ligroína	80 - 120	C6H14—C8H18	Disolvente
Gasolina	70 - 200	C6H14—C11H24	Carburante de motores
Queroseno	200 - 300	C12—C16	Alumbrado
Gasóleo	300 - 400	C13—C18	Carburante
Aceite lubricante	> 400	C16—C20	Lubricantes
Grasas, vaselina, etc.	> 400	C18—C22	Preparaciones farmacéuticas
Cera parafina	de > 400	C20—C30	Velas, papel encerado
Residuo (asfalto)	No volátil	C30—C40	Alquitrán asfáltico, coque de petróleo

(Ing Juan Manuel Lesser/Dra Susana Saval)

ANEXO "C"

Contenido de algunos hidrocarburos en combustibles		
Compuesto	Gasolina	Diesel
Benceno %	0,12-3,50	0,50
Tolueno %	2,73-21,80	1,33
Etilbenceno %	0,36-2,86	0,37
O- xileno %	0,68-2,86	1,01
M-xileno %	1,77-3,87	0,96
P- xileno %	0,77-1,58	0,35
Naftaleno %	0,09-0,49	0,50

(Ing Juan Manuel Lesser/Dra Susana Saval)

ANEXO "D"

Tabla 5

MIÉRCOLES 22 DE NOVIEMBRE DE 2000		DIARIO OFICIAL (Primera Sección) 51
Hidrocarburos aromáticos, en microgramos/l:		Límite máximo permisible microgramos/l
Benceno		10,00
Tolueno		700,00
Etilbenceno		300,00
Xileno (tres isómeros)		500,00

(Ing Juan Manuel Lesser/Dra Susana Saval)

ANEXO "E"

Tabla 6

En la siguiente tabla se muestra el número de INE y concentración máxima permitida de algunas sustancias orgánicas.

No de INE	Constituyente orgánico volátil	Concentración máxima permitida (mg/l)
C.V.01	BENCENO	0,5
C.V.02	ETER BIS (2-CLORO ETILICO)	0,05
C.V.03	CLOROBENCENO	100,0
C.V.04	CLOROFORMO	6,0
C.V.05	CLORURO DE METILENO	8,6
C.V.06	CLORURO DE VINILO	0,2
C.V.07	1,2-DICLOROBENCENO	4,3
C.V.08	1,4-DICLOROBENCENO	7,5
C.V.09	1.2-DICLOROETANO	0,5
C.V.010	1,1-DICLOROETILENO	0,7
C.V.011	DISULFURO DE CARBONO	14,4
C.V.012	FENOL	14,4
C.V.013	HEXACLOROBENCENO	0,13
C.V.014	HEXACLORO-1,3-BUTADIENO	0,5
C.V.015	ISOBUTANOL	36,0
C.V.016	ETILMETILCETONA	200,0
C.V.017	PIRIDINA	5,0
C.V.018	1,1,1,2-TETRACLOROETANO	10,0
C.V.019	1,1,2,2-TETRACLOROETANO	1,3
C.V.020	TETRACLORURO DE CARBONO	0,5
C.V.021	TETRACLOROETILENO	0,7
C.V.022	TOLUENO	14,4
C.V.023	1,1,1-TRICLOROETANO	30,0
C.V.024	1,1,2-TRICLOROETANO	1,2
C.V.025	TRICLOROETILENO	0,5

(Ing Juan Manuel Lesser/Dra Susana Saval)

ANEXO "F"

Fig 3

Los hidrocarburos aromáticos son tóxicos, y varios de ellos han demostrado ser cancerígenos.

(Ing Juan Manuel Lesser /Dra Susana Saval)

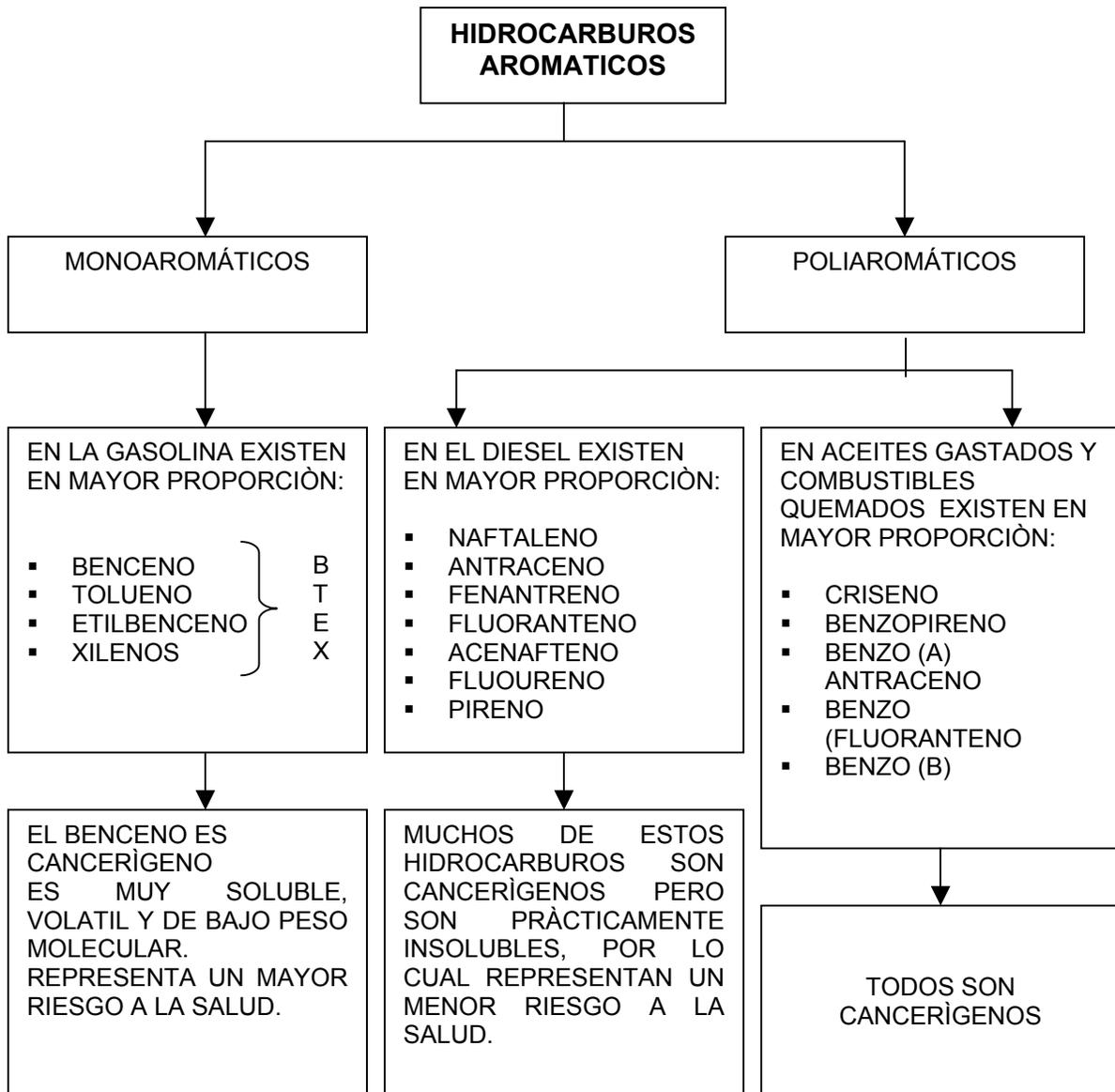
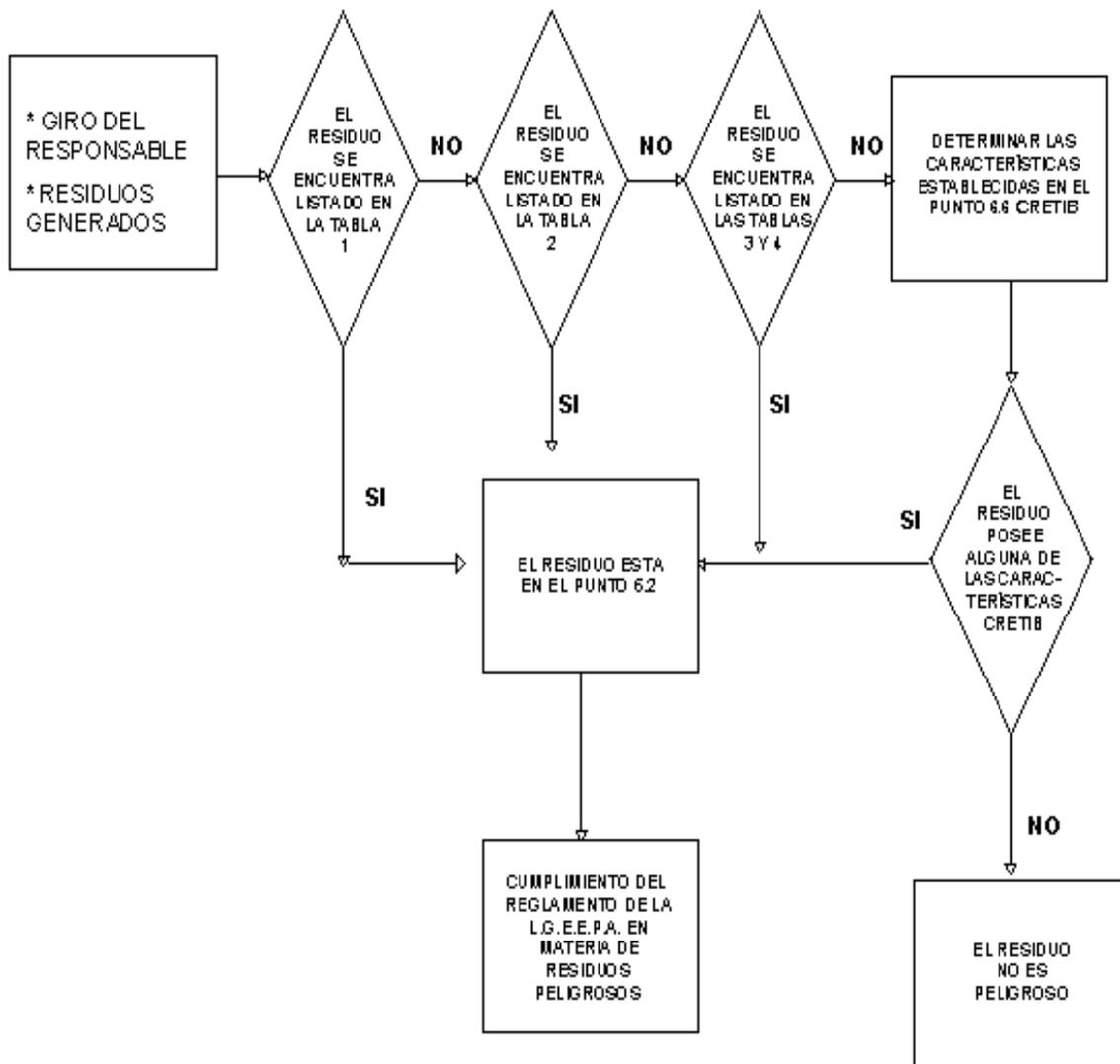


DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS



ANEXO "G"

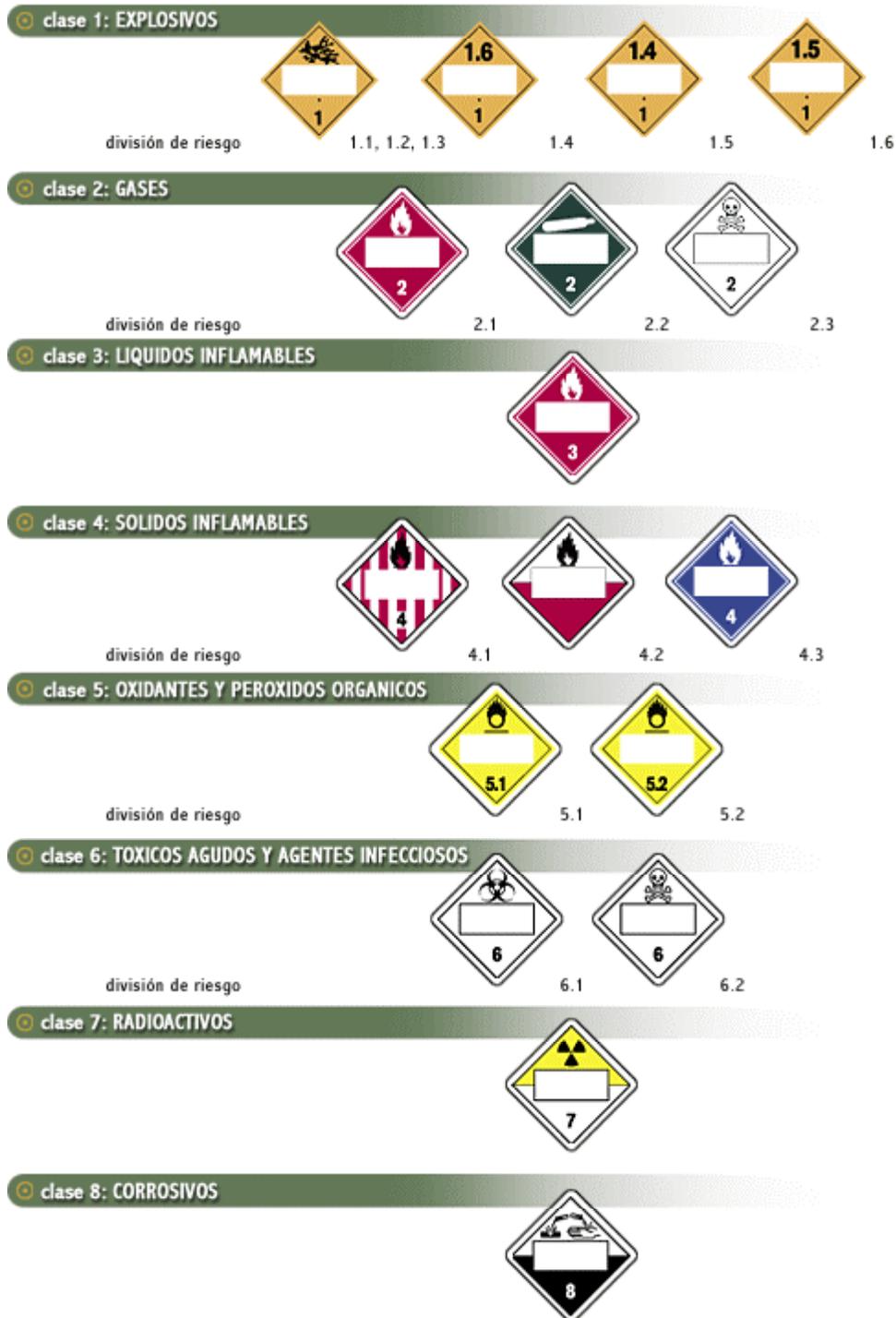
Tabla 18

SOLUBILIDAD DE ALGUNOS HIDROCARBUROS EN AGUA	
COMPUESTO	SLUBILIDAD (mg/l)
MTBE	48000
TAME	2640
n_Hexano	18
Benceno	1750
TOLUENO	526
O-Xileno	175
Etilbenceno	169
m-Xileno	158
Naftaleno	31
Acenafteno	3,93
Acenaftileno	3,93
Indenol (1,2,3,c,d) pireno	2,07
Fluoreno	1,69
Fenantreno	1
Benzo(k) fluoranteno	0,43
Fluoranteno	206
Pireno	0,135
Antraceno	0,045
Benzo(b) fluoranteno	0,014
Benzo (a) antraceno	0,0067
Criseno	0,0016
Benzo (a) pireno	0,0012
Benzo (g,h,i) perileno	0,0007
Dibenzo(a,h) antraceno	0,0005
LA SOLUBILIDAD PUEDE SER INFLUENCIDA POR LA PRESENCIA DE OTRAS SUSTANCIAS	

Contaminación de acuíferos. División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2001

ANEXO "H"

Clasificación de los principales productos transportados por vías terrestres



Fuente: FERROMEX (Ferrocarriles Mexicanos, 2003)



‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683
Col San Juan Mixcoac
03730, México, D F
tel (55) 5598-5610
fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx