



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**GUÍA PARA LA PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE
CARACTERIZACIÓN Y DE REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA
FANNY ACOSTA GARCÍA**

MÉXICO, D.F.

AÑO 2015





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. en I. José Antonio Ortiz Ramírez
VOCAL: Dr. Néstor Noé López Castillo
SECRETARIO: Dr. Alfonso Durán Moreno
1er. SUPLENTE: Dr. José Agustín García Reynoso
2° SUPLENTE: Dra. Luz María Lazcano Arriola

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental, Torre de Ingeniería 3er. Piso, ala sur, Ciudad Universitaria.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTE:

Fanny Acosta García



CONTENIDO

Resumen	8
1. Introducción	9
1.1. Justificación.....	11
1.2. Objetivo	13
1.3. Alcance.....	13
1.4. Metodología	14
2. Marco Teórico y Legal.....	15
2.1. El Suelo	15
2.1.1. Factores Ambientales	18
2.1.2. Propiedades Físicas y Químicas	19
2.1.3. Efectos de la Contaminación en el Suelo	22
2.2. Legislación Ambiental en Materia de suelos.....	23
2.2.1. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).....	24
2.2.2. Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	25
2.2.3. Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA)	26
2.2.4. NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012	28
2.2.5. NOM-060-SEMARNAT-1994.....	29
2.2.6. NOM-021-SEMARNAT-2000	29
2.2.7. Normas Mexicanas en Materia de Contaminación de Suelos	29
3. Metodología de Caracterización y Remediación de Sitios Contaminados.....	30
3.1. Emergencias de Contaminación de Sitio.....	31
3.2. Pasivo Ambiental	31
3.3. Etapas de la Evaluación de Sitios Contaminados	32
3.3.1. Definición del Alcance	34
3.3.2. Levantamiento Técnico	35
3.3.3. Modelo Conceptual Final	37
3.3.4. Plan de Muestreo	38
3.3.5. Métodos Analíticos.....	50
3.3.6. Modelo Matemático de Flujo y Transporte	54
3.3.7. Evaluación de Riesgo a la Salud Humana.....	59
3.4. Evaluación de Alternativas de Remediación.....	62
3.4.1. Tratamiento Biológico <i>In Situ</i>	66



3.4.2.	Tratamiento Físico-Químico <i>In Situ</i>	70
3.4.3.	Tratamiento Térmico <i>In- Situ</i>	72
3.4.4.	Tratamiento Biológico <i>Ex Situ</i>	73
3.4.5.	Tratamiento Físico-Químico <i>Ex Situ</i>	74
3.4.6.	Tratamiento Térmico <i>Ex Situ</i>	76
3.4.7.	Trenes de Tratamiento	78
3.5.	Implementación de la Remediación	79
3.5.1.	Pruebas de Tratabilidad	79
3.5.2.	Propuesta de Remediación	80
4.	Conclusiones y recomendaciones	85
	Bibliografía	87
	Guía para la planeación de proyectos de caracterización y de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.....	Anexo



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Elementos Esenciales (López Almanza, 2012).	17
Tabla 2 Clasificación de las partículas de acuerdo a su tamaño (Criterios USDA e IUSS).	20
Tabla 3 Método para establecer los límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (SEMARNAT-SSA1, 2013).....	28
Tabla 4 Métodos Analíticos para establecer los límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (SEMARNAT-SSA1, 2013, 2013).	28
Tabla 5 Alcance de la Caracterización según la finalidad del proyecto (SEMARNAT, 2010).....	34
Tabla 6 Información Recopilada Necesaria para el Levantamiento Técnico (Hernandez & Sánchez, 2011).....	35
Tabla 7 Actividades Correspondientes a la inspección del sitio (Hernandez & Sánchez, 2011).	36
Tabla 8 Patrones de Muestreo (Saval Bohórquez, 2011).....	42
Tabla 9 Mínimo de Puntos de Muestreo (SEMARNAT-SSA1, 2013).....	43
Tabla 10 Sistemas comúnmente utilizados para la toma de muestras.....	46
Tabla 11 Recipientes para las muestras, temperaturas de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro (SEMARNAT-SSA1, 2013).....	47
Tabla 12 Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante (SEMARNAT-SSA1, 2013).....	50
Tabla 13 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo (SEMARNAT-SSA1, 2013).....	53
Tabla 14 Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en el suelo (SEMARNAT-SSA1, 2013).....	53
Tabla 15 Software para la modelación del flujo y transporte de contaminantes en el suelo (EPA, 2014).....	58
Tabla 16 Niveles de riesgo de acuerdo a los receptores y el tipo de área (Flores Baca, 2013).	61
Tabla 17 Técnicas de remediación de suelos (INECC, 2007).	81
Tabla 18 Tipos de contaminantes tratados por diferentes tecnologías de remediación (EPA, 2010)..	82



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Derrame de petróleo en Tabasco (Matus, 2013).....	11
Figura 2 En el periodo (Enero-Abril 2013) en 44 ocasiones la delincuencia colocó tomas clandestinas en poliductos. Puebla (Pérez, 2014).....	11
Figura 3 El 31 de Diciembre del 2011 ocurrió un derrame de petróleo crudo en un oleoducto de Pemex Refinación que va de Nuevo Teapa a Poza Rica, en el municipio de Cosoloaque, Veracruz, México (Greenpeace., 2013).....	11
Figura 4 Zona afectada por el derrame de combustible en Coatzacoalcos, Veracruz (Morales, 2012).11	
Figura 5 Emergencias Químicas Reportadas en el Periodo 2000-2012. PEMEX Refinación (Distribución Regional %) (PROFEPA-SEMARNAT, 2012).	12
Figura 6 Esquema de las fases del suelo (Dorronsoro, 2013).	15
Figura 7 Composición de un suelo ideal.....	16
Figura 8 Perfil del suelo que muestra los horizontes del mismo (Manahan, 2007).	16
Figura 9 Tipos de Suelo en México (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).....	17
Figura 10 Efectos en el suelo debido a la cantidad de humedad (López Almanza, 2012).	18
Figura 11 Características del suelo con respecto al clima (López Almanza, 2012).	19
Figura 12 Propiedades físicas primarias y secundarias del suelo.....	20
Figura 13 Diagrama de clases de textura de suelos (USDA, 2010).....	21
Figura 14 Efecto de la contaminación en el suelo.....	22
Figura 15 Artículos de la LGEEPA relacionados en tema de suelos contaminados (LGEEPA, 2014).	24
Figura 16 Artículos de la LGPGIR en materia de suelos contaminados con hidrocarburos (LGPGIR, 2014).....	26
Figura 17 Artículos de la Reforma al Código Penal en Materia de Delitos Federales Contra el Ambiente y la Gestión Ambienta en materia de suelos contaminados con hidrocarburos (LFRA, 2009).27	
Figura 18 Normas Oficiales Mexicanas Aplicables en Materia de Suelos (SEMARNAT, 2012).	29
Figura 19 Puntos para atender una emergencia.....	31
Figura 20 Etapas de la Evaluación de sitios contaminados (Hernandez & Sánchez, 2011).	32
Figura 21 Características a determinar en el levantamiento topográfico.	36
Figura 22 Métodos geofísicos aplicables a la identificación de contaminantes en el suelo (UNICAUCA, 2009).....	37
Figura 23 Ejemplo de Puntos de Muestreo Aleatorios (Saval Bohórquez, 2011).	41
Figura 24 Patrones de Muestreo con distribución uniforme (Saval Bohórquez, 2011).....	41
Figura 25 Ejemplos de Patrones de Muestreo con formas irregulares (Saval Bohórquez, 2011).	42
Figura 26 Mecánica de Contaminación de suelos y cuerpos de agua (García Morales, Marzo 2013)..	44
Figura 27 Ejemplo de la Medición de la Profundidad en el punto de muestreo (Jiménez, 2013).....	45
Figura 28 Equipos utilizados para el muestreo (Jiménez, 2013).....	46
Figura 29 Ejemplo de dispersión de hidrocarburo en el suelo (Aguilar, 2013).....	55
Figura 30 Tipos de Modelación de flujo y transporte (Hernandez-Espíritu., 2013).....	57
Figura 31 Factores a evaluar en el análisis de riesgo (Flores Serrano, 2013).....	59
Figura 32 Diagrama de Rutas de Exposición (Flores Serrano, 2013).....	59



Figura 33 Efectos de la exposición a hidrocarburos (ATSDR, 2014).....	60
Figura 34 Estrategias de Remediación (INECC, 2007).	63
Figura 35 Tipos de tratamientos de remediación (INECC, 2007).	64
Figura 36 Lugar donde se realiza el proceso de remediación (INECC, 2007).....	65
Figura 37 Técnicas de remediación de acuerdo al lugar donde se realiza el proceso de remediación.....	65
Figura 38 Aplicaciones de la Biorremediación (Saval, 2013).....	66
Figura 39 Ventajas y desventajas del proceso de biorremediación (INECC, 2007).....	67
Figura 40 Grupos de técnicas de desorción térmica.....	76
Figura 41 Tipos de sistemas de incineración (Miliarium, 2008).....	77
Figura 42 Niveles de estudios de tratabilidad (EPA, 1996).	79
Figura 43 Criterios para la selección de una tecnología de remediación (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).	80
Figura 44 Costos (Dólares USA) promedio por tonelada de suelo tratado, en función al tipo de tecnología de remediación (Barbosa Amaya, 2011).	82
Figura 45 Ubicación de las Empresas Mexicanas autorizadas para la remediación de suelos contaminados (SEMARNAT, 2014).	83
Figura 46 Tipo de tratamiento utilizado por las empresas autorizadas en México para la remediación de suelos contaminados (SEMARNAT, 2014).	84

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1 Diagrama General para la Caracterización y Remediación de Sitios Contaminados.....	30
Diagrama 2 Estrategia de Caracterización.	33
Diagrama 3 Diagrama de Análisis de Muestras en el Laboratorio (INTERTEK,2013).....	50
Diagrama 4 Diagrama de la metodología de Muestreo.....	54
Diagrama 5 Diagrama de Remediación.....	62



RESUMEN

En la actualidad se debe dar especial atención a los impactos ambientales en el suelo a causa de los hidrocarburos, ya sea que se trate de pasivos ambientales o emergencias ambientales incluidos los accidentes; esto con el fin de eliminar el riesgo a la población y al ambiente, ya que algunos contaminantes son extremadamente tóxicos. Por lo anterior es muy importante que las entidades y profesionales involucrados en las acciones enfocadas a la remediación de sitios contaminados con hidrocarburos cuenten con metodologías que hagan más rápida y eficaz la atención, que se establezca una mayor coordinación y responsabilidades compartidas de todas las áreas involucradas, además de un completo involucramiento de las áreas operativas y de las áreas que administran los presupuestos.

El presente trabajo de tesis consiste en una guía general, con una estructura claramente organizada para la planeación de proyectos de caracterización y de remediación de suelos para atender situaciones de emergencia en suelos contaminados con hidrocarburos, así como la atención a pasivos ambientales para lograr una caracterización y remediación exitosa, considerando los lineamientos de la legislación ambiental vigente. En esta guía se muestra de manera esquemática mediante un diagrama de flujo, conceptos y criterios tanto técnicos como prácticos reportados en la literatura científica, casos de éxito e investigaciones recientes lo cual facilita la toma de decisiones y contribuye a una planeación integral del proyecto de caracterización y remediación.

El éxito de un proyecto de caracterización y remediación de un sitio contaminado con hidrocarburo, depende enteramente de la correcta planeación y ejecución del mismo. Es necesario integrar diversos conceptos para dar una solución integral y efectiva al problema.

Es importante mencionar que a la fecha Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha cambiado completamente su estructura organizacional como consecuencia de las Reformas Energéticas en México. Dado que se presenta información histórica de hechos y datos relacionados con casos de sitios contaminados con hidrocarburos, se mencionarán las filiales como PEMEX Refinación que existían hasta antes de las Reformas.



1. INTRODUCCIÓN

La sabiduría es la habilidad de ver con mucha anticipación las consecuencias de las acciones actuales, la voluntad de sacrificar las ganancias a corto plazo a cambio de mayores beneficios a largo plazo y la habilidad de controlar lo que es controlable y de no inquietarse por lo que no lo es. Por tanto, la esencia de la sabiduría es la preocupación por el futuro. No es el mismo tipo de interés en el futuro que tienen los videntes, que sólo tratan de predecirlo. El sabio trata de controlarlo.

En México existen extensas áreas contaminadas con hidrocarburos del petróleo debido principalmente a fugas o derrames que se presentan en los ductos de Petróleos Mexicanos (PEMEX), ya sea por falta de mantenimiento, por actos ilícitos de terceros o a causa de accidentes en carreteras federales en el transporte de hidrocarburos. Este tipo de compuestos, se acumulan en ecosistemas marinos y en suelos, siendo responsables de su deterioro. Algunos suelos contaminados, principalmente en el sureste de México, contienen concentraciones de hidrocarburos hasta de 450,000 mg/kg (Gallegos-Martínez y col., 2000).

Este tipo de eventos suelen ser los casos más frecuentes de contingencias o emergencias ambientales que propician la contaminación de suelos y su remediación. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental (LGEEPA) en su última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 16 de enero de 2014, define a las contingencias ambientales como la situación de riesgo, derivada de actividades humanas o fenómenos naturales, que pueden poner en peligro la integridad de uno o varios ecosistemas, y a las emergencias ecológicas como una situación derivada de actividades humanas o fenómenos naturales que al afectar severamente a sus elementos, pone en peligro a uno o varios ecosistemas (LGEEPA, 2014).

Los suelos sufren la adición constante de diversos residuos y son capaces de retener y acumular contaminantes por mucho tiempo. Los más comunes son metales pesados, hidrocarburos y plaguicidas, entre otros.

Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran los siguientes: dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAPs). En los suelos contaminados en México se encuentran en mayores cantidades: benzo(a)pireno y benzo(a)antraceno, entre otros, considerados como contaminantes prioritarios debido a sus efectos carcinogénicos. De estos, compuestos los HAPs se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTPs) (Instituto Nacional de Ecología, 2007).

La remediación no sólo involucra la implementación de tecnologías y la ejecución de trabajos en campo, también implica solventar problemas de carácter administrativo,



jurídico y logístico. Por dichas razones, hoy en día una de las preocupaciones de las autoridades ambientales es la implementación de tecnologías eficientes y económicamente factibles que permitan la eliminación de este tipo de contaminantes. Así como también es de suma importancia contar con un equipo consolidado de especialistas en caracterización y remediación de suelos para atender emergencias o remediar pasivos ambientales.

De acuerdo a la Real Academia Española, *guía* es “*Tratado en que se dan preceptos para encaminar o dirigir en cosas, Lista impresa de datos o noticias referentes a determinada materia*”.

En el contexto del presente trabajo, esta guía deberá entenderse como un documento que da preceptos o lineamientos para dirigir los trabajos de planeación de proyectos de caracterización y de remediación de sitios contaminados con hidrocarburos.

La planeación es la determinación de lo que va a hacerse, incluye decisiones de importancia, como el establecimiento de políticas, objetivos, esquematización de programas, definición de métodos específicos y procedimientos.

De esta manera, la planeación es una disciplina prescriptiva (no descriptiva) que trata de identificar acciones a través de una secuencia sistemática de toma de decisiones, para generar los efectos que se espera de ellas, o sea, para proyectar un futuro deseado y los medios efectivos para lograrlo.

En otras palabras la planeación es proyectar un futuro deseado y los medios efectivos para conseguirlo. Es un instrumento que usa el hombre sabio; más cuando lo manejan personas que no lo son, a menudo se convierte en un ritual incongruente que proporciona, por un rato, paz a la conciencia, pero no en el futuro buscado.

En el caso de esta guía comprende todo el proceso desde el análisis de las situaciones, objetivo, secuencia de acciones, procedimientos y métodos específicos para la caracterización y la remediación de sitios contaminados con hidrocarburos en cumplimiento de los lineamientos establecidos en la legislación nacional vigente, hasta llegar a la toma de decisiones. Incluye metodologías para la recolección de información, programación, diagnóstico, pronóstico, avances y medidas de resultados.

Por lo tanto, esta guía es una referencia para los profesionales que tendrán a su cargo proyectos de remediación de sitios contaminados quienes al seguir las instrucciones contenidas en dicha guía tendrán una mayor seguridad de un cumplimiento exitoso en este tipo de proyectos.



1.1. JUSTIFICACIÓN

Por ser México un país productor de petróleo, gran parte de las actividades industriales que se realizan, están orientadas a la exploración, explotación, el procesamiento, almacenamiento, transporte de hidrocarburos. Por otra parte, entorno a estas actividades de alta demanda económica se presentan actos ilícitos (tomas clandestinas) que aumentan la posibilidad de derrames en zonas industriales y rutas de transporte.



Figura 1 Derrame de petróleo en Tabasco (Matus, 2013).



Figura 2 En el periodo (Enero-Abril 2013) en 44 ocasiones la delincuencia colocó tomas clandestinas en poliductos. Puebla (Pérez, 2014).

Los problemas de contaminación más conocidos son aquellos que ocurren en superficies y cuando la presencia de contaminantes es evidente a simple vista por su aspecto como se muestra en las Figuras 1, 2, 3 y 4.



Figura 3 El 31 de Diciembre del 2011 ocurrió un derrame de petróleo crudo en un oleoducto de Pemex Refinación que va de Nuevo Teapa a Poza Rica, en el municipio de Cosoloaque, Veracruz, México (Greenpeace., 2013).



Figura 4 Zona afectada por el derrame de combustible en Coatzacoalcos, Veracruz (Morales, 2012).



Es importante mencionar que al día de hoy la estructura de PEMEX ha cambiado, pero dado que los datos contenidos en el presente trabajo se obtuvieron de reportes de 2014 se continuará con la designación de PEMEX Refinación. De acuerdo con datos oficiales de Petróleos Mexicanos, su organismo subsidiario PEMEX Refinación cuenta con una amplia Infraestructura del Sistema Nacional de Refinación, que incluía seis Refinerías: dos en la zona Norte, dos en la zona Centro y dos más en la zona Sur. La longitud total de la red de transporte por ducto para cubrir la demanda de petrolíferos es de 14,182 km.

En el transporte terrestre cuenta con una flota propia de autos tanque integrada por 1,360 unidades, que en 2011 operaron para el reparto de combustibles a las estaciones de servicio de las cuales 1,261 corresponden a equipos con capacidad de 20 m³ y 99 de 30 m³ distribuidos en 75 Terminales de Almacenamiento y Reparto (TAR) (Pemex Refinación , 2006-2012).

En 2014, se procesaron 1,224 miles de barriles diarios (mbd) de los cuales 66.4% corresponden a crudo procesado y 33.6% a crudo ligero. Entre los principales productos elaborados se encuentran: 34.7% gasolina, 25.6% diésel y 22% combustóleo (Pemex Refinación, 2014).

Las estadísticas elaboradas por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA-SEMARNAT, 2012) indican que el 44.7% de las emergencias ambientales son por parte de Pemex, siendo el 27.4% de éstas en específico de PEMEX Refinación distribuidas como se muestra en la Figura 5.

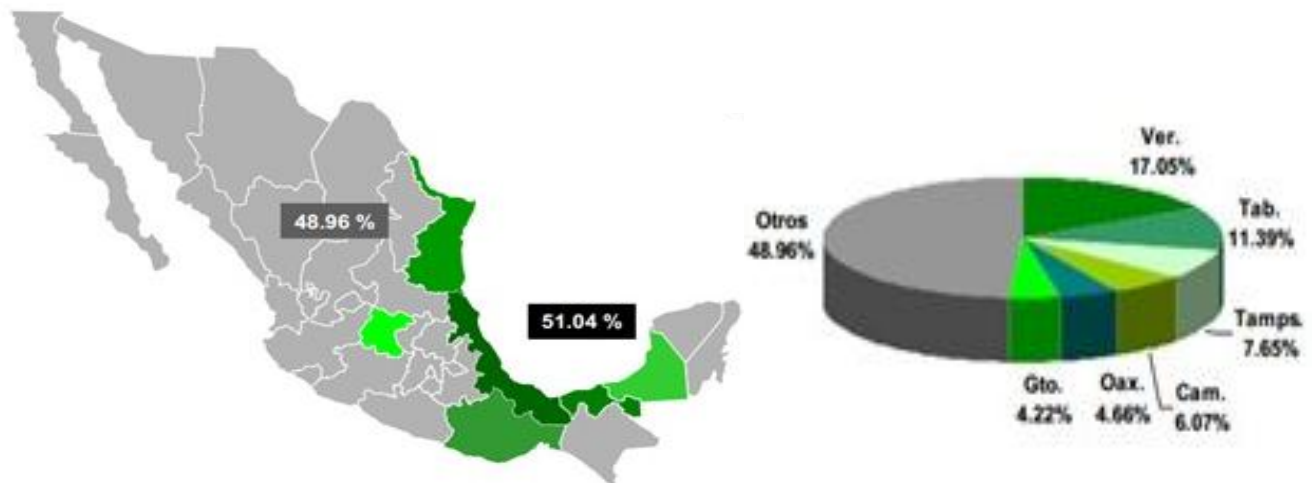


Figura 5 Emergencias Químicas Reportadas en el Periodo 2000-2012. PEMEX Refinación (Distribución Regional %) (PROFEPA-SEMARNAT, 2012).

Más del 50% de las emergencias ambientales ocurren en los estados de Veracruz, Tabasco, Tamaulipas, Campeche, Guanajuato y Oaxaca.



Veracruz representa alrededor del 17% del total a nivel nacional, pues concentra mayor actividad petrolera, movimiento de crudo y sus derivados, mientras que en Guanajuato se presenta alrededor del 4% ya que en esta región se presenta un gran flujo de vehículos que transportan sustancias químicas.

El 93.3% de las emergencias reportadas se presentaron en zonas terrestres y el resto en zonas marítimas, de estas emergencias terrestres, el 75.6% fueron provocadas por derrames, 10.9% por fugas, el 7% a causa de fuego, el 6.1% a causa de explosiones y el resto por otros aspectos. De estos derrames, el 65% se efectúan en el transporte, el 26% en planta y el resto en otras circunstancias. En el transporte se reportan por ductos el 51% y por carreteras el 45% (PROFEPA-SEMARNAT, 2012).

Por lo anterior resulta evidente la necesidad de contar con documentos de referencia que permitan planear de forma adecuada, desde el punto de vista técnico y de cumplimiento normativo, proyectos de remediación de sitios contaminados con hidrocarburos, tal es el objetivo del presente trabajo.

1.2. OBJETIVO

Elaborar una guía para la planeación de proyectos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos considerando los lineamientos de la legislación ambiental vigente así como los conceptos y los criterios técnicos reportados en literatura científica especializada para contar con un documento estructurado que facilite la toma de decisiones en la materia.

1.3. ALCANCE

Estructurar esquemáticamente la información obtenida para elaborar una guía de procedimientos que permita consolidar un programa de caracterización y remediación de suelos, para atender situaciones de emergencia en suelos contaminados por hidrocarburos, así como la atención de pasivos ambientales. La guía consistirá de un documento estructurado con diagramas de flujo de apoyo.



1.4. METODOLOGÍA

Para cumplir con el objetivo planteado, se realizaron las actividades descritas a continuación:

1. Revisión del impacto ambiental que produce la contaminación del suelo a causa de hidrocarburos.
2. Revisión de datos de la infraestructura de Pemex, para determinar las zonas con mayor probabilidad de sitios contaminados con hidrocarburos.
3. Revisión de estadísticas de emergencias ambientales a causa de hidrocarburos por parte de la PROFEPA.
4. Investigación sobre la composición del suelo, los suelos mayormente predominantes en México, así como sus propiedades tanto físicas como químicas.
5. Revisión sobre la normatividad ambiental nacional aplicable en materia de suelos contaminados con hidrocarburos.
6. Elaboración de la estructura de una metodología para la caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.
7. Identificación de los métodos geofísicos aplicables para la identificación de contaminantes en el suelo.
8. Revisión y análisis de información sobre los tipos de muestreo, así como los patrones de muestreo.
9. Identificación de los equipos utilizados para el muestreo de suelos así como los sistemas utilizados para la toma de muestras.
10. Identificación de las técnicas analíticas para la caracterización de suelos contaminados con hidrocarburos.
11. Revisión de modelos matemáticos de flujo y transporte de la dispersión de los hidrocarburos en el suelo.
12. Revisión de programas informáticos (software) utilizados para la modelación del flujo y transporte de contaminantes en el suelo.
13. Revisión de los métodos para la evaluación de los riesgos a la salud humana y al medio ambiente a causa de sitios contaminados.
14. Revisión y análisis de las tecnologías de remediación existentes.
15. Identificación de las empresas autorizadas para la prestación de servicios de remediación se suelos contaminados.
16. Elaboración de una guía de procedimientos y estrategias para realizar el muestreo, la caracterización para la remediación de suelos contaminados por fugas de hidrocarburos.
17. Asistencia a cursos.
18. Consultas con expertos.



2. MARCO TEÓRICO Y LEGAL

En el siguiente apartado se mencionan las propiedades y características del suelo como elemento vital. Así como también la legislación aplicable en materia de suelos contaminados con hidrocarburos.

2.1. EL SUELO

El concepto de suelo ha ido modificándose conforme ha ido avanzando el conocimiento de sus componentes y la relación entre ellos. Así, para Walter L. Kubiena, edafólogo austriaco en 1954 definió el suelo como, *“La capa viviente de transformación de la corteza sólida terrestre surgida bajo el influjo de la vida y de las especiales condiciones del hábitat biológico, sometida a un constante cambio estacional y desarrollo peculiar”*. José María Albareda definió en 1940 el suelo como *“Una formación limítrofe, zona en que se compenetrán la parte sólida, líquida y gaseosa de la tierra, lo mineral inorgánico, seres vivos y restos de la vida, crecimientos y destrucciones, lavados y evaporaciones, una complejidad natural sometida a una complejidad dinámica”*.

Generalmente se acepta que el suelo es la parte exterior de la corteza terrestre, en la cual, las rocas se han desintegrado por efecto del intemperismo, formando una mullida cubierta en la que vive la flora y la fauna microbiana que actuando como laboratorio vivo, transforma la materia mineral en alimento para las plantas y el hombre. Es decir, el suelo es el recurso natural que, junto con el agua en forma de corrientes y lluvias, permite el establecimiento de actividades agrícolas, forestales y ganaderas. La parte más importante del medio físico en un ecosistema terrestre es el suelo (Gómez et al. 2001).

El suelo puede ser considerado como un sistema disperso en el que pueden diferenciarse tres fases, como se muestra en la Figura 6.

- Fase sólida: agregados minerales y orgánicos.
- Fase líquida: agua de la solución del suelo.
- Fase gaseosa: atmósfera del suelo contenida en el espacio poroso.

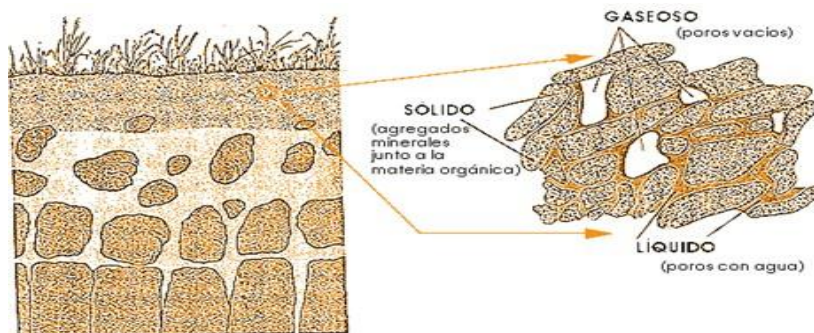


Figura 6 Esquema de las fases del suelo (Dorrnsoro, 2013).



La cantidad de cada componente varía de un suelo a otro. El promedio de cada componente del suelo es: 45% minerales (arcilla, arena y limo), 25% aire, 25% agua, 5% materia orgánica, lo cual se muestra esquemáticamente en la Figura 7.

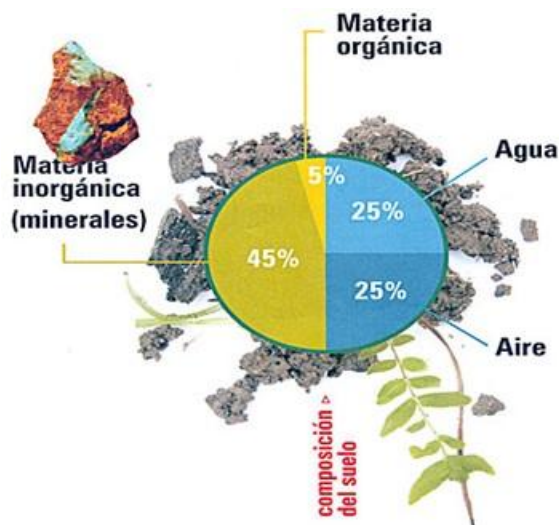


Figura 7 Composición de un suelo ideal .

Manahan (2007) menciona que los suelos típicos exhiben capas distintas llamadas **horizontes**, con profundidad creciente. La capa superior del suelo, que tiene típicamente varios centímetros de espesor, es conocida como el horizonte A, o mantillo. Ésta es la capa de máxima actividad biológica en el suelo y contiene la mayor parte de la materia orgánica del mismo. Los iones metálicos y las partículas de arcilla en el horizonte A están sujetos a una considerable lixiviación. La siguiente capa es el horizonte B, o subsuelo. Ésta recibe material como materia orgánica, sales y partículas de arcilla lixiviadas del mantillo. El horizonte C está compuesto por las rocas originarias meteorizadas a partir de las cuales se generó el suelo. La siguiente capa es la roca madre. Tal como se ilustra en la Figura 8.

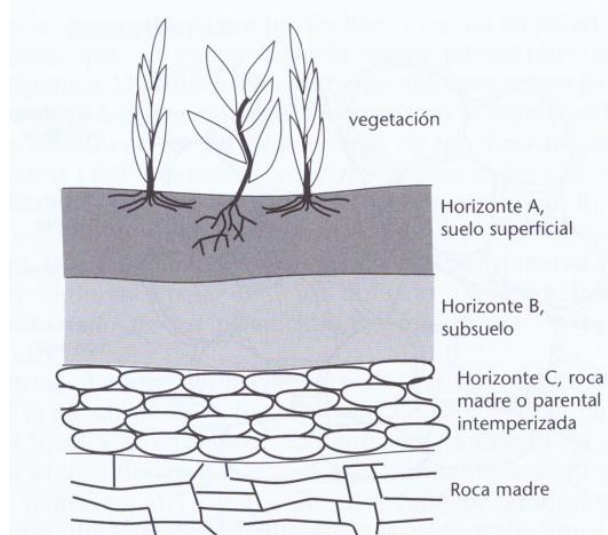


Figura 8 Perfil del suelo que muestra los horizontes del mismo (Manahan, 2007).



Un suelo se llama "saturado" cuando los poros son ocupados completamente por agua, y "no saturado" cuando una parte de los poros es ocupada por agua y otra parte por aire. Si existe una saturación de agua o el suelo está muy compactado, eliminando la presencia de los poros, la distribución de los gases en el suelo no se llevará a cabo de una manera adecuada, afectando a sus funciones normales.

El suelo está conformado por elementos químicos, a los que se les da el nombre de elementos esenciales y que forman parte de la estructura del suelo, algunos de manera notable (macro), otros en cantidades medias (medio) y finalmente otros en cantidades pequeñas (micro) Como se muestra en la Tabla 1 (López Almanza, 2012).

Tabla 1 Elementos Esenciales (López Almanza, 2012).

Macroelementos	Medioelementos	Microelementos	Microelementos especiales
N (nitrógeno) P (fósforo) K (potasio)	Ca (calcio) S (azufre) Mg (magnesio) Cu (cobre) B (boro) Mo (molibdeno)	Fe (hierro) Mn (manganeso) Zn (zinc) Co (cobalto) Se (selenio) I (iodo)	Na (sodio) Cl (cloro) Si (silicio)

En México existen 26 de los 30 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, los cuales se mencionan en la Figura 9 (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

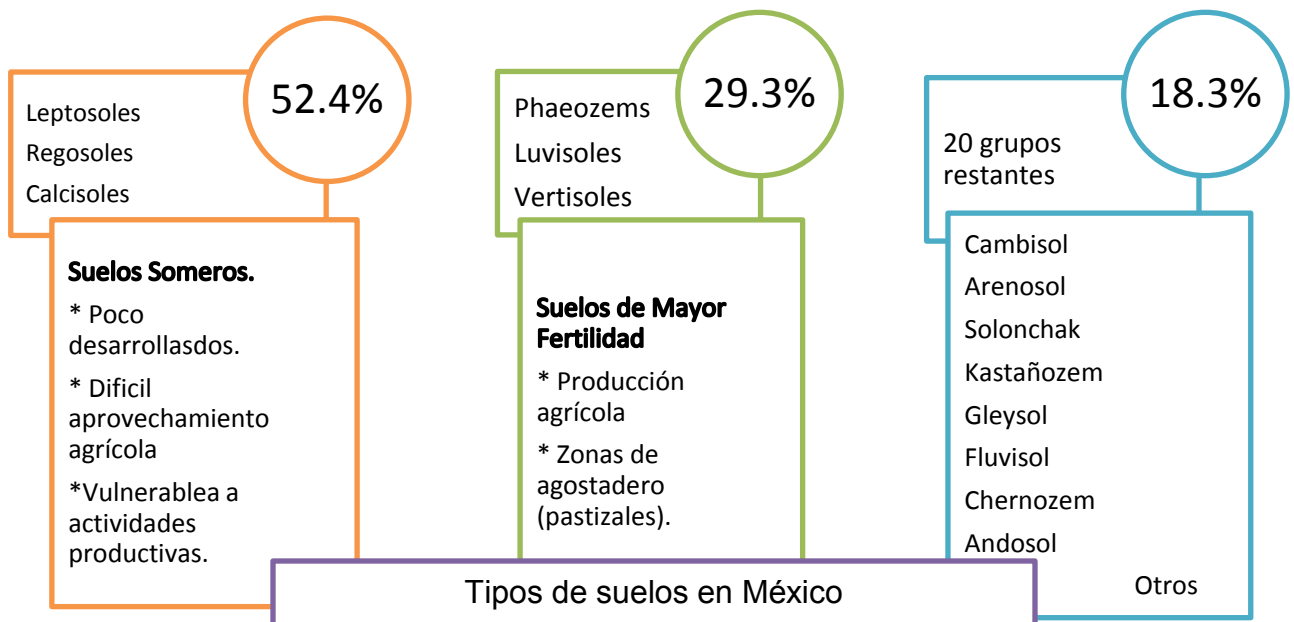


Figura 9 Tipos de Suelo en México (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).



Los elementos que conforman el suelo pueden encontrarse en diferentes formas, que dependen de muchos factores ambientales como el clima, el agua y la presión, entre otros, que influyen determinantemente en todo lo que ocurre con los elementos que componen el suelo, y principalmente en su dinámica.

2.1.1. Factores Ambientales

Los factores ambientales son fundamentales en la estructura y comportamiento del suelo, estos factores son:

Temperatura.

Puede afectar propiedades del contaminante así como la velocidad de un proceso de biorremediación, ya que la velocidad de las reacciones enzimáticas depende de ésta. La lluvia, es la encargada de regular la humedad, el contenido del aire y el grado de lixiviación del suelo.

Humedad

Se denomina humedad del suelo a la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno. Esta característica es de gran importancia ya que es una limitante en ciertos métodos de remediación como se muestra en la Figura 10.

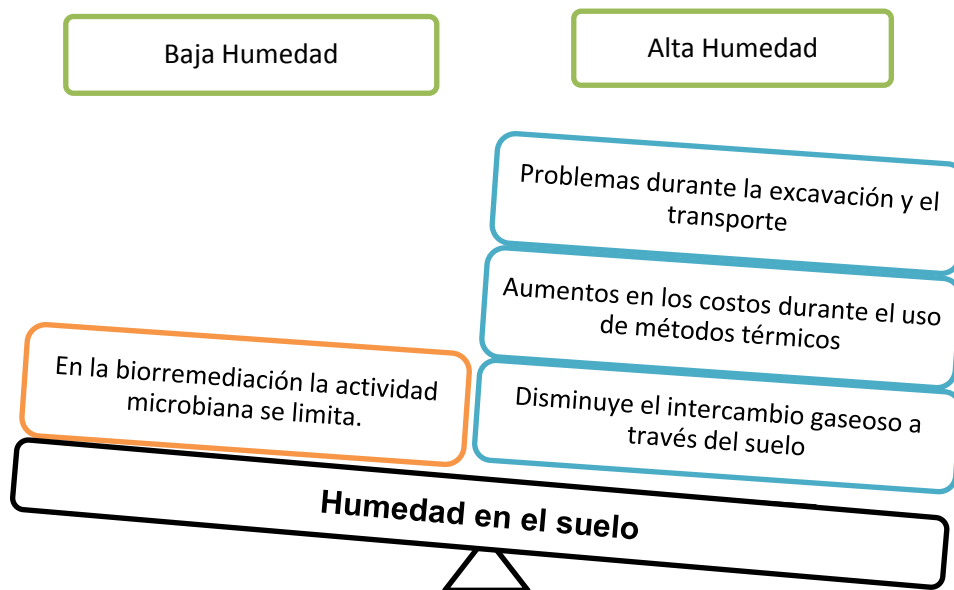


Figura 10 Efectos en el suelo debido a la cantidad de humedad (López Almanza, 2012).



Clima

La influencia de los diferentes estados climáticos y las variaciones que éste presenta, genera un efecto en los suelos. El clima determina los efectos sobre los materiales de la superficie de la corteza terrestre así como, la presencia de organismos relacionados con él, entre otras características que se muestran en la Figura 11.

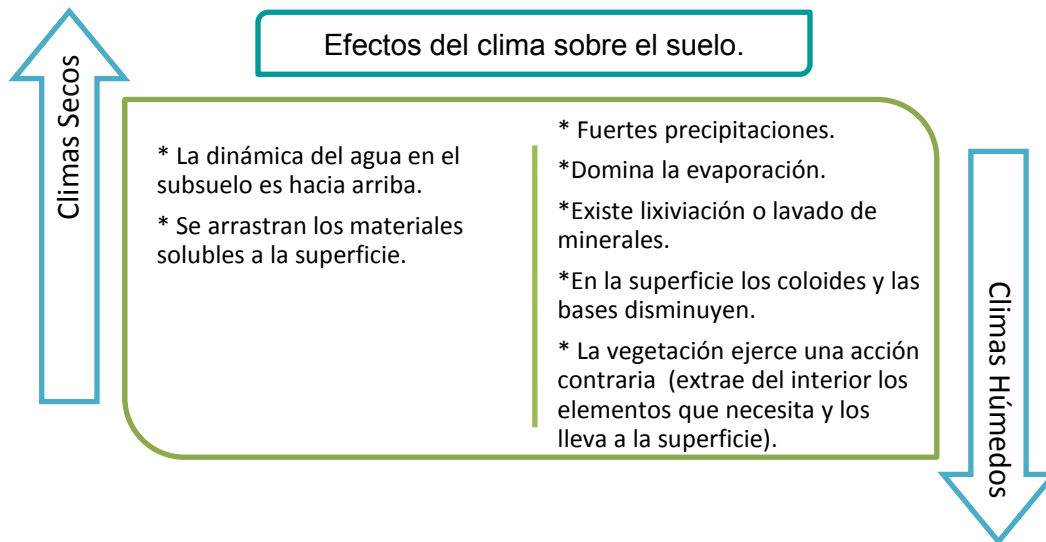


Figura 11 Características del suelo con respecto al clima (López Almanza, 2012).

2.1.2. Propiedades Físicas y Químicas

Las propiedades físicas son aquellas relacionadas con la organización estructural de un suelo y que son utilizadas en su descripción o determinación en laboratorio. Son de gran importancia para determinar las cualidades del suelo y definir su uso, entre otros.

En la mayoría de los casos, las partículas que componen al suelo son de origen mineral, provenientes de la degradación de rocas ígneas (granitos y basaltos) y/o de rocas sedimentarias (esquistos, gres y calizas) (INECC, 2007).

Una característica física corresponde a una expresión cuantitativa de determinada propiedad y que da lugar a diferenciar los suelos en sus diferentes tipos.

Se han separado las propiedades físicas en primarias y secundarias como se muestra en la Figura 12. Las primeras pueden, o no, relacionarse entre sí. Pero la combinación de dos o más determinan las secundarias.

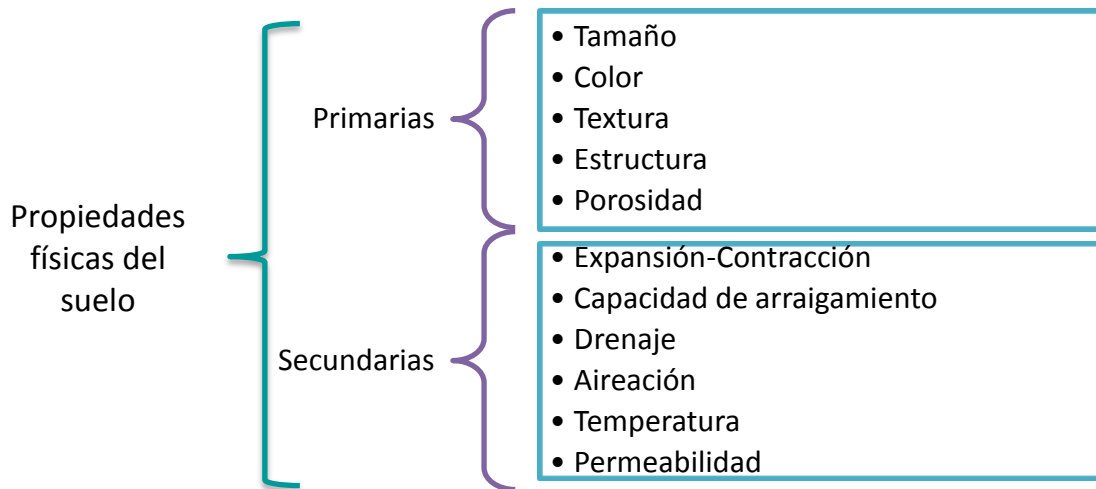


Figura 12 Propiedades físicas primarias y secundarias del suelo.

Las partículas minerales tienen tamaños muy variables: pueden ser rocas o gravas de centímetros o incluso metros de diámetro, hasta arenas, limos y arcillas cuyos tamaños son del orden de mm.

Para clasificar las partículas según su tamaño existen diversos criterios dentro de los cuales destacan la clasificación adoptada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2014) así como la Unión Internacional de la Ciencia del Suelo (IUSS, 2014), como lo muestra la Tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de las partículas de acuerdo a su tamaño (Criterios USDA e IUSS).

Fracciones	Límites de los diámetros en mm	
	DAEUA (USDA)	IUSS
<i>Arena muy gruesa</i>	2.0 – 1.0	2.0 -0.2
<i>Arena gruesa</i>	1.0 – 0.5	
<i>Arena media</i>	0.5 – 0.25	0.2 – 0.02
<i>Arena fina</i>	0.25 – 0.10	
<i>Arena muy fina</i>	0.10 – 0.05	0.02 – 0.002
<i>Limo</i>	0.05 – 0.002	
<i>Arcilla</i>	<0.002	< 0.002

Esta variación en el tamaño de las partículas es muy importante ya que la proporción de arenas, limos y arcillas en el suelo determina la textura del suelo.

Para mostrar la clasificación de los suelos en función de su textura es común utilizar el diagrama piramidal de composición de suelos el cual se muestra en la Figura 13 (USDA, 2010). En este tipo de diagramas triangulares, al conocer las distribuciones porcentuales de arcilla, limo y arena se puede definir entonces el tipo de suelo del que se trate.

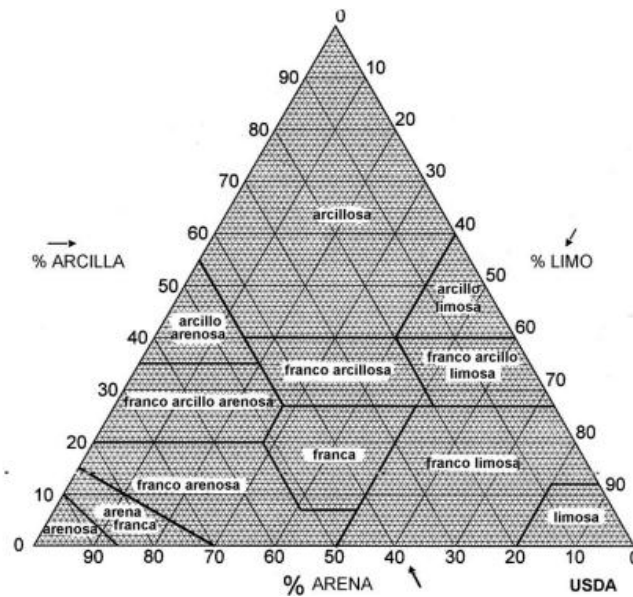


Figura 13 Diagrama de clases de textura de suelos (USDA, 2010).

Las texturas arcillosas dan suelos plásticos y difíciles de trabajar. Retienen gran cantidad de agua y de nutrientes debido a la microporosidad y a su elevada capacidad de intercambio catiónico. Aunque retengan agua en cantidad presentan una permeabilidad baja, salvo que estén bien estructurados y formen un buen sistema de grietas.

La textura arenosa es la contrapuesta a la arcillosa, pues cuando en superficie hay una textura arenosa, los suelos se conocen como ligeros dada su escasa plasticidad y facilidad de trabajo. Presenta una excelente aireación debido a que las partículas dominantes de gran tamaño facilitan la penetración del aire. Únicamente cuando se producen lluvias intensas se puede producir encharcamiento o escorrentía, momento en el que la erosión laminar es muy importante. La acumulación de materia orgánica es mínima y el lavado de los elementos minerales es elevado.

La textura limosa presenta carencia de propiedades coloidales formadoras de estructura, formando suelos que se apelmazan con facilidad impidiendo la aireación y la circulación del agua. Es fácil la formación de costras superficiales que impiden la emergencia de las plántulas.

Las texturas francas o equilibradas, al tener un mayor equilibrio entre sus componentes, gozan de los efectos favorables de las anteriores sin sufrir sus defectos, el estado ideal sería la textura franca.

Estas características de textura de suelo son muy importantes a tomar en cuenta para los casos en que se presenta una contaminación, esto para seleccionar la tecnología de remediación más adecuada y también para evaluar los riesgos de contaminación de otros compartimientos ambientales y para evaluar los riesgos a la salud.



El pH afecta la solubilidad y disponibilidad de macro y micro-nutrientes, la movilidad de metales y la reactividad de minerales; la actividad y crecimiento microbianos son fuertemente afectados por el pH. La mayoría de las bacterias tienen un intervalo óptimo de 6.5 a 8.5, si el suelo es ácido se favorece el crecimiento de hongos (INECC, 2007).

El potencial redox mide la oxidación relativa de una solución acuosa y normalmente se encuentra controlado por el contenido de humedad del suelo. En ambientes anaerobios (ambiente reductor), los metales precipitan debido a la presencia de iones ferrosos y carbonatos, en cambio, bajo condiciones oxidantes, los metales se hacen más solubles (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).

La permeabilidad se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías *in situ*. En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación (Velasco Trejo & Volke Sepúlveda, 2002).

2.1.3. Efectos de la Contaminación en el Suelo

La contaminación de un suelo puede provocar entre otras, las afectaciones mostradas en la Figura 14:



Figura 14 Efecto de la contaminación en el suelo.

Ante una emergencia producida por un vertido accidental, es imprescindible un tiempo de respuesta rápido que lleve al control de la situación en el menor tiempo posible. Para garantizar la completa descontaminación hay que mantener un control de la zona afectada, para ello se realizan inspecciones visuales y tomas de muestras que lo verifiquen.



2.2. *LEGISLACIÓN AMBIENTAL EN MATERIA DE SUELOS*

En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su Artículo 4to. (Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación –DOF- el 07-07-14), el cual se reproduce más adelante, se establece que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar; el ambiente sano por supuesto se puede trasladar a una situación de suelos sin contaminación.

“Toda persona tiene derecho a la protección de la salud. La Ley definirá las bases y modalidades para el acceso a los servicios de salud y establecerá la concurrencia de la Federación y las entidades federativas en materia de salubridad general, conforme a lo que dispone la fracción XVI del artículo 73 de esta Constitución.

Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.”

La legislación ambiental en México, en materia de sitios contaminación de suelos, es muy reciente. Es hasta la publicación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) el 28 de enero de 1988 que se tiene entonces un instrumento legal en el cual se establecen disposiciones para la prevención y control de la contaminación del suelo. Adicionalmente, la Ley General de Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR, 2003), vino a fortalecer el marco jurídico mexicano en cuanto responsabilidad acerca de la contaminación y remediación de sitios (Capítulo VI). A continuación se presentan algunos extractos de los artículos más relevantes de estas dos leyes.



2.2.1. *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)*

En el Capítulo IV de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (Última reforma publicada DOF 09-01-2015), los artículos 134 a 144 hacen referencia a disposiciones para la prevención y control de la contaminación del suelo: No obstante lo anterior, se destaca lo contenido en los artículos 134, 136, 139. Son también de destacarse los artículos 152 bis, y 171 que se encuentran en el Capítulo VI de Materiales y Residuos Peligrosos. Estos se resumen en la Figura 15.

Artículo 134

- En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable

Artículo 136

- Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:
 - I. La contaminación del suelo.
 - II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos.
 - III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación.
 - IV. Riesgos y problemas de salud.

Artículo 139

- Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

Artículo 152 Bis.

- Cuando la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos, produzca contaminación del suelo, los responsables de dichas operaciones deberán llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano, para el predio o zona respectiva.

Artículo 171

- Establece que al momento de ser vencido el plazo concedido por la autoridad para subsanar la infracción que se hubiere cometido, resultara que dicha infracción aún subsiste, podrán imponerse multas por cada día que transcurra sin obedecer el mandato de (50,000 SMGVDF).
- En el caso de reincidencia, el monto de la multa podrá ser hasta por tres veces del monto originalmente impuesto, así como la clausura definitiva.

Figura 15 Artículos de la LGEEPA relacionados en tema de suelos contaminados (LGEEPA, 2014).



2.2.2. *Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*

La *Ley General de Prevención y Gestión Integral de Residuos*¹ define a un sitio contaminado como “Lugar, espacio, suelo, agua, instalación o cualquier combinación de éstos, que ha sido contaminado con materiales o residuos, que por sus cantidades y características, puede representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes y propiedades de las personas” (LGPGIR, 2014).

Dicha ley también define la caracterización de sitios contaminados como “la determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes químicos o biológicos presentes, provenientes de materiales o residuos peligrosos, para estimar la magnitud y tipo de riesgos que conlleva dicha contaminación” (LGPGIR, 2014).

Mediante la determinación cuantitativa de los contaminantes se obtiene la información necesaria para valorar la extensión de la contaminación. Los estudios de caracterización también son utilizados para definir la responsabilidad por la reparación de daños.

El concepto de remediación se define en la LGPGIR como el conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos, de conformidad con lo que se establece en esta Ley (LGPGIR, 2014).

En la Figura 16 se presentan extractos de los artículos de la LGPGIR que aplican para el caso de sitios contaminados con hidrocarburos.

Artículo 68 y 69

- Estos artículos establecen que quienes resulten responsables de la contaminación de un sitio, así como de daños a la salud como consecuencia de ésta, estarán obligados a reparar el daño causado, conforme a las disposiciones legales correspondientes.
- Toda persona física o moral que, directa o indirectamente, contamine un sitio u ocasione un daño o afectación al ambiente como resultado de la generación, manejo o liberación, descarga, infiltración o incorporación de materiales o residuos peligrosos al ambiente, será responsable y estará obligada a su reparación y, en su caso, a la compensación correspondiente, de conformidad a lo previsto por la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.

Artículo 77

- Indica que las acciones en materia de remediación de sitios, y de reparación y compensación de daños ocasionados al ambiente, se llevarán a cabo de conformidad con lo que señale el Reglamento, y a lo previsto por la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.

¹ Primera publicación en 2003



Artículo 79

- La regulación del uso del suelo y los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano, deberán ser considerados al determinar el grado de remediación de sitios contaminados con residuos peligrosos, con base en los riesgos que deberán evitarse.

Artículo 112

- Establece que será motivo de Clausura el hecho de que no se cumplan con las condiciones, medidas correctivas o de urgente aplicación. "Reincidencia" al realizar acciones que tengan efectos negativos al ambiente. Así como "Desobediencia reiterada" esto es 3 o más ocasiones respecto a medidas correctivas o de urgente aplicación. Así mismo será motivo de Arresto Administrativo, suspensión o revocación de concesiones, permisos o autorizaciones, multas por el equivalente de veinte a cincuenta mil días de salario mínimo general vigente en el D.F. al momento de imponer la sanción. El hecho de no proceder con la debida remediación de estos sitios contaminados.

Figura 16 Artículos de la LGPGIR en materia de suelos contaminados con hidrocarburos (LGPGIR, 2014).

2.2.3. Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA)

Esta nueva Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA), texto vigente a partir del 7 de julio de 2013, tiene por objeto la protección, preservación y restauración del ambiente y el equilibrio ecológico, para garantizar el derecho humano a un medio ambiente sano para el desarrollo y bienestar de toda persona, y la responsabilidad generada por el daño y el deterioro ambiental.

Este nuevo procedimiento establece la posibilidad que cualquier habitante de una comunidad adyacente al daño ó ONG, en representación de algún habitante de una comunidad, PROFEPA, o agencias ambientales estatales junto con ésta pueda ejercitar esta acción en contra de quien consideren responsable un daño ambiental al ejercitar una acción u omisión.

La LFRA contempla también la responsabilidad ambiental objetiva que es aquella que no se requiere un despliegue de conducta u omisión, sino que opera casi en forma automática cuando el daño al ambiente devenga directa o indirectamente (toma clandestina-acción de un tercero) del manejo de materiales peligrosos o por la simple realización de una actividad altamente riesgosa (transporte por ducto).

La LFRA establece que deben cumplirse de manera obligatoria el reparar los daños al restituir al estado base el suelo impactado con hidrocarburo mediante la remediación (art. 13) y cuando no sea factible la compensación (LFRA, 2013).

La LFRA define los conceptos de dolo e ilicitud como una conducta activa u omisiva en contravención a las leyes, reglamento y normas oficiales mexicanas. Aquel que conoce que su actuación u omisión genera un daño o un incremento del daño o una posibilidad pero aun así lo acepta (arts. 10,24 y 54 LFRA). Esto por ejemplo, al



momento de no proceder a la adecuada remediación, no se genera pruebas de su intención de remediar (LFRA, 2013).

La actuación dolosa e ilícita es trascendente por la procedencia automática de sanción económica a personas morales de aprox. 43 millones de pesos (arts. 11 y 19 LFRA) (LFRA, 2013).

Por ende la falta de remediación implica una conducta ilícita, y es dolosa porque se sabe que al no atenderlo esta contaminación puede generar más daño, y aun así no desplegó todas las conductas para hacerlo o evitarlo. La PROFEPA lo prueba con los procedimientos administrativos ya que ésta tiene conocimiento de todos los derrames por los avisos, cuenta con los procedimientos que acreditan el incumplimiento de medidas (caracterización y remediación) y los tiempos de atraso.

Artículo 414

- Se impondrá pena de 1 a 9 años de prisión y de 300 a 3,000 días multa al que ilícitamente, o sin aplicar las medidas de prevención o seguridad, realice actividades de producción, almacenamiento, tráfico, importación o exportación, transporte, abandono, desecho, descarga, o realice cualquier otra actividad con sustancias consideradas peligrosas por sus características *CRETIB* y otras análogas, lo ordene o autorice, que cause un daño a los recursos naturales, a la flora, a la fauna, a los ecosistemas, a la calidad del agua, al suelo, al subsuelo o al ambiente.

Artículo 420 Quater

- Se impondrá pena de 1 a 4 años de prisión y de 300 a 3,000 días multa aquíén:
- Transporte o consienta, autorice u ordene que se transporten, cualquier residuo considerado como peligroso a un destino para el que no se tenga autorización para recibirlo, almacenarlo, desecharlo o abandonarlo.
- Asiente datos falsos en los registros, bitácoras o cualquier otro documento utilizado con el propósito de simular el cumplimiento de las obligaciones derivadas de la normatividad ambiental federal.
- Destruya, altere u oculte información que se requiera mantener o archivar de conformidad a la normatividad ambiental federal.
- Prestando sus servicios como auditor técnico, especialista o perito o especialista en materia de impacto ambiental, faltare a la verdad provocando que se cause un daño a los recursos naturales o al ambiente.
- No realice o cumpla las medidas técnicas, correctivas o de seguridad necesarias para evitar un daño o riesgo ambiental que la autoridad administrativa o judicial le ordene o imponga.

Artículo 421

- Se impondrán las siguientes penas y medidas de seguridad:
- La reparación y en su caso la compensación del daño al ambiente, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.
- Inhabilitación, cuando el autor o partícipe del delito tenga la calidad de servidor público, hasta por un tiempo igual al que se le hubiera fijado como pena privativa de libertad.

Artículo 422

- En el caso de los delitos contra el ambiente, cuando el autor o partícipe tenga la calidad de garante respecto de los bienes tutelados, la pena de prisión se aumentará hasta en tres años.

Figura 17 Artículos de la Reforma al Código Penal en Materia de Delitos Federales Contra el Ambiente y la Gestión Ambiental en materia de suelos contaminados con hidrocarburos (LFRA, 2009).



A continuación se listan las normas y reglamentos aplicables a la contaminación en suelos, así como los lineamientos para caracterización y muestreo.

2.2.4. *NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012*

Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación (SEMARNAT-SSA1, 2013). Establece los límites máximos permisibles de los hidrocarburos en suelos, incluidos en la Tabla 3 y los lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación en la Tabla 4.

Tabla 3 Método para establecer los límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (SEMARNAT-SSA1, 2013).

ANÁLISIS	MÉTODO	MÉTODO
<i>Fracción ligera</i>	EPA 8015	NMX-AA-105-SCFI-2008
<i>Fracción Media</i>		NMX-AA-145-SCFI-2008
<i>Fracción Pesada</i>	EPA 9071 y EPA 1664	NMX-AA-134-SCFI-2006
<i>HAP's</i>	EPA 8310 / EPA 8260	NMX-AA-146-SCFI-2008
<i>BTEX</i>	EPA 8260 / EPA 8021	NMX-AA-141-SCFI-2007

NOTAS:

BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) HAP's (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) Fracción Ligera: mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre 5 y 10 átomos de Carbono (C5 a C10).

Fracción Media: mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre 10 y 28 átomos de Carbono (C10 a C28).

Fracción Pesada: mezcla de hidrocarburos cuyo peso molecular sea mayor a C18.

Tabla 4 Métodos Analíticos para establecer los límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (SEMARNAT-SSA1, 2013, 2013).

TIPO DE HIDROCARBURO	NORMA OFICIAL MEXICANA	MÉTODO DE ANÁLISIS
<i>BTEX</i>	NMX-AA-141-SCFI-2007	Suelos-Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos (BTEX) por Cromatografía de Gases con Detectores de Espectrometría de Masas y Fotoionización.
<i>FRACCIÓN LIGERA</i>	NMX-AA-105-SCFI-2008	Suelos - Hidrocarburos Fracción Ligera por Cromatografía de Gases con Detectores de Ionización de Flama o Espectrometría de Masas.
<i>FRACCIÓN MEDIA</i>	NMX-AA-145-SCFI-2008	Suelos-Hidrocarburos fracción media por cromatografía de gases con detector de ionización de flama.
<i>HAP'S</i>	NMX-AA-146-SCFI-2008	Suelos-Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) por cromatografía de gases/espectrometría de masas (CG/EM) o cromatografía de líquidos de alta resolución, con detectores de fluorescencia y ultravioleta visible (UV-VIS).

La norma NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 no menciona nada sobre sedimentos o rocas y mucho menos sobre medios fracturados



2.2.5. *NOM-060-SEMARNAT-1994*

Establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua (SEMARNAT, 2003).

2.2.6. *NOM-021-SEMARNAT-2000*

Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (SEMARNAT, 2002). La presente norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y tiene por objetivo establecer las especificaciones técnicas de muestreo y análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, a partir de sus características específicas de constitución, formación y distribución.

2.2.7. *Normas Mexicanas en Materia de Contaminación de Suelos*

En materia de suelos contaminados con hidrocarburos, las normas mexicanas aplicables se muestran en la Figura 18:

NMX-AA-146-SCFI-2008

Suelos-hidrocarburos aromáticos policíclicos (hap) por cromatografía de gases/espectrometría de masas (CG/EM) o cromatografía de líquidos de alta resolución con detectores de fluorescencia y ultravioleta visible (UV-Vis) método de prueba.

- Esta norma mexicana comprende los métodos para el análisis de los hidrocarburos aromáticos policíclicos a través de la Cromatografía de Gases con Espectrometría de masas con base en el método EPA 8270C o, EPA 8310.

NMX-AA-019-1985

Protección al ambiente - contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - peso volumétrico "*IN SITU*" (Cancela a la NMX-AA-19-1975) Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

- Esta Norma Oficial Mexicana, establece un método para determinar el peso volumétrico de los residuos sólidos municipales en el lugar donde se efectuó la operación de "cuarteo".

NMX-AA-025-1984

Protección al ambiente contaminación del suelo residuos sólidos determinación del pH - método potenciométrico.
(Cancela a la NMX-AA-25-1975)

- La presente norma establece el método potenciométrico para la determinación del valor del pH en los residuos sólidos. El cual se basa en la actividad de los iones hidrógeno presentes en una solución acuosa de residuos sólidos al 10%.

Figura 18 Normas Oficiales Mexicanas Aplicables en Materia de Suelos (SEMARNAT, 2012).



3. METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN Y REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

En el presente apartado se desarrolla la metodología ilustrada en el Diagrama 1 con la cual se debe de llevar a cabo el muestreo para la caracterización y la remediación de sitios contaminados con hidrocarburos, ya sean emergencias ambientales o pasivos ambientales.

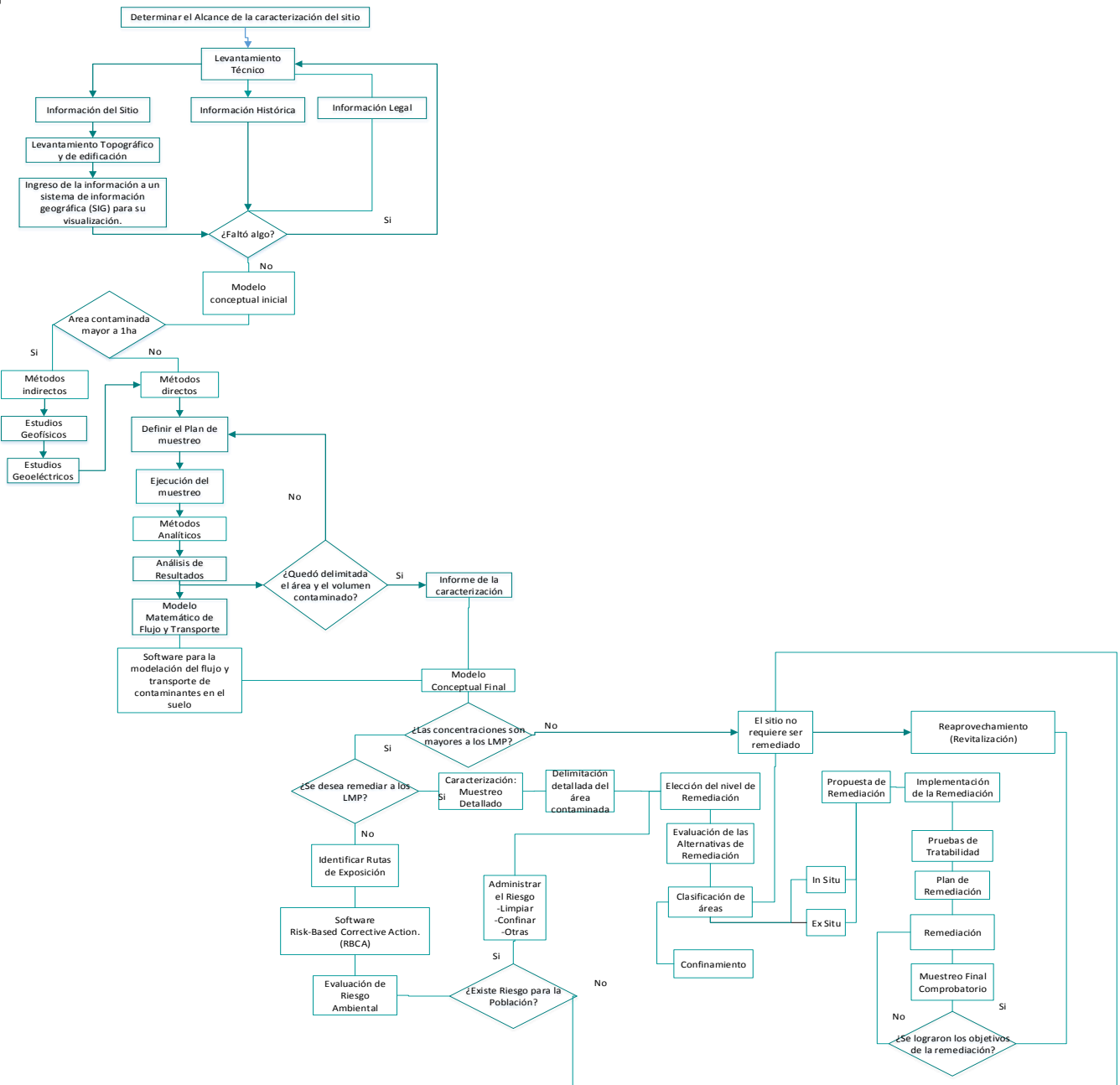


Diagrama 1 Diagrama General para la Caracterización y Remediación de Sitios Contaminados.



3.1. EMERGENCIAS DE CONTAMINACIÓN DE SITIO

Ante una emergencia es sumamente importante tener muy claros los siguientes aspectos, los cuales son de gran ayuda ya que permiten a las diferentes instancias involucradas trabajar juntos de manera efectiva en respuesta a una emergencia.

Proporcionar una estructura organizativa y un lenguaje común para facilitar la comunicación entre los que responden a una emergencia establece las líneas claras de autoridad y mando.

Los siguientes puntos, establecidos en la Figura 19 se deben de definir con especial atención para atender eficientemente una emergencia.

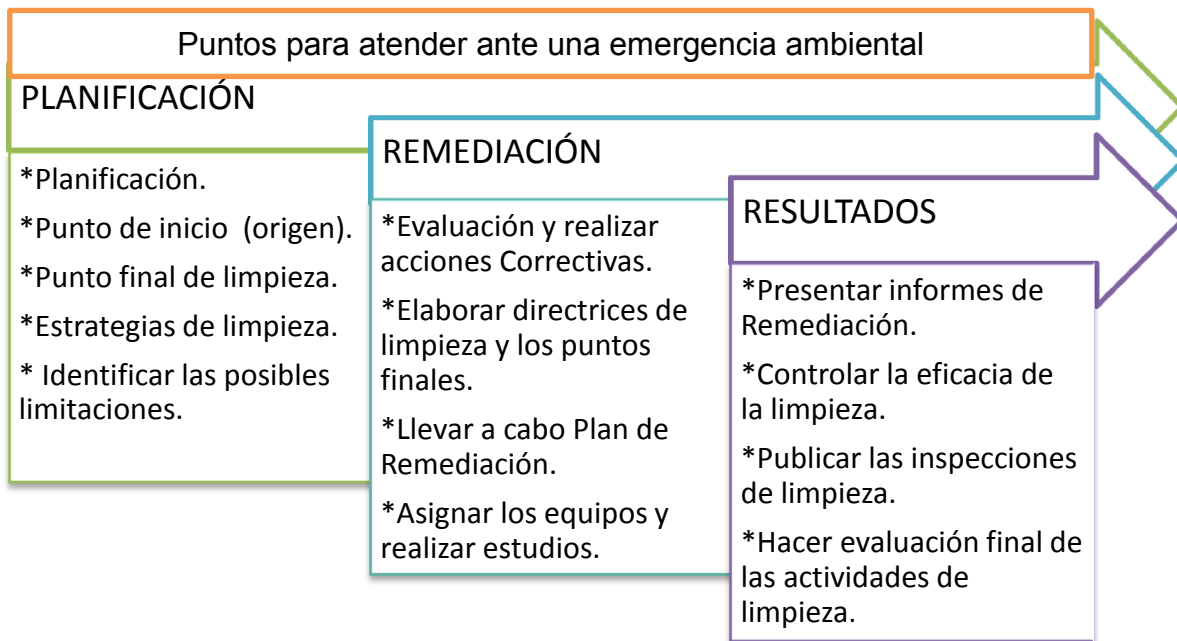


Figura 19 Puntos para atender una emergencia.

3.2. PASIVO AMBIENTAL

Se considera pasivo ambiental a aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. En esta definición se incluye la contaminación generada por una emergencia que tenga efectos a largo plazo sobre el medio ambiente (LGPGIR, 2014).



3.3. ETAPAS DE LA EVALUACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

Los criterios generales a ser considerados en la caracterización de un sitio contaminado planteados en la LGPGIR y su Reglamento son: “La caracterización debe permitir la cuantificación de la extensión de la contaminación y volumen de suelos y materiales contaminados y debe permitir la determinación de la exposición, de los riesgos y de los daños ocurridos a consecuencia de la misma” (LGPGIR, 2014).

En general el estudio de caracterización debe especificar:

- ✓ Características de las fuentes de contaminación
 - Tipo de contaminante
 - Características geohidrológicas del suelo
 - Volumen de suelo a remediar
 - Concentraciones
 - Uso de suelo
 - Antigüedad del producto
- ✓ Delimitación en tiempo y espacio de la(s) mancha(s) contaminantes.
- ✓ Las posibles rutas de exposición.
- ✓ Impactos a la salud
- ✓ Los antecedentes del sitio y posibles fuentes de los contaminantes (fotos aéreas históricas proporcionan información valiosa).

Una caracterización precisa, es la base de la taxonomía y permite la comunicación correcta de conceptos precisos. Al contar un una mejor caracterización se tendrá un resultado más exitoso de remediación. En la 20 se muestran las etapas de la Evaluación de sitios contaminados.

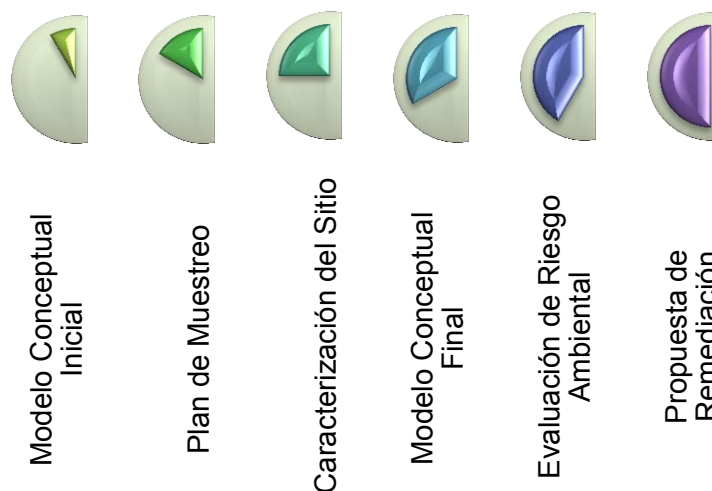


Figura 20 Etapas de la Evaluación de sitios contaminados (Hernandez & Sánchez, 2011).



Con base en lo anterior, se elaboró el Diagrama 2 el cual ilustra la estrategia de caracterización.

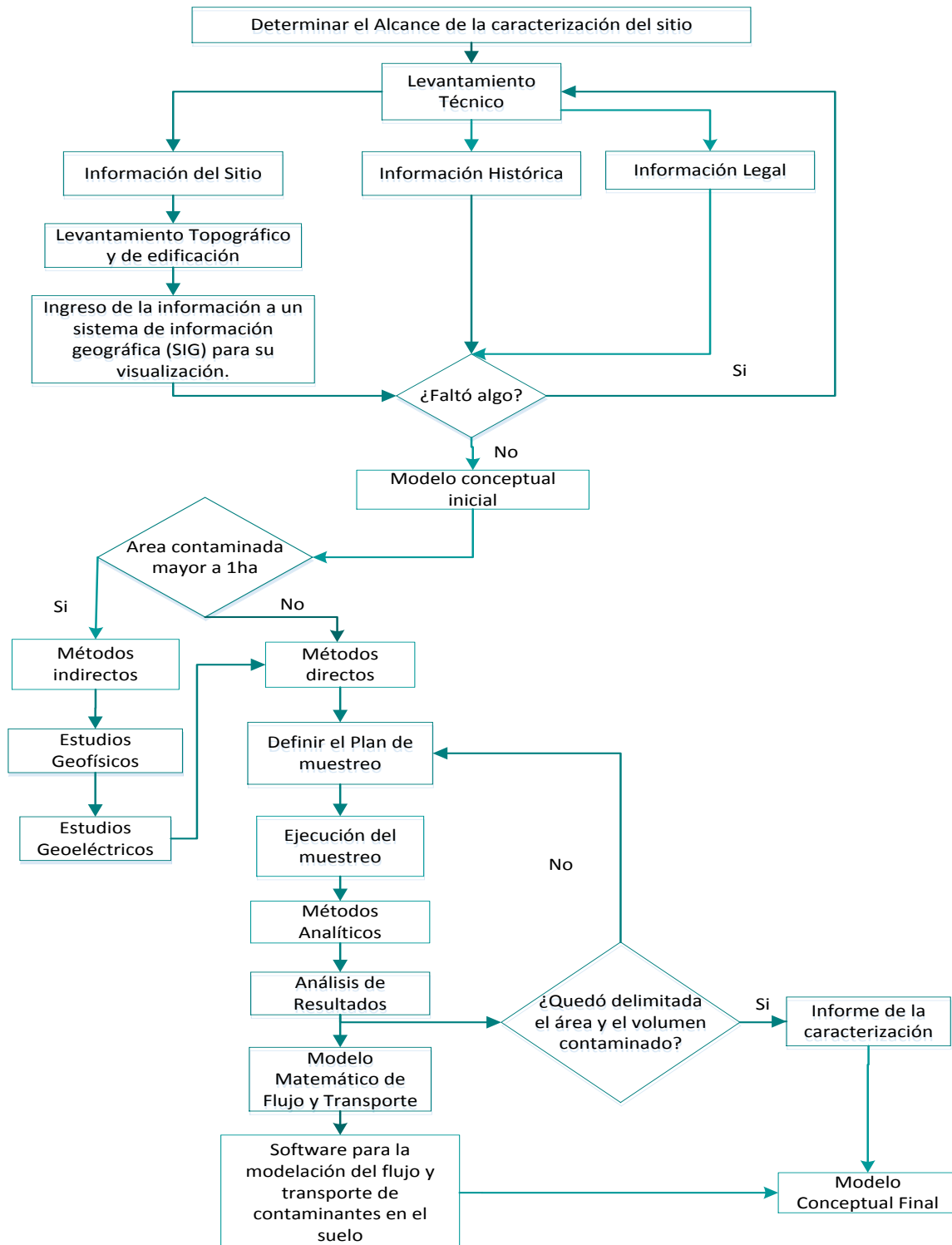


Diagrama 2 Estrategia de Caracterización.



3.3.1. Definición del Alcance

Primeramente se debe definir el Alcance del estudio de caracterización, lo cual puede involucrar los siguientes aspectos:

- a) Verificar que no queda contaminación en un sitio de excavación,
- b) Definir el área y volumen de suelo a remediar de un sitio,
- c) Definir las bases de un estudio de evaluación de riesgo ambiental.
- d) Definir las bases de un proyecto de reutilización del sitio.

En muchos casos la situación legal del sitio determina el alcance de la caracterización, lo cual se resume en la Tabla 5.

Tabla 5 Alcance de la Caracterización según la finalidad del proyecto (SEMARNAT, 2010).

Finalidad del proyecto	Alcance de la caracterización
<i>Remediar el sitio con base sólo en el estudio de caracterización para alcanzar los Límites Máximos Permisibles de las NOM's.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar tipo de contaminante, área y volumen contaminado. 3. Proporcionar la base técnica para elaborar la propuesta de remediación, determinar las acciones de remediación y el proceso de tratamiento a aplicar y el programa de muestreo final comprobatorio para mostrar que se alcanzaron los Límites Máximos Permisibles de las NOM's. 4. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio.
<i>Verificar que el/los socavón(es) se encuentren libres de contaminación.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar que no quedan contaminantes en el área de excavación. 3. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio.
<i>Remediar el sitio con base en un estudio de evaluación de riesgo ambiental.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar tipo de contaminante, área y volumen contaminado. 3. Proporcionar la base técnica para evaluar la exposición, determinar los riesgos y definir Niveles de Remediación Específicos del sitio. 4. Proporcionar la base técnica para elaborar la propuesta de remediación, determinar las acciones de remediación, el proceso de tratamiento a aplicar y como comprobar finalmente que se alcanzaron los Límites Máximos Permisibles de las NOM's. 5. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio
<i>Remediar y reutilizar el sitio con base en un estudio de evaluación de riesgo ambiental.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar tipo de contaminante, área y volumen contaminado. 3. Proporcionar la base técnica para evaluar la exposición, determinar los riesgos y definir Niveles de Remediación Específicos del sitio. 4. Proporcionar la base técnica para elaborar la propuesta de remediación, determinar las acciones de remediación, el proceso de tratamiento a aplicar y como comprobar finalmente que se alcanzaron los Límites Máximos Permisibles de las NOM's. 5. Definir el uso de las distintas áreas del sitio de acuerdo con los riesgos y las acciones de remediación a ejecutar. 6. Concordancia de la remediación con el proyecto arquitectónico de reutilización del sitio. 7. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio.



3.3.2. Levantamiento Técnico

Una vez bien definido el alcance, se procederá al levantamiento técnico de sitio en el cual se desarrollan las actividades preliminares a las etapas de caracterización; es decir, antes de realizar muestreos. Esta primera etapa es fundamental en la evaluación de sitios contaminados, ya que es donde se establece el Modelo Conceptual Inicial con el que se fundamenta el Plan de Muestreo.

En el Levantamiento Técnico, se realiza una inspección al sitio y se recopila la información mencionada en la Tabla 6.

Tabla 6 Información Recopilada Necesaria para el Levantamiento Técnico (Hernandez & Sánchez, 2011).

Información del sitio	Información histórica	Información legal
<p><i>Del medio</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Cartografía temática</i> ▪ <i>Estudios específicos de la región, del predio</i> ▪ <i>Uso de suelo actual</i> ▪ <i>Mecánica de suelos</i> ▪ <i>Topografía</i> ▪ <i>Geofísica</i> ▪ <i>Caracterizaciones</i> ▪ <i>Remediaciones</i> ▪ <i>Procesos</i> ▪ <i>Materia prima, productos, subproductos, residuos</i> ▪ <i>Sitios de disposición y descargas.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usos históricos del suelo ▪ Procesos, materia prima, productos, subproductos, residuos ▪ Sitios de disposición y descargas ▪ Informes a la autoridad ▪ Histogramas de fugas ▪ Edad y mantenimiento de instalaciones ▪ Procedimientos administrativos ▪ Notas periodísticas ▪ Entrevistas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planes de Desarrollo ▪ Título de Propiedad ▪ Contratos de arrendamiento ▪ Concesiones ▪ Cambios de uso de suelo ▪ Procedimientos Administrativos <p>En general:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelo geológico • Modelo hidrogeológico • Fuentes de contaminación. • Tipos de contaminantes • Puntos de exposición • Receptores

Características geológicas

Se debe determinar las características geológicas que influyen en la migración en el subsuelo de compuestos orgánicos como los hidrocarburos, siendo la principal la estructura de los poros.

La presencia de discontinuidades como fracturas, fallas o heterogeneidad en la litología afecta la estructura de los poros del medio geológico y por ende el flujo de agua y transporte de los compuestos orgánicos, por lo tanto uno de los objetivos de los métodos geológicos es la determinación de la presencia de estas discontinuidades y heterogeneidades en dichos medios.

Las características que se deben determinar se muestran en la Figura 21:

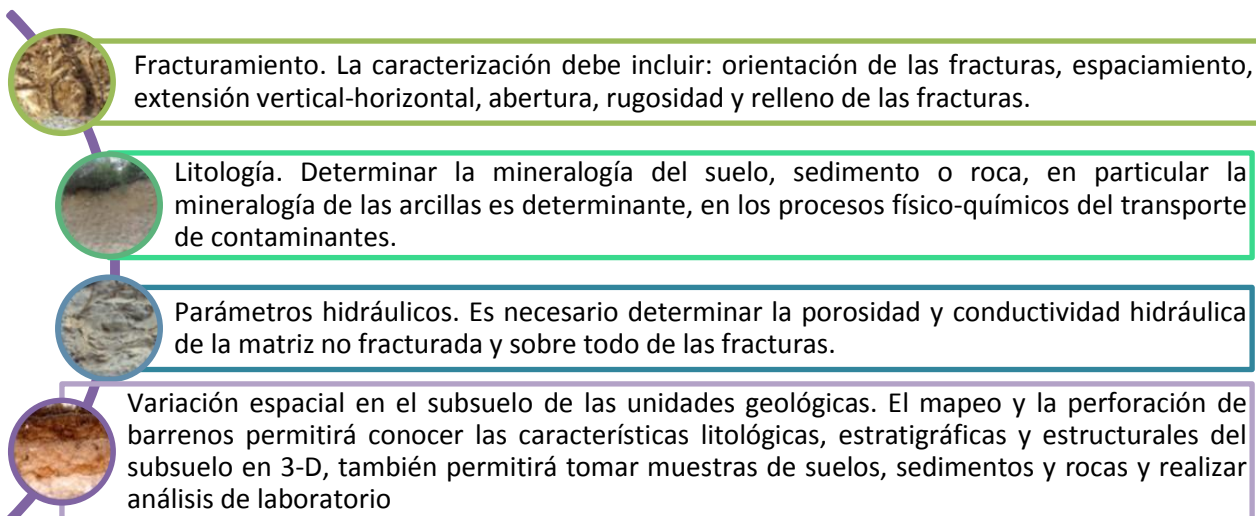


Figura 21 Características a determinar en el levantamiento topográfico.

En la inspección al sitio se realizan las actividades mencionadas en la Tabla 7.

Tabla 7 Actividades Correspondientes a la inspección del sitio (Hernandez & Sánchez, 2011).

Características naturales del sitio	Fuentes potenciales de contaminación	Infraestructura dentro del predio	Infraestructura circundante al predio
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Geológicas (estratigrafía, ambiente sedimentario)</i> • <i>Hidrogeológicas (aprovechamientos de agua, nivel estático, dirección de flujo subterráneo)</i> • <i>Hidrológicas (cuerpos de agua superficial)</i> • <i>Topográficas (relieve)</i> • <i>Vegetación (especies protegidas)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Fugas y derrames visibles • Zonas de tanques • Áreas de almacenamiento de sustancias y residuos • Drenajes • Zonas de carga y descarga • Áreas sin uso específico 	<ul style="list-style-type: none"> • Edificios • Bodegas • Talleres • Instalaciones subterráneas • Pozos • Límite físico del predio 	<ul style="list-style-type: none"> • Colindancias • Zonas habitacionales • Parques • Plazas • Canales • Pozos • Norias • Otros • Olores fuertes o picantes • Testimonios (entrevistas)

Con los cuales se generan mapas y bases de datos, estos se pueden representar por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), éste es un sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente. En este caso es de gran utilidad la plataforma ArcGIS, ya que es una infraestructura para crear mapas, organizar datos geográficos y así con esto, la identificación de patrones del suelo. (ArcGIS, 2015).



3.3.3. Modelo Conceptual Final

Una vez analizada toda la información se realiza un modelo conceptual. Este es el resultado de un esfuerzo de equipo, basado en información y datos sólidos. El modelo conceptual final incluirá la descripción gráfica, esquemática y escrita de la relación entre la fuente de la contaminación y los receptores vulnerables potenciales.

Este modelo da lugar a identificar los métodos directos como lo son: Perforación para muestreo de suelos, perforación e instalación de pozos de monitoreo, piezómetros o pozos multinivel de la zona saturada.

Así como también métodos indirectos que son factibles tales como: Métodos Geofísicos, estos métodos pueden dar información sin hacer una perforación de altos costos. Existen varios métodos geofísicos los cuales aprovechan propiedades físicas de las rocas. Como las que se muestran en la Figura 22

	<p>Método de Resistividad Eléctrica.</p> <p>Los métodos eléctricos se basan en la medición de las propiedades eléctricas del subsuelo. Todos los materiales de la Tierra oponen resistencia al flujo de la corriente eléctrica. Esta propiedad se llama resistividad geoelectrica, la cual permite diferenciar entre distintos materiales.</p>
	<p>Métodos magnéticos y gravimétricos.</p> <p>El objetivo principal de la gravimetría es medir anomalías en el campo gravitatorio de la Tierra causadas por cambios de densidad entre distintos materiales. Con este método se pueden detectar cavidades y caracterizar vertederos.</p>
	<p>Tomografías Geoelectricas.</p> <p>Se trata de un método de prospección geoelectrica consistente en la medición de resistividades aparentes de los materiales del subsuelo permitiendo obtener un perfil o pseudo sección en 2D (longitud x profundidad). Se utiliza para la detección de plumas de contaminación y caracterización de vertederos</p>
	<p>PID (Photo Ionization Detector).</p> <p>Mide los cambios de señal que generan los analitos cuando son ionizados por una lámpara de luz ultravioleta. Este genera una idea del grado de contaminación pudiendo detectar el nivel total de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), otros Hidrocarburos derivados del Petróleo y gases tóxicos (incluyendo hidrocarburos clorados).</p>
	<p>El Georadar o GPR.</p> <p>Es una avanzada tecnología no invasiva, es decir, sin la necesidad de perforaciones, permite obtener una imagen del subsuelo pudiendo localizar servicios enterrados, estructuras geológicas, problemas relacionados con la geotecnia, vestigios arqueológicos, y contaminación de suelos y aguas subterráneas.</p>
	<p>Gasometría.</p> <p>Mediciones de hidrocarburos volátiles a diferentes profundidades. La propiedad de volatilización es una herramienta de apoyo para detectar, mediante mediciones volátiles, la extensión del área contaminada</p>

Figura 22 Métodos geofísicos aplicables a la identificación de contaminantes en el suelo (UNICAUCA, 2009).



Los métodos geofísicos en sus diferentes modalidades son una valiosa herramienta que permite identificar cuerpos de rocas y materiales en el subsuelo, estos métodos se basan en detectar los contrastes entre rocas y otros materiales para con ello conocer su distribución y profundidad en el subsuelo. Mientras mayor contraste exista, mayor será la precisión de los resultados obtenidos. En un sitio contaminado con combustibles, donde los hidrocarburos se encuentran como volátiles y adsorbidos a las partículas del subsuelo, los contrastes existentes generalmente son muy reducidos, lo cual limita la aplicación de los métodos geofísicos como un método para la detección de la mancha de contaminación. Si a ellos se le suma que en el subsuelo se presentan los horizontes irregulares de arcillas intercaladas con arenas y mezclas de ambas en diferentes proporciones, la identificación de zonas contaminadas por hidrocarburos mediante geofísica deja de ser clara, consistente y concluyente (Lasser & Saval, 2004).

Estos métodos son aplicables cuando se tienen extensas áreas contaminadas, son de gran utilidad para delimitar de forma más precisa el área contaminada y así tener un eficiente plan de muestreo, y con esto una caracterización más precisa.

3.3.4. Plan de Muestreo

Una vez que se cuenta con toda esta información se procede a realizar el Plan de Muestreo el cual es un documento formal que sirve para programar en forma lógica y racional todas las actividades que están implícitas en un muestreo, incluyendo las especificaciones relacionadas con la toma de muestras. Su objetivo es dar certidumbre a la actividad propia del muestreo para garantizar la representatividad de las muestras y que a su vez los resultados de analíticos sean confiables (Saval Bohórquez, 2011).

En México, el plan de muestreo se ha convertido en un requisito indispensable para que la autoridad ambiental avale un estudio de caracterización, y para que expida la autorización de una remediación, esto, en virtud de que el marco regulatorio actual así lo establece.

Elementos que debe de contener el Plan de Muestreo

La información que este deberá contener este documento es la siguiente:

Localización del sitio

- ✓ Referir país, estado, municipio, poblado, dirección oficial, código postal, incluir planos acotados y/o imágenes satelitales.
- ✓ En la zona urbana, en alguna vía de comunicación, en una instalación industrial, bodega, taller, incluir planos de detalle de la instalación.
- ✓ Investigar el uso de suelo (oficial).



Vías de acceso al sitio

- ✓ Número y/o nombre de carreteras, calles, caminos, es conveniente incluir plano de carreteras y/o caminos o calles para llegar al sitio.

Localización geográfica del sitio

- ✓ Coordenadas UTM (X, Y, cuadrante, precisión), marca y modelo del aparato de medición. Verificar las coordenadas con planos oficiales y/o imágenes satelitales.

Delimitación de la zona de muestreo

- ✓ Coordenadas UTM (X, Y, cuadrante, precisión), marca y modelo del aparato de medición. Verificar las coordenadas con planos oficiales y/o acercamientos de imágenes satelitales.
- ✓ Plano acotado de la zona de estudio generado mediante un levantamiento topográfico (incluir detalles de referencia según tipo de instalación).
- ✓ Pendiente(s) en la zona de muestreo.
- ✓ Trazo del polígono a estudiar, referir coordenadas.

Motivo del muestreo

Estos pueden ser:

- Investigación voluntaria (cumplimiento ambiental).
- Actualización de un estudio previo.
- Observación de una auditoría ambiental.
- Posterior a una emergencia ambiental.
- Por compra de terreno.
- Al inicio de un tratamiento en el sitio o sobre el sitio.
- Muestreos intermedios para conocer el avance de la remediación.
- Muestreo final comprobatorio en una celda de tratamiento.

Tipo de muestreo

- Muestreo exploratorio.
- Muestreo de detalle.
- Muestreo único.
- Muestreo de fondo.
- Muestreo de aseguramiento de la calidad (duplicado, blanco).
- En la mancha de contaminación (avances de remediación en el sitio).

Parámetros a estudiar

(Hidrocarburos).

Norma de referencia para el muestreo

NOM 138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Matriz de las muestras

- Suelo.



- Agua freática (manto cercano a la superficie).
- Agua subterránea (que pertenece al acuífero de abastecimiento).
- Sedimentos.
- Cuerpos de agua superficiales.
- En casos críticos de contaminación será necesario incluir flora y fauna que está siendo afectada.

Distribución de puntos de muestreo

- ✓ Estrategia aplicada a la distribución de los puntos del muestreo así como patrón de muestreo.

Algunos métodos para elegir el patrón de muestreo más conveniente son:

- *Muestreo dirigido o a juicio del experto*

Si se tiene información previa del sitio (por documentos o por inspecciones visuales del sitio), es posible llevar a cabo un muestreo y análisis dirigido en determinados puntos para contaminantes específicos.

La selección de los puntos de muestreo, así como las profundidades a las cuales se toman las muestras se basa en el criterio personal, en las indicaciones de las normas vigentes y en la experiencia del profesional encargado de esta tarea.

- *Muestreo estadístico*

Este tipo de muestreo se basa en la teoría de probabilidades y siempre requiere de un análisis estadístico. Se utiliza para comprobar de manera homogénea la presencia o ausencia de contaminantes en sitios considerados pasivos ambientales o abandonados.

- Aleatorio simple

Este tipo de muestreo es recomendable para áreas homogéneas menores a cinco hectáreas, delimitadas por referencias visibles a lo largo y ancho de toda la zona. Se caracteriza por permitir todas las combinaciones posibles de puntos de muestreo. Los puntos de muestreo se numeran en un plano cartesiano (Xi,Yj). La selección de éstos se realiza por medio de una tabla de números aleatorios lo cual garantiza que cada punto tenga la misma probabilidad de ser seleccionado.

- Aleatorio estratificado

En este tipo de muestreo la población se subdivide en estratos o subgrupos que tienen cierta homogeneidad en el terreno y en cada estrato se realiza un muestreo aleatorio simple (aleatorios en una rejilla regular o aleatorios desalineados en una rejilla regular), como se muestra en la Figura 23.



Figura 23 Ejemplo de Puntos de Muestreo Aleatorios (Saval Bohórquez, 2011).

Para evitar discrepancias y tomando como base que en el caso de suelos contaminados, la distribución de los contaminantes por naturaleza es heterogénea, debido principalmente a la heterogeneidad propia del suelo, se plantea utilizar patrones de muestreo, y dejar la parte estadística para definir el número de muestras, sólo en casos donde la normatividad aplicable pueda tener limitaciones.

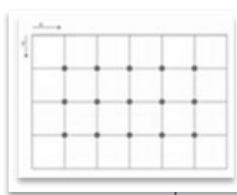
Patrones de muestreo

Los patrones de muestreo se refieren a las diferentes formas en las que se pueden distribuir los puntos de muestreo en el plano horizontal, para cada sitio en particular, conociendo sus características y el motivo del muestreo.

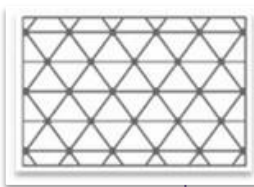
- Patrones de muestreo con distribución uniforme se muestran en la Figura 24



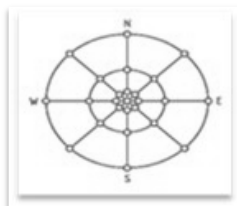
Patrón de Muestreo de rejillas regulares para punto de muestreo en el centro de cada celda.



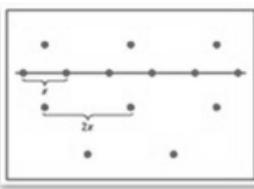
Patrón de Muestreo de Rejillas regulares para punto de muestreo en las intersecciones.



Patrón de Muestreo de Rejillas Triangulares.



Patrón de Muestreo de Rejillas circulares con círculos concéntricos a partir del centro.



Patrón de muestreo sobre una línea con una línea recta y puntos separados una distancia "x".



Patrón de muestreo de Diagonales Múltiples Paralelas con una diagonal central y líneas paralelas.

Figura 24 Patrones de Muestreo con distribución uniforme (Saval Bohórquez, 2011).



- Patrones de muestreo con distribución heterogénea se muestran en la Figura 25.

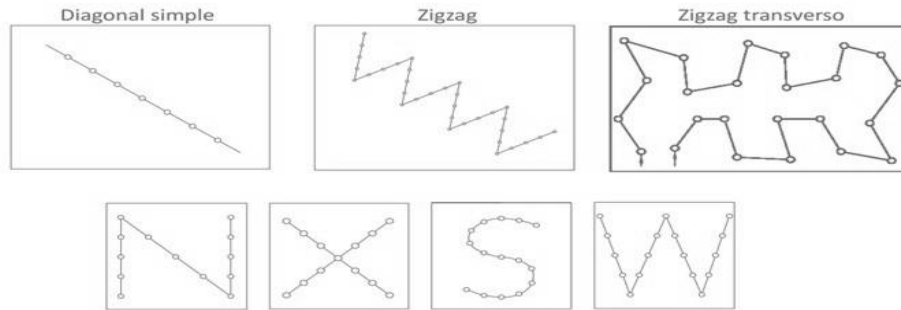


Figura 25 Ejemplos de Patrones de Muestreo con formas irregulares (Saval Bohórquez, 2011).

En la Tabla 8 se resumen los diferentes patrones de muestreo con relación a la información conocida.

Tabla 8 Patrones de Muestreo (Saval Bohórquez, 2011).

Resumen sobre patrones de muestreo	
<i>Quando no se conoce la distribución de contaminantes en el sitio, los patrones de muestreo recomendables son:</i>	
	Rejilla regular Rejilla triangular
<i>Quando se tiene previo conocimiento de la distribución de contaminantes en el sitio, los patrones de muestreo más recomendables son:</i>	
<i>Para contaminación puntual</i>	Sobre una línea (un caso de ductos) Rejilla circular
<i>Para contaminación distribuida de manera uniforme</i>	
	Rejilla regular Rejilla triangular Diagonales múltiples

Cualquiera que haya sido la estrategia aplicada, se deberá justificar la distribución de los puntos de muestreo.

Número de puntos de muestreo

Se refiere al número de puntos en el plano horizontal, de donde se tomarán muestras, se tienen dos opciones:

- ✓ Aplicando método estadístico.

Es necesario contar con información de estudios previos. En caso de que no existan antecedentes, se deberá realizar un muestreo preliminar que permita generar la información requerida.



En la Ecuación (1) se tiene lo siguiente:

- La concentración más alta “R” de los contaminantes de interés.
- La varianza “s” a partir de la “R” obtenida de estudios previos.

$$s^2 = (R/4)^2 \dots\dots\dots(1)$$

En la Ecuación (2) se tiene lo siguiente:

- El error estándar “D” que se va a permitir a la media de la población.
- El límite de confianza, que generalmente 95%.
- El número “t” que corresponden para la probabilidad del 95% de una distribución t de student, que arbitrariamente se define para 10 grados de libertad y se modifica por reiteración según el valor que se obtenga en un primer cálculo.

Cuando se tiene toda la información, se calcula el número de puntos de muestreo “n” mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{t^2 s^2}{D^2} \dots\dots\dots(2)$$

Se obtiene el valor de “n” en un primer cálculo y si éste es mucho más grande que los grados de libertad que se dieron inicialmente, por iteración se busca en la misma tabla de probabilidad una distribución t, el nuevo valor de “t” y con éste se repite el cálculo.

El número que se obtenga corresponde al número de puntos de muestreo que aplica para las condiciones previamente establecidas.

- ✓ Con base en las tablas incluidas en las normas según la superficie que ocupa la zona de estudio (NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012).

Una vez delimitada el área de afectación a través de un muestreo dirigido, se deben tomar como mínimo el número de puntos de muestreo establecido en la Tabla 9.

Tabla 9 Mínimo de Puntos de Muestreo (SEMARNAT-SSA1, 2013).

ÁREA CONTAMINADA (ha)	PUNTOS DE MUESTREO
Hasta 0.1	4
0.20	8
0.30	12
0.40	14
0.50	15
0.60	16
0.70	17
0.80	18
0.90	19
1.00	20
2.00	25
3.00	27
4.00	30



ÁREA CONTAMINADA (ha)	PUNTOS DE MUESTREO
5.00	33
10.00	38
15.00	40
20.00	45
30.00	50
40.00	53
50.00	55
100.00	60

A medida que se aumenta el número de muestras aumenta la exactitud y la precisión de la descripción de las condiciones de un sitio pero también aumentan los costos. En casos actuales de caracterización ha sido usual que se determine la necesidad de un número mayor de puntos de muestreo para obtener una buena representatividad y densidad de muestreo.

Localización de los puntos de muestreo

- ✓ Se deberá incluir un plano acotado donde estén marcados los puntos de muestreo, con la identificación que les será asignada, se sugiere que sea acorde con la identificación que se dará a las muestras.

Profundidad del muestreo

Es muy importante conocer la profundidad al nivel del agua antes de proceder al muestreo, esto debido a que:

- ✓ El límite de migración vertical de los hidrocarburos (combustibles destilados) es el nivel del agua, al alcanzarlo se inicia la migración horizontal según la dirección de flujo subterráneo.
- ✓ En otros casos la profundidad de muestreo se programa hasta donde se encuentra la roca.
- ✓ Se debe evitar contaminar el manto freático o el acuífero.

En la Figura 26 se muestra un ejemplo de la forma en la que fluye el hidrocarburo, tanto en la zona de embarramiento (suelo) como en manto freático.



Figura 26 Mecánica de Contaminación de suelos y cuerpos de agua (García Morales, Marzo 2013).



En los casos donde no cabe la posibilidad de afectación del agua subterránea se deberá llegar a la profundidad donde la concentración de los contaminantes esté por debajo de los límites máximos permisibles, es probable que se requieran dos etapas de muestreo.

Al mismo tiempo que se decide la profundidad del muestreo como se muestra en la Figura 27, también se deciden los intervalos de muestreo.



Figura 27 Ejemplo de la Medición de la Profundidad en el punto de muestreo (Jiménez, 2013).

Tipo de muestras

Según lo indicado en las normas, o bien, a juicio de experto, sin embargo la opción que se decida deberá estar bien justificada.

- ✓ Simples, para estudios de caracterización y remediaciones.
- ✓ Compuestas, sólo para algunos casos de remediación, por ejemplo, celdas de tratamiento, donde el suelo se voltea constantemente.

Equipo de muestreo de suelo

Será necesario hacer referencia al equipo de perforación a utilizar, incluyendo marca y modelo, además de describir su funcionamiento (si es manual o automático); referir paso a paso la manera como se obtienen los “núcleos de suelo” a partir de los cuales serán recuperadas las muestras para análisis.

Los dispositivos de muestreo de suelo deben escogerse luego de considerar la profundidad de la muestra a tomarse, las características del suelo, el contenido de humedad, la textura, por mencionar aspectos principales, así como la naturaleza del análisis de interés (por ejemplo, orgánico o inorgánico, volátil o no volátil) y del tipo de muestra que se necesita ya sea superficial o sub-superficial (Ministerio de Energía y Minas, 2000).

Sin embargo es importante considerar que el muestreador seleccionado debe minimizar la contaminación de la muestra, por lo que se recomienda usar muestreadores simples de acero inoxidable con teflón. Algunos de los dispositivos más usados en la toma de sedimentos son; la draga *Van Veen*, los nucleadores, y *espátula de plástico, pala o cucharón*.

En la Figura 28 se muestran algunos equipos utilizados para el muestreo:



"Pala o Cucharón" Generalmente se utilizan en muestreos superficiales en cualquier tipo de suelo o bien para homogenizar las muestras.

"Hand Auger" Es el muestreador más aplicado con el cual se realiza el muestreo en los puntos y a las profundidades establecidas en el plan de muestreo.



"Perforadora Rotatoria" La perforadora rotatoria se utiliza cuando no es posible perforar con el Hand Auger.

"Tubo Partido" El tubo partido se utiliza en suelos arcillosos o conglomerados (suelos compuestos de fragmentos de roca) . Aplica en suelos arenosos y arcillosos y se utiliza con un sistema de muestreo de empuje o percusión.



Figura 28 Equipos utilizados para el muestreo (Jiménez, 2013).

También se pueden utilizar muestreadores como: perforadores manuales, muestreadores de percusión, picos, barrenas y barretas, entre otros.

La selección del muestreador apropiado debe estar en función de la profundidad a la que se colectaran las muestras y el volumen a muestrear.

La Tabla 10 incluye una lista de los sistemas comúnmente utilizados para la toma de muestras sólidas, indicando su aplicación y las ventajas e inconvenientes.

Tabla 10 Sistemas comúnmente utilizados para la toma de muestras.

Sistema	Aplicación al diseño de muestreo	Ventajas y desventajas
<i>Calicatas*</i>	Suelo de superficie suave (0-100 cm)	Barato, fácil de usar, capacidad de profundidad limitada.
<i>Sondeos Manuales</i>	Suelo duro. (0-100 cm)	Relativamente fácil de usar, capacidad de profundidad limitada, costos bajos.
<i>Sondeos Semimecánicos</i>	Suelo rocoso o arenoso. Hasta 10m	Buen rango de profundidad, puede requerir de dos o más operadores, costos medios.
<i>Sondeos Mecánicos</i>	Todo tipo de suelo, grandes profundidades.	Buen rango de profundidad, generalmente empleado para ganar acceso a horizontes de suelo más profundos, requiere de mano de obra experimentada, costo más elevado.

* Excavaciones de profundidad pequeña a media, realizadas normalmente con pala retroexcavadora



Equipo de protección personal de los involucrados en el muestreo

Guantes, casco, lentes, overoles, batas, cubre-bocas, tapones auditivos, zapatos o botas con suela antiderrapante, respiradores autónomos, identificación, protector solar, entre otros.

Procedimiento para muestreo de suelo

Será necesario describir en forma detallada todos los pasos de la metodología que se sigue para recuperar las muestras representativas de suelo, los materiales o herramientas que se utilizan, cómo y en qué momento se utilizan, cómo se transfieren a los recipientes que se enviarán al laboratorio.

Tipo de recipientes y volumen de las muestras

Según lo especificado en la norma de referencia, o previa consulta al laboratorio que realizará los análisis. Idealmente los recipientes deberán ser nuevos y proporcionados por el laboratorio para asegurar un control de calidad. Como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Recipientes para las muestras, temperaturas de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro (SEMARNAT-SSA1, 2013).

Parámetro	Tipo de recipiente	Temperatura de preservación	Tiempo Máximo de conservación
Hidrocarburos Fracción Ligera BTEX	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello de teflón (Cartucho con sello que asegure la representatividad de las muestras hasta su análisis)	4°C	14 días
Hidrocarburos Fracción Media		4°C	7 días
Hidrocarburos Fracción Pesada HAP's		4°C	14 días
		4°C	14 días
		4°C	14 días

Muestras de aseguramiento de la calidad

Según lo especificado en las normas o lo indicado por el laboratorio

- Duplicados (una muestra duplicada por cada 10 colectadas)
- Blancos
- De fondo
- Control de lavado de la herramienta de perforación

Clave única de identificación de las muestras

Se sugiere desarrollar un procedimiento propio para identificar en forma específica las muestras, de tal forma que no puedan confundirse con las que corresponden a otros sitios. La clave deberá estar asignada desde que se está elaborando el plan de muestreo.



Sellos y etiquetas

A todos los recipientes con muestra se les deberá colocar un sello que no pueda ser retirado sino hasta que las muestras se reciban en el laboratorio, deseablemente que quede protegido por la etiqueta.

Número total de muestras

Se obtiene al multiplicar el número de muestras que se van a obtener de cada punto sobre la vertical, por el número de puntos de muestreo sobre el plano horizontal.

Laboratorio

Se deberá referir el laboratorio que será responsable de tomar las muestras y practicar los análisis, así como el número de acreditación, el registro de aprobación y sus respectivas vigencias. De ser posible anotar el nombre del signatario autorizado responsable de la toma de muestras, mismo que deberá estar en las listas de la acreditación y de la aprobación.

Registros de perforación

Será necesario elaborar los registros de perforación, para tener los perfiles litológicos, esta información será de utilidad para la interpretación de los resultados.

Preservación de las muestras

Se deberá hacer mención del procedimiento de preservación de las muestras, según los parámetros a determinar, los tiempos límite de conservación y la matriz de las muestras, esta actividad estará bajo la responsabilidad del laboratorio, sin embargo, el responsable técnico deberá conocer la información para incluirla en el plan de muestreo.

Coordenadas UTM

Será necesario contar con un registro de coordenadas UTM de cada uno de los puntos de muestreo, incluyendo el cuadrante y la precisión.

Lavado

Todo material o herramienta que haya estado en contacto con el suelo a muestrear deberá ser lavado para retirar suelo de otros puntos; se deberá utilizar un detergente libre de fosfatos. Será necesario asegurar un buen enjuague para retirar los restos de detergente.

Bitácora

Será necesario llevar una bitácora al día para registrar todos los detalles del muestreo.



Cadena de custodia

Es un documento que elabora el signatario de muestreo autorizado del laboratorio acreditado para registrar todas las muestras obtenidas en sitio que serán entregadas al laboratorio.

El documento tiene un peso legal ante la autoridad ambiental. Se entrega en original al laboratorio y éste lo devuelve al cliente con los informes de pruebas.

En el plan de muestreo se debe hacer mención de la información que se deberá incluir en la cadena de custodia:

- ✓ Nombre del laboratorio acreditado y aprobado
- ✓ Datos del cliente (responsable técnico)
- ✓ Identificación del sitio de estudio
- ✓ Identificación o clave única de cada muestra
- ✓ Fecha y hora de muestreo de cada muestra
- ✓ Matriz de cada muestra
- ✓ Cantidad recibida de cada muestra
- ✓ Nombre o iniciales y firma del responsable de la toma de muestras
- ✓ Parámetros por analizar en cada muestra (si existe, especificar norma de referencia)
- ✓ Número de recipientes que se entregan de cada muestra
- ✓ Temperatura y condiciones de preservación
- ✓ Observaciones (en este recuadro se pueden incluir nombres y firmas de los presentes)
- ✓ Nombre, firma, fecha y hora de las personas involucradas en el traslado de muestras desde su origen hasta su destino

Anexos al plan de muestreo

A continuación se mencionan los documentos soporte, los cuales serán anexados al plan de muestreo.

- ✓ Mapa de carreteras, caminos o calles para llegar al sitio
- ✓ Plano y/o imagen satelital del sitio
- ✓ Plano acotado de la zona de estudio con la localización e identificación de los puntos de muestreo
- ✓ Copia de una identificación oficial del responsable técnico
- ✓ Copia de la acreditación y de la aprobación del laboratorio vigente, con el listado de signatarios autorizados
- ✓ Copia de una identificación oficial del signatario responsable de la toma de muestras



3.3.5. Métodos Analíticos

Estas muestras serán enviadas a un laboratorio acreditado, en el cual se realizarán los análisis correspondientes para la determinación de la concentración de los contaminantes especificados en la normatividad correspondiente de acuerdo a los parámetros de la Tabla 12.

Tabla 12 Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante (SEMARNAT-SSA1, 2013).

Producto Contaminante	Hidrocarburos			
	Fracción Pesada	Fracción Media	Fracción Ligera	BTEX
Mezclas	X	X	X	X
Petróleo Crudo	X	X	X	X
Combustóleo	X			
Parafinas	X			
Petrolatos	X			
Aceites	X			
Gasóleo		X		
Diésel		X		
Turbosina		X		
Keroseno		X		
Creosota		X		
Gasavión			X	X
Gasolvente			X	X
Gasolinas			X	X
Gasnafta			X	X

En el laboratorio se sigue el procedimiento ilustrado en el Diagrama 3.

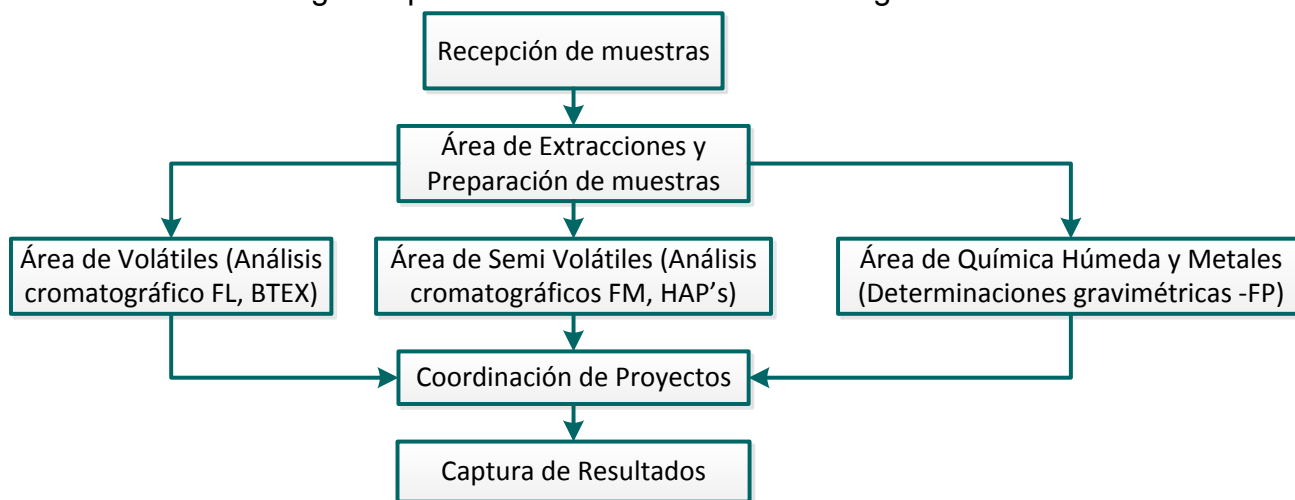


Diagrama 3 Diagrama de Análisis de Muestras en el Laboratorio (INTERTEK, 2013).



Técnicas Analíticas

Las técnicas analíticas permiten el estudio de un sistema a partir de un modelo del mismo. Pueden utilizarse en cualquier momento del ciclo de vida del sistema. Con las técnicas analíticas se pueden realizar análisis cualitativos del sistema, así como análisis cuantitativos (Pérez Jiménez, 2014).

Cromatografía de Gases: Separación, determinación y cuantificación de los compuestos de interés en base a sus diferentes puntos de ebullición y pesos moleculares. La identificación se realiza conforme a los tiempos de retención.

Cromatografía de Masas: Separación, determinación y cuantificación de los compuestos de interés con base en sus diferentes puntos de ebullición y pesos moleculares; la identificación se lleva a cabo por medio de la comparación de los diferentes fragmentos iónicos.

Cromatografía de Líquidos: Separación, determinación y cuantificación de los compuestos de interés con base en sus tiempos de elución (pues es una fase líquida). La identificación se realiza conforme a los tiempos de retención.

Plasma Acoplado Inductivamente (ICP): Cuantificación de la energía emitida por la muestra a cierta longitud de onda (particular para cada elemento) que es directamente proporcional a la concentración del analito en cuestión. La determinación puede ser multielemental.

Titulometría: Determinación y cuantificación del analito mediante el registro de volúmenes gastados de soluciones titulantes y con la observación del cambio de color en los indicadores.

Microbiología: Determinación y cuantificación de microorganismos mediante “Vaciado en placa” y “Número más probable”.

Pruebas Físico-Químicas: Determinaciones a través de técnicas volumétricas, colorimétricas y gravimétricas.

Inferencias Analíticas

Algunas de las inferencias analíticas más usadas son las siguientes:

Absorción Atómica: Cuantificación de la energía absorbida por la muestra a cierta longitud de onda (particular para cada elemento) que es directamente proporcional a la concentración del analito en cuestión.

Gravimetría: Cuantificación del analito mediante la diferencia de pesos.



Métodos Analíticos Oficiales

Los métodos analíticos oficiales establecidos en la normatividad, son:

Determinación de Hidrocarburos Fracción Ligera

El análisis que deben cubrir los hidrocarburos con pesos moleculares entre C5 y C10 y puntos de ebullición de entre 60°C y 170°C, que en su mayoría corresponden a compuestos volátiles. El método usado actualmente es el EPA 8015B en la cual la determinación se realiza por la técnica de cromatografía de gases con columna capilar y detector de ionización de flama. Se obtiene un perfil de picos cuya separación se basa en los pesos moleculares. La muestra es introducida a la cromatografía con un sistema de Purga y Trampa (PYT) con lo cual se reduce la manipulación de la muestra. Al sistema de PyT se le hace pasar un gas inerte el cual arrastra los componentes al cromatógrafo de gases.

Determinación de BTEX

El análisis cubre la determinación de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos. El método usado actualmente es el EPA 8260 en la cual la determinación se realiza por la técnica de cromatografía de gases con columna capilar y detector de masas. Se obtienen picos independientes cuya identificación se basa en la comparación del espectro de masas almacenado en una biblioteca electrónica y el obtenido en la muestra en cuestión. La muestra es introducida a la cromatografía con un sistema de Purga y Trampa de la misma forma que para la Fracción Ligera.

Los hidrocarburos Fracción Media

El análisis debe cubrir los compuestos con pesos moléculas entre C10 y C28 y puntos de ebullición de 170°C a 460°C. El método actualmente usado es el EPA 8015B, para la Fracción Media la muestra es extraída antes del análisis con un solvente, principalmente es el Diclorometano, realizando 3 extracciones en un baño ultrasónico con porciones de 40mL cada una, posteriormente el solvente es concentrado hasta 1mL. La determinación se realiza inyectando este extracto directamente en el cromatógrafo de gases, la separación se lleva a cabo en la columna y la cuantificación se realiza en un detector de ionización de flama. Se obtiene un perfil de picos que son cuantificados a lo largo de todo el perfil tomando la línea base y no de valle a valle.

Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)

De la misma extracción realizada para determinación de Hidrocarburos Fracción Media se puede determinar HAP's. El método usado actualmente es el EPA 8270 en la cual la determinación se realiza por la técnica de cromatografía de gases con columna capilar y detector de masas. Se obtienen picos independientes cuya identificación se basa en la comparación del espectro de masas almacenado en una biblioteca electrónica y el obtenido en la muestra en cuestión.



Hidrocarburos Fracción Pesada

El análisis de hidrocarburos Fracción pesada debe comprender los componentes con pesos moleculares mayores a C18. Una porción de la muestra a analizar se mezcla con sulfato de sodio anhidro y se extrae mediante la técnica Soxhlet o Sonicación. El material extraíble con n-hexano (MEH) se concentra, seca y pesa; para posteriormente ser tratado con sílica gel estandarizada para la separación de compuestos polares y determinación gravimétrica.

Límites máximos permisibles

Una vez obtenidos estos análisis se procede al análisis de los resultados obtenidos, de acuerdo a los límites máximos permisibles especificados en dicha norma de acuerdo al uso del suelo tal como se muestra en la Tabla 13 y 14.

Tabla 13 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo (SEMARNAT-SSA1, 2013).

Fracción de Hidrocarburos	Uso de suelo predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
<i>Ligera</i>	200	200	500
<i>Media</i>	1,200	1,200	5,000
<i>Pesada</i>	3,000	3,000	6,000

Tabla 14 Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en el suelo (SEMARNAT-SSA1, 2013).

Hidrocarburos específicos	Uso del suelo predominantemente (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
<i>Benceno</i>	6	6	15
<i>Tolueno</i>	40	40	100
<i>Etilbenceno</i>	10	10	25
<i>Xilenos (suma de isómeros)</i>	40	40	100
<i>Benzo[a]pireno</i>	2	2	10
<i>Dibenzo[a,h]antraceno</i>	2	2	10
<i>Benzo[a]antraceno</i>	2	2	10
<i>Benzo[b]fluoranteno</i>	2	2	10
<i>Benzo[k]fluoranteno</i>	8	8	80
<i>Indeno (1,2,3-cd)pireno</i>	2	2	10

De acuerdo a los resultados obtenidos al analizar las muestras, si se ha delimitado completamente el área dañada y si el área de contaminación es homogénea, se procede a la elaboración de una propuesta de remediación, de lo contrario, si no se ha delimitado por completo el área dañada, se efectuará nuevamente el muestreo, hasta que ésta se haya delimitado.



Por otra parte, si el área de contaminación no es homogénea se vuelve a hacer la elección de los puntos a muestrear, esto con el fin de que el muestreo sea representativo, para que posteriormente se realice la propuesta de remediación como se esquematiza en el Diagrama 4.

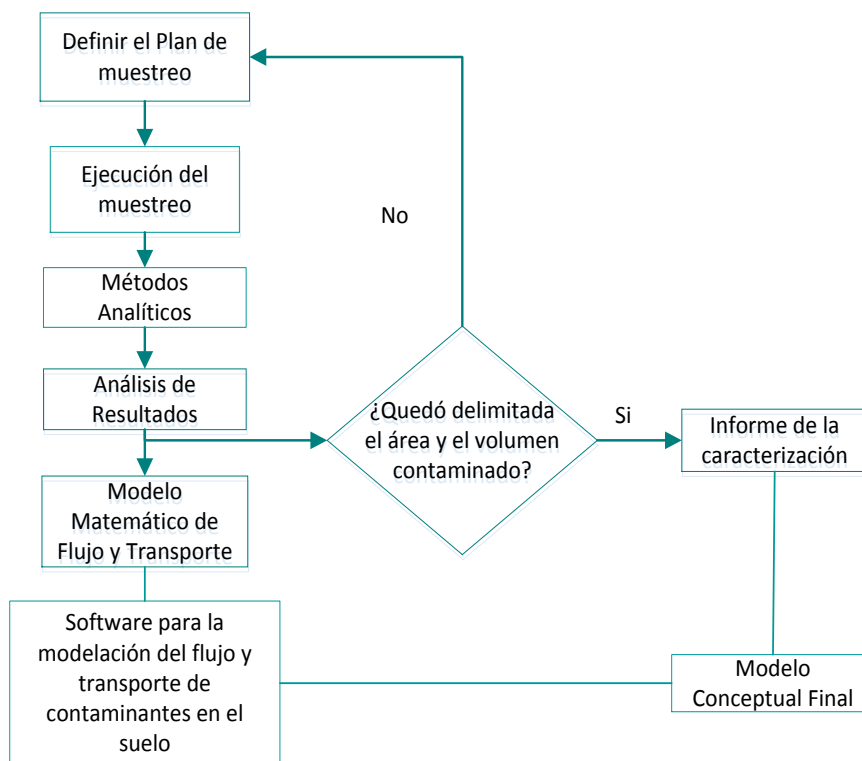


Diagrama 4 Diagrama de la metodología de Muestreo.

Con los datos obtenidos por el laboratorio se procede a realizar un Modelo Conceptual final, geológico e hidrológico. En el que se incluyen isolíneas de concentración, así como la determinación de parámetros hidráulicos. Mediante algún modelo matemático de flujo y transporte.

3.3.6. Modelo Matemático de Flujo y Transporte

Un modelo es una herramienta que reproduce matemáticamente parcial o totalmente un sistema real. Los modelos numéricos de flujo y transporte, representan actualmente la mejor herramienta analítica para comprender y cuantificar los mecanismos de transporte involucrados, la variación espacial y temporal de las concentraciones, así como las distancias y velocidades de migración.

Fundamentalmente debido a la difusión molecular, los solutos se mueven de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración a causa de un gradiente de concentración. Para sistemas hidrogeológicos en que la concentración del soluto varía con el tiempo se aplica la segunda Ley de Fick (Ecuación 3).



$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dd \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots(3)$$

$\frac{\partial C}{\partial t}$ = Cambio de la concentración con respecto al tiempo.

Dd = Coeficiente de difusión molecular.

Así como también se produce el fenómeno denominado “Dispersión mecánica”. La dispersión mecánica es un proceso de mezcla hidráulica debido a variaciones en la velocidad a nivel de poro en los medios geológicos, dichas variaciones de velocidad se deben a los siguientes factores: variación en el tamaño de los poros, variaciones en la longitud de la trayectoria de las partículas de fluido y a la fricción en los poros cuando circula el fluido en el medio geológico.

En la Figura 29 se muestra un ejemplo de las múltiples trayectorias en las que se puede transportar el hidrocarburo en un suelo promedio.

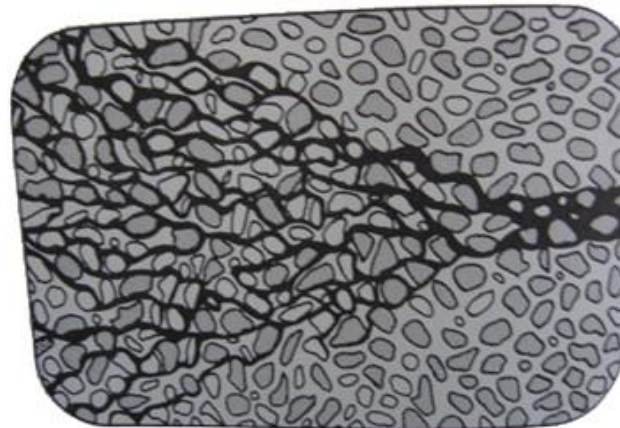


Figura 29 Ejemplo de dispersión de hidrocarburo en el suelo (Aguilar, 2013).

Cuando el fluido con los solutos se desplaza en el subsuelo no viaja a la misma velocidad debido a la variación en la mencionada velocidad, se produce una zona de mezcla a lo largo de la trayectoria del fluido produciendo una dilución del soluto en el frente de la mancha de contaminación en el subsuelo.

Para esto se definen en la Ecuación (4) el coeficiente de dispersión mecánica longitudinal y en la Ecuación (5) el coeficiente de dispersión transversal.

$$D_{mL} = \alpha_L V_i \dots\dots\dots(4)$$

$$D_{mT} = \alpha_T V_i \dots\dots\dots(5)$$

Dónde:

D_{mL} = Coeficiente de dispersión longitudinal

α_L = Dispersividad longitudinal

D_{mT} = Coeficiente de dispersión transversal

α_T = Dispersividad transversal

V_i = Velocidad lineal promedio en la dirección "i"



En muchos casos en un sistema de flujo de aguas subterráneas la difusión es insignificante y por lo tanto se puede omitir. Sin embargo, en situaciones donde se tienen medios geológicos relativamente impermeables la difusión molecular juega un papel importante sobre todo cuando el tiempo de migración es grande.

En los medios heterogéneos siempre están presentes los procesos de difusión y de dispersión hidrodinámica. Las unidades geológicas en donde predomina la difusión pueden ocasionar rebotes si no se incluyen en la remediación.

La ecuación (6) muestra el transporte de solutos para la zona saturada utilizando la convención de Einstein (Bear, 1988).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{v_i}{R} \frac{\partial C}{\partial x_i} \left(\frac{D_{ij}}{R} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \lambda C = \frac{Su}{\theta} \dots\dots\dots (6)$$

Donde

C = Concentración del soluto

t = Tiempo

D_{ij} = Tensor del coeficiente de dispersión

x_{ij} = Coordenadas espaciales

v_i = Velocidad lineal promedio del agua subterránea

Su = Término del sumidero

θ = Porosidad del medio

R = Factor de retardación

λ = Constante de biodegradación del compuesto orgánico

Van Genuchten (1980) presentó la Ecuación (7) para el cálculo del grado de saturación efectiva, la cual tiene ventajas para su implementación en los modelos de cálculo de flujo en medios porosos no saturados.

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \dots\dots\dots (7)$$

Donde *α*, *n* y *m* son constantes empíricas y *h* indica la succión.

La ecuación de Van Genuchten con: *m*=1 fue usada por Ahuja y Swartzenruber (1972), Endelman y otros (1974) y Varallyay y Mironenko (1979). Las restricciones usuales utilizadas para la ecuación de Van Genuchten son: *m*=1-1/*n* y *m*=1-2/*n*. Los resultados más estables se obtienen generalmente cuando se utilizan las restricciones para una serie incompleta de datos.

En la Ecuación (8) se muestra el modelo (analítico) de Van Genuchten (1964):

$$S_w(h) = S_{wr} + (1 - S_{wr}) \left(\frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]} \right)^m \dots\dots\dots (8)$$

Dónde: *α* controla la forma de la curva y representa el inverso de la potencia de la franja capilar y *n*, controla la distribución del tamaño de poro en el suelo.



Las ecuaciones (9) y (10) muestran el modelo API, el cual reescribe la formulación de Van Genuchten para predecir la saturación en el subsuelo de los fluidos LNAPL + agua y LNAPL + aire en función de la profundidad (z), se le denomina Modelo API / Charbeneau.

$$S_w(z) = Swr + (1 - Swr - Sors) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_{ow}(z - z_{ow}))^n} \right]^m \dots\dots\dots (9)$$

$$S_t(z) = Swr + Sorv + (1 - Swr - Sorv) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_{ao}(z - z_{ao}))^n} \right]^m \dots\dots\dots (10)$$

Si se supone equilibrio vertical, entonces la saturación de hidrocarburo (So) se muestra en la Ecuación (11).

$$S_o(z) = S_t(z) - S_w(z) \dots\dots\dots (11)$$

Donde z es la elevación de referencia: Nivel freático del acuífero.

Además de los métodos de modelación analítica y semi-analítica, también se puede hacer uso de modelación numérica por medio de diferencias finitas tal como se ilustra en la Figura 30.

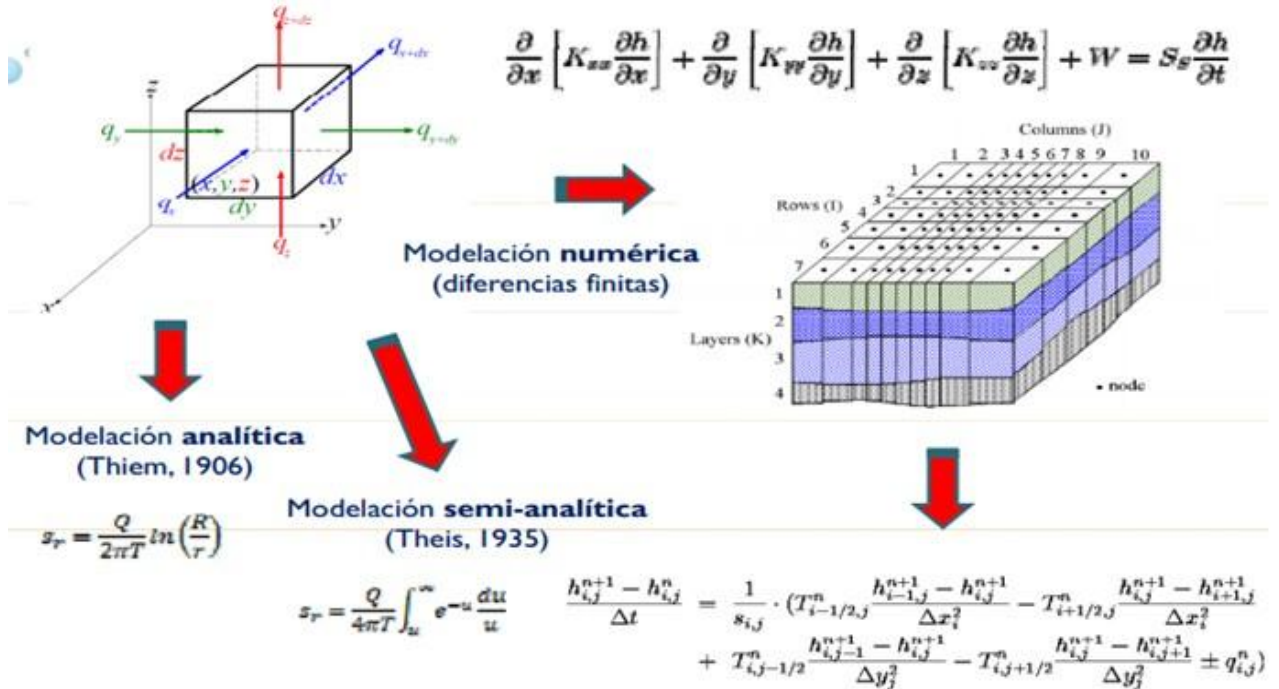


Figura 30 Tipos de Modelación de flujo y transporte (Hernandez-Espíritu., 2013).

Estos modelos matemáticos se han incluido en diversos software en los cuales se incluye el modelo digital de elevación y la topografía de detalle del sitio así como el modelo geológico e hidrogeológico conceptual. Con estos se simula el flujo y transporte de los contaminantes en el sitio contaminado.



En la Tabla 15 se muestran algunos de los software más utilizados así como su aplicación.

Tabla 15 Software para la modelación del flujo y transporte de contaminantes en el suelo (EPA, 2014).

Software	Aplicación
<i>ModFlow</i>	Modelador de flujo por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, el cual consiste de un código fuente que resuelve mediante interacciones la ecuación de flujo del agua subterránea
<i>MT3DMS</i>	Herramienta de síntesis de estos procesos, de evaluación entre sus interacciones y prueba la efectividad de las medidas de remediación del agua subterránea. Simula la migración de contaminantes
<i>VLEACH</i>	Modelo de diferencias finitas, El código simula el escurrimiento en un polígono de suelo.
<i>Footprint</i>	Modelo de detección sencilla, Estima la longitud y el área de superficie de benceno, tolueno, etilbenceno, xileno y penachos (BTEX) en aguas subterráneas, producido a partir de un derrame de gasolina que contiene etanol. El etanol tiene un potencial impacto negativo en la biodegradación natural de compuestos BTEX en el agua subterránea.
<i>Hydrus</i>	Análisis de flujo de agua y transporte de solutos en medios porosos saturados variable. Simula el movimiento del agua, el calor, y varios solutos en medios variablemente saturado. El modelo se apoya en una interfaz interactiva basada en gráficos para los datos-preprocesamiento, discretización del perfil del suelo, y la presentación gráfica de los resultados.
<i>oilvol</i>	Estima el volumen de hidrocarburo libre en un suelo y calcula el volumen de NAPL residual en las zonas saturadas y no saturadas.
<i>FeFlow</i>	Modela el flujo de fluido y el transporte de componentes disueltos y / o procesos de transporte de calor en el subsuelo.

Los modelos pueden ser utilizados como herramientas interpretativas para confirmar el funcionamiento del modelo hidrogeológico conceptual, la geometría de las unidades hidroestratigráficas y los parámetros hidráulicos y de transporte medidos en campo.

Adicionalmente, se pueden emplear como herramientas predictivas para predecir los escenarios de migración de los contaminantes y evaluar las posibles alternativas de remediación.

3.3.7. Evaluación de Riesgo a la Salud Humana

El riesgo de un contaminante presente en un suelo pueda suponer la existencia de contaminación en el mismo se evalúa a partir de la concurrencia de los tres factores ilustrados en la Figura 31:

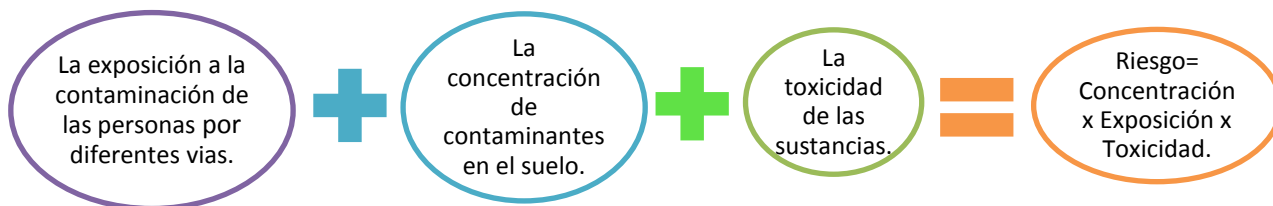


Figura 31 Factores a evaluar en el análisis de riesgo (Flores Serrano, 2013).

Por lo tanto la evaluación y valoración de riesgo supone determinar cada uno de los factores que intervienen en la anterior expresión.

Rutas de Exposición

Para la evaluación de rutas de exposición se deben considerar los elementos ilustrados en la Figura 32, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

1. Datos del muestreo y descripción del muestreo
2. Tipo y característica del suelo
3. Cubierta superficial

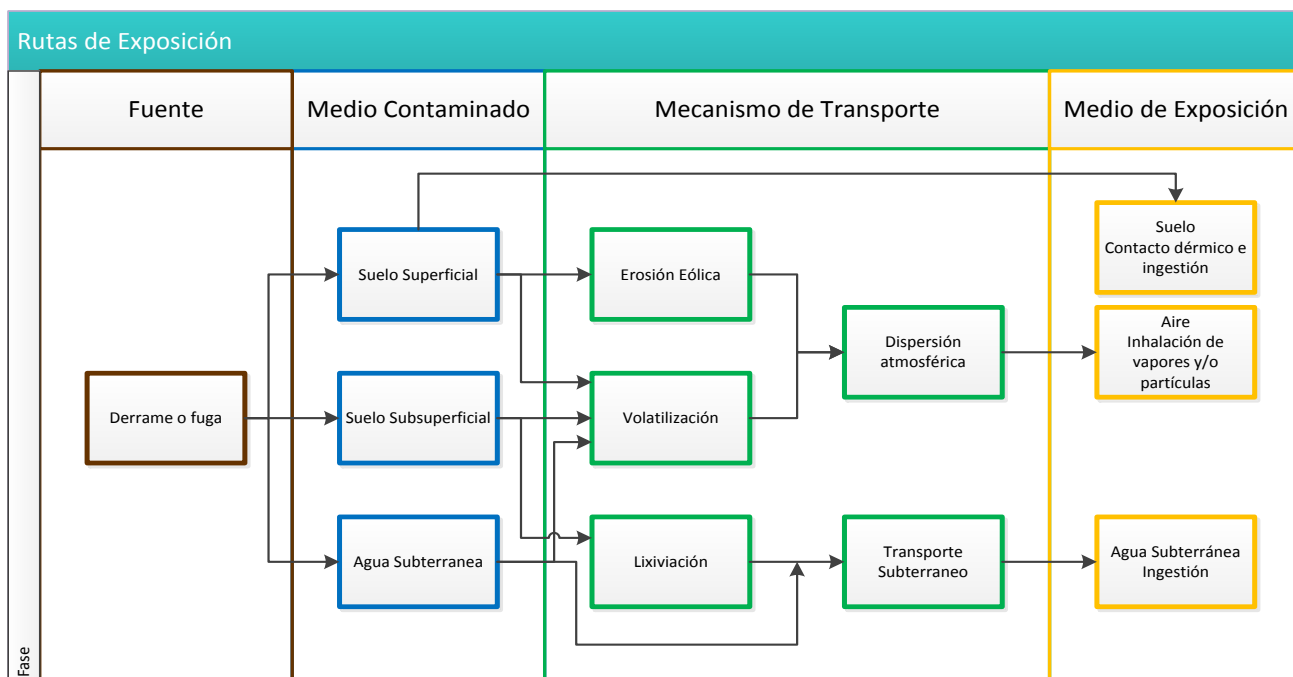


Figura 32 Diagrama de Rutas de Exposición (Flores Serrano, 2013).



De acuerdo a la agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR, 2014) las alteraciones del comportamiento pueden ocurrir como consecuencia a la exposición a hidrocarburo, así como efectos a la sangre, al sistema inmunitario, los pulmones, la piel, Sistema Nervioso Periférico, S.N.C. Médula ósea, Hígado, Riñón y los ojos. En la Figura 33 se presentan los riesgos de exposición a hidrocarburos.

Caracterización del riesgo

Las técnicas más recientes de evaluación de suelos contaminados se fundamentan en la metodología de análisis de riesgo, ASTM E1739/95, basada en el riesgo que presentan a la salud humana y al medio ambiente la suma de riesgos individuales que presentan los agentes químicos presentes en el sitio (UAIS, 2007).

Determinar si el riesgo es o no aceptable, sabiendo de antemano; cuáles son los medios afectados, la concentración del contaminante, la población que está expuesta (niño, adultos), la dosis de exposición (concentración, tasas de ingestión, frecuencia de exposición, duración de exposición, peso corporal), Efectos (cáncer, sistémico) y los valores toxicológicos de referencia.

Efectos de la
exposición a
hidrocarburos

- Mareo
- Cefalea
- Astenia física.
- Fatiga psíquica.
- Tendencia depresiva.
- Respuestas afectivas exageradas.
- Retardo en el tiempo de reacción.
- Neuropatía periferal (adormecimiento de los pies y las piernas.
- Polineuropatía Sensitivomotora.
- Aplasia Medular.
- Leucemia.
- Hepatopatías
- Turbolopatía proximal y distal
- Ataxia, temblores y alteraciones del comportamiento
- Polineuropatías
- Dermatitis, que se manifiesta por piel seca, agrietada y eritematosa.
- Disfunción neuroconductual: cefalea, labilidad emocional, fatiga, pérdida de la memoria, dificultad en la concentración, disminución del periodo de atención.

Figura 33 Efectos de la exposición a hidrocarburos (ATSDR, 2014).

De acuerdo a las sustancias evaluadas, se identifican los efectos que esta sustancia produce. Así como el nivel de riesgo y los valores toxicológicos de referencia. La Tabla 16 muestra los niveles de riesgo en función de los receptores de la contaminación y del tipo de lugar en el que se encuentran.



Tabla 16 Niveles de riesgo de acuerdo a los receptores y el tipo de área (Flores Baca, 2013).

Nivel de Riesgo	Receptores.	El tipo de área.
<i>Nivel 0, caso A</i>	Sólo los recursos naturales no biológicos (suelo y agua).	–Urbana industrial y/o comercial. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) –Área natural protegida.
<i>Nivel 0, caso B</i>	Sólo los recursos naturales no biológicos (suelo y agua) y seres humanos	–Urbana industrial y/o comercial. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) –Área natural protegida.
<i>Nivel 1</i>	–Especies de uso o valor económico. –Especies protegidas. –Ecosistemas valiosos.	–Áreas naturales protegidas. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) *** Y no existe la información toxicológica necesaria para realizar la evaluación de riesgo ambiental.
<i>Nivel 2</i>	–Especies de uso o valor económico. –Especies protegidas. –Ecosistemas valiosos.	–Áreas naturales protegidas. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) *** Y existe la información toxicológica necesaria para realizar la evaluación de riesgo ambiental
<i>Nivel 3</i>	–Especies de uso o valor económico. –Especies protegidas. –Ecosistemas valiosos.	–Áreas naturales protegidas. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) *** Y existe la información toxicológica necesaria para realizar la evaluación de riesgo ambiental y se haya determinado los índices de peligro históricos correspondientes

Esto se puede hacer con ayuda del software Risk-Based Corrective Action (RBCA), el cual es un método gerencial que se enfoca explícitamente en la protección de la salud humana y el ambiente. En contraste con el método tradicional de restaurar el lugar a condiciones iniciales, con este estudio se puede reducir la contaminación del sitio a un nivel que no represente un riesgo para la salud humana o el ambiente. Este método práctico promueve el uso de tecnologías de remediación eficientes desde el punto de vista energético y económico, y permite la distribución de recursos limitados hacia las áreas que imponen un mayor riesgo en primer lugar. Este sistema puede ser aplicado a una variedad de sitios que requieran ser remediados independientemente de su ubicación geográfica y de que sean administrados por distintas autoridades reglamentarias (RBCA, 2008).

Con todo este análisis se determinan los niveles de limpieza más factibles de acuerdo a la normatividad y a la evaluación de riesgo que serán considerados en la remediación.



3.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN

A continuación se muestra en el Diagrama 5 la estrategia para la selección de la técnica de remediación, partiendo del modelo conceptual final, evaluando el riesgo tanto para el ambiente como para la población y con esto elegir el nivel de remediación a realizar, clasificando las áreas de acuerdo a las características del sitio y del contaminante, identificando aquellas zonas donde el sitio no requiere ser remediado, así como aquellas zonas donde el confinamiento es la solución más viable. Y donde sí requiere ser remediado; proponiendo técnicas de remediación tanto *in situ* como *ex situ* para la remediación del sitio y con su revitalización darle un reaprovechamiento.

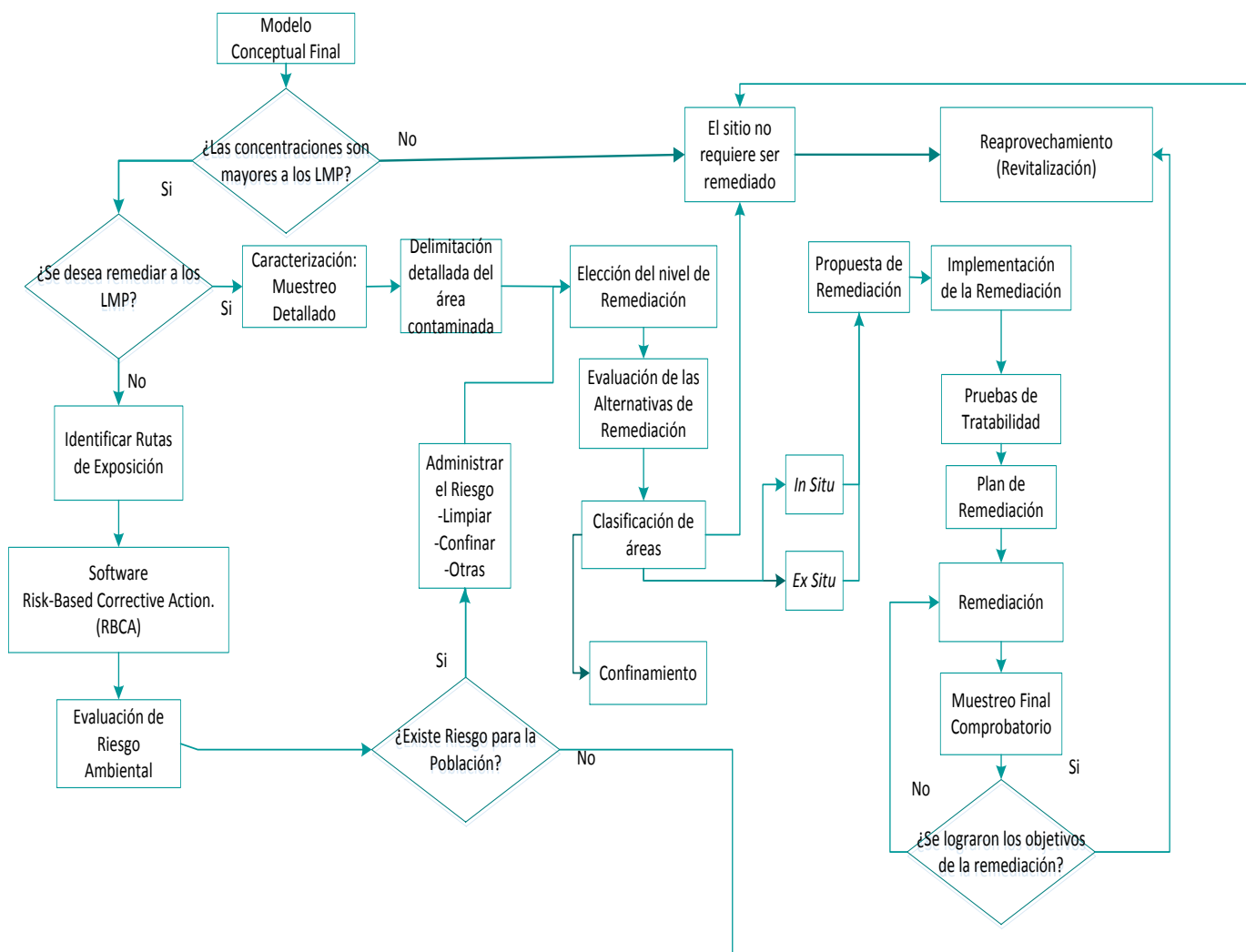


Diagrama 5 Diagrama de Remediación.



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

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios:

- (i) Estrategia de remediación (Figura 34).
- (ii) Tipo de tratamiento (Figura 35).
- (iii) Lugar en que se realiza el proceso de remediación (Figura 36 y 37).

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

i. Estrategias de Remediación.

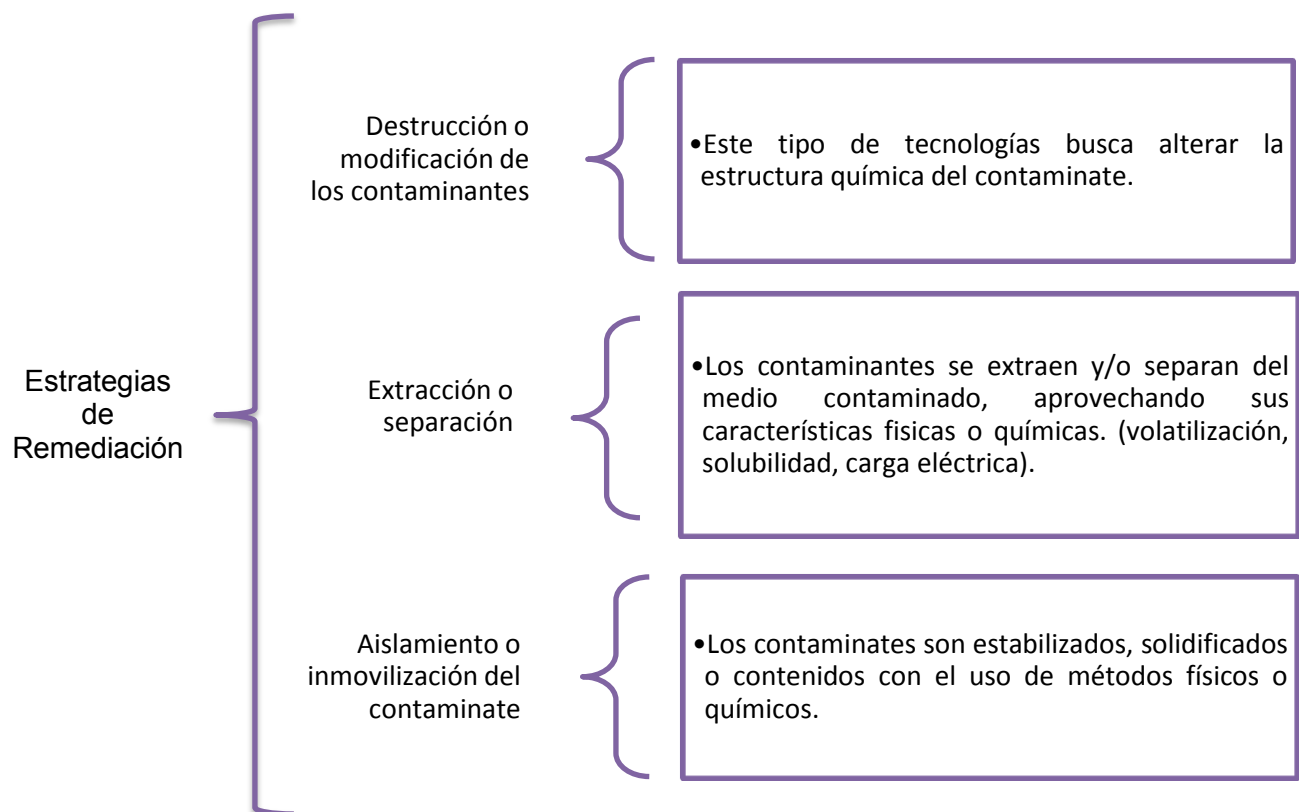


Figura 34 Estrategias de Remediación (INECC, 2007).



ii. Tipo de tratamiento.

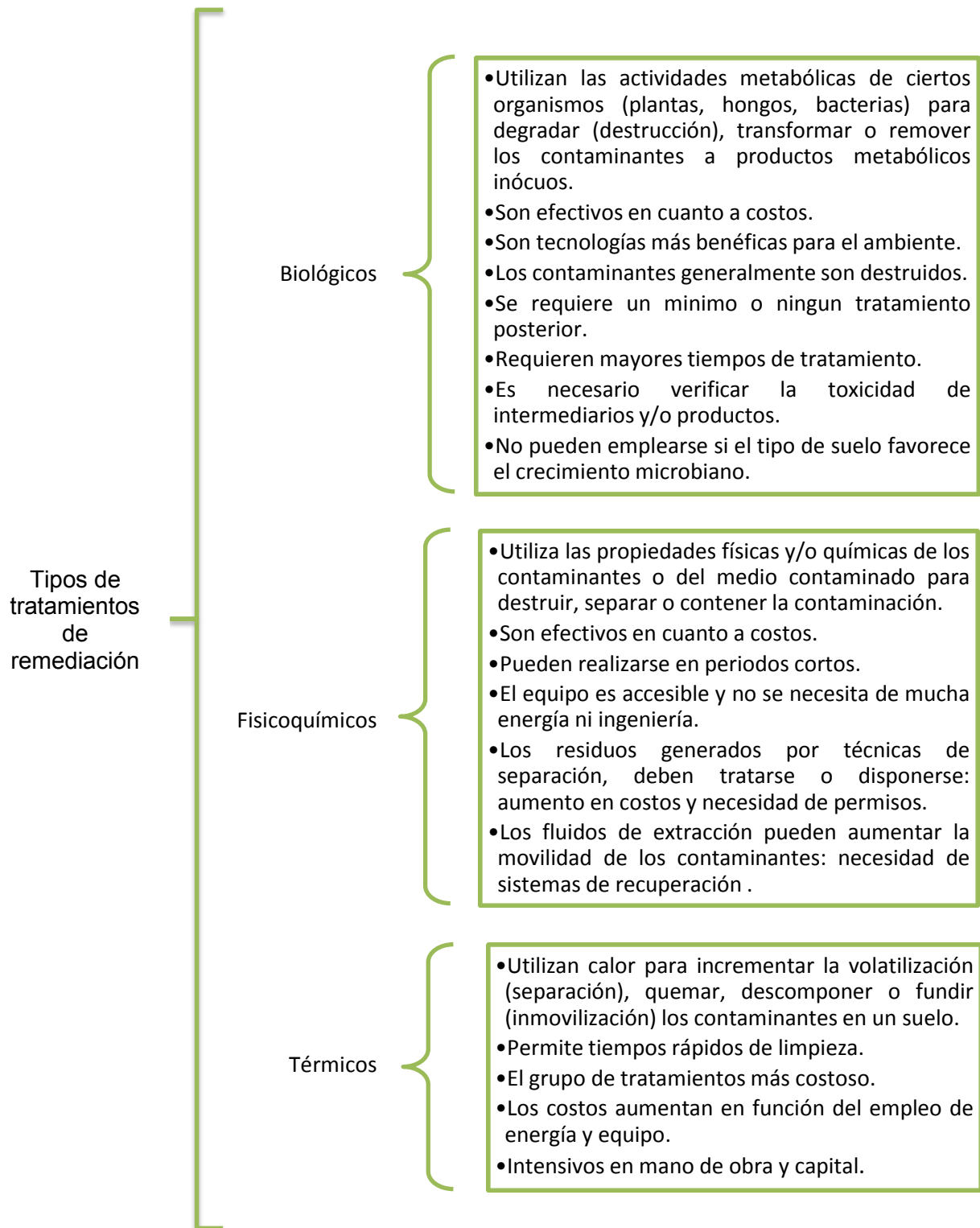


Figura 35 Tipos de tratamientos de remediación (INECC, 2007).



iii. Lugar donde se realiza el proceso de remediación.

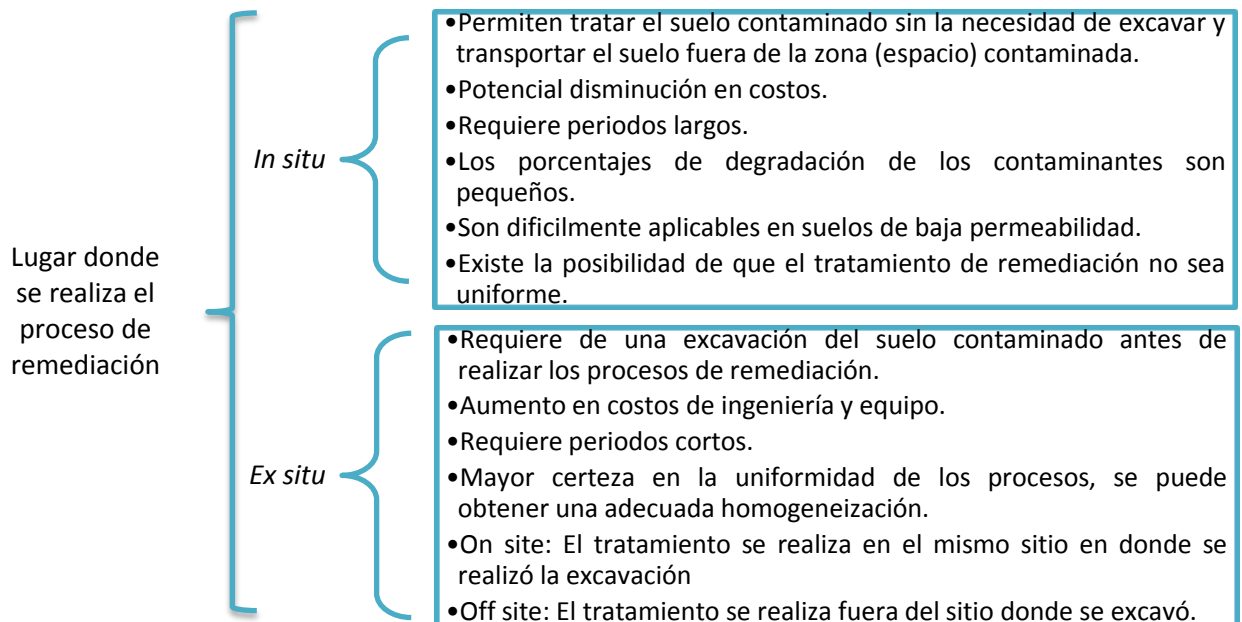


Figura 36 Lugar donde se realiza el proceso de remediación (INECC, 2007).

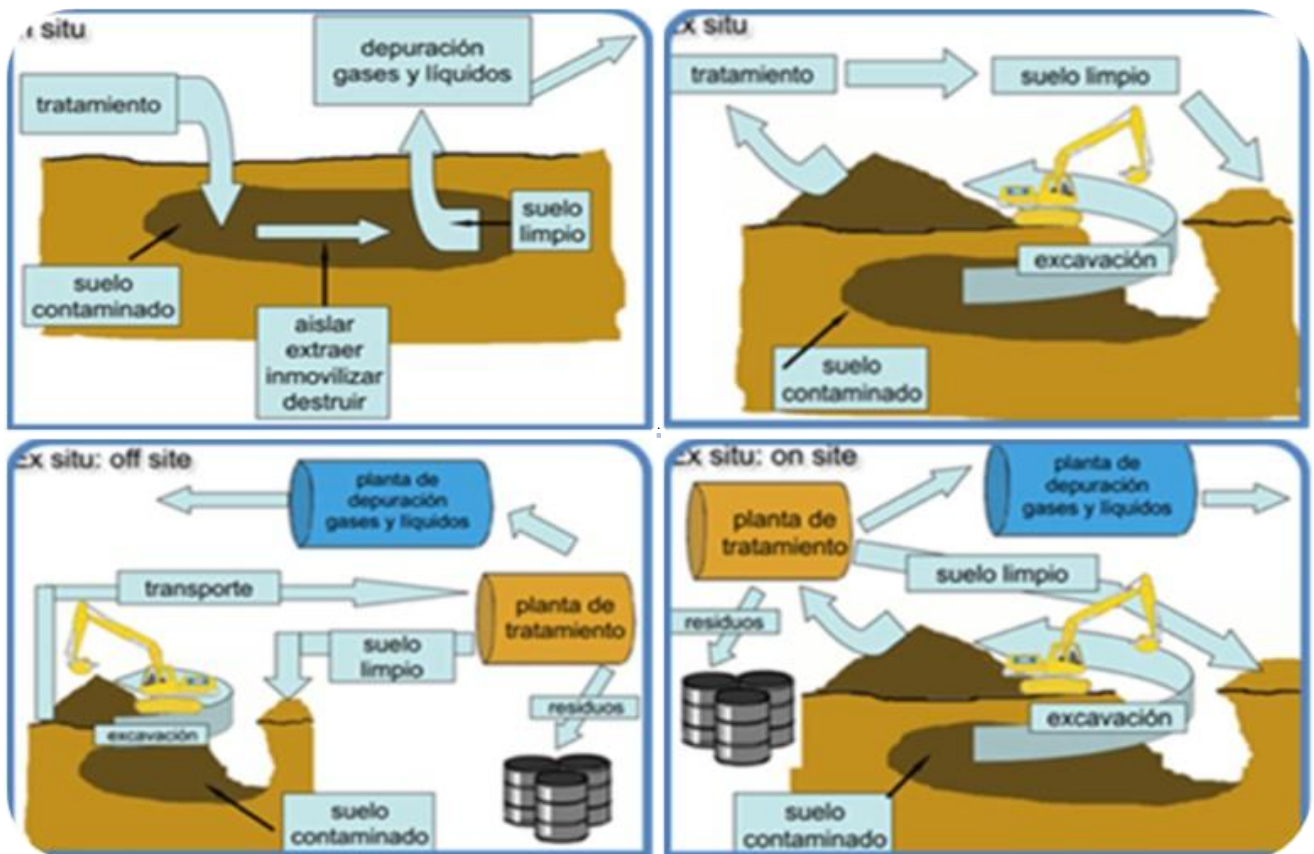


Figura 37 Técnicas de remediación de acuerdo al lugar donde se realiza el proceso de remediación.



3.4.1. Tratamiento Biológico *In Situ*

Algunas de las técnicas de tratamiento biológico *in situ*, son las siguientes.

Biorremediación

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

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis y col., 1998).

Esta técnica es la de mayor elección para suelos contaminados con hidrocarburos, aprobada por la DGGIMAR/SEMARNAT ya que es aplicable a diversos productos como se muestra en la Figura 38.

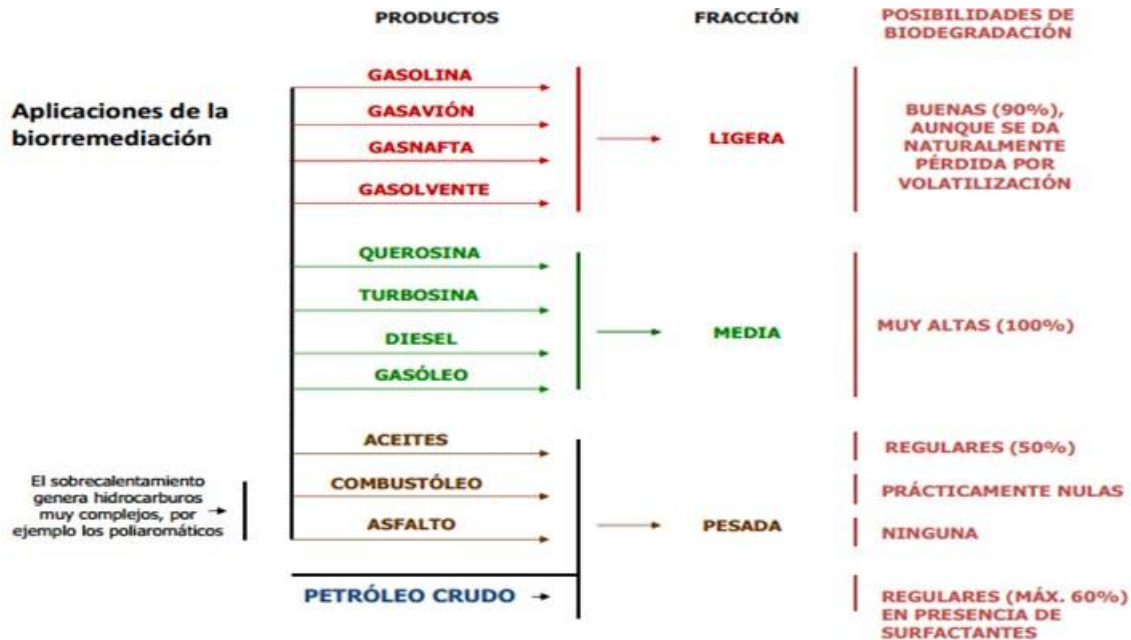


Figura 38 Aplicaciones de la biorremediación (Saval, 2013).

La biorremediación ocurre sólo si: existen microorganismos degradadores, si los sustratos son biodegradables, si hay nutrientes básicos y si las condiciones microambientales son favorables (pH, temperatura, humedad, oxígeno) (Saval, 2013).



En la Figura 39 se presentan las ventajas y desventajas de la biorremediación.

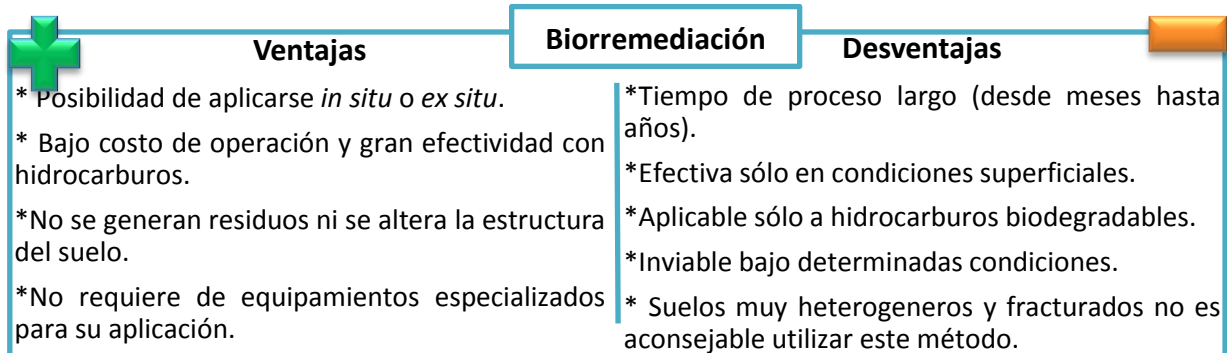


Figura 39 Ventajas y desventajas del proceso de biorremediación (INECC, 2007).

Bioestimulación

La bioestimulación implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos, y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos *in situ* (Van Deuren y col., 1997). Se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con gasolinas, COVs, COSs y plaguicidas (Alexander, 1994). Estudios a escala piloto, han mostrado la biodegradación de suelos contaminados con desechos de municiones. Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O₂.

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

Bioaumentación

Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora. Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación. El tamaño del inóculo a utilizar, depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores (Riser-Roberts, 1998).

Se ha usado para tratar suelos contaminados con herbicidas (2,4-D, clorofam), insecticidas (lindano, clordano, paratión), clorofenoles (PCP), nitrofenoles, bifenilos policlorados (BPCs), hidrocarburos totales del petróleo HTPs e hidrocarburos policíclicos aromáticos HAPs (Alexander, 1994). También se ha aplicado



efectivamente para tratar desechos con concentraciones relativamente altas de metales (Eweis y col., 1998).

Es una tecnología que puede durar varios meses o años y su utilización no implica mucho capital ni altos costos de operación (Volke Sepúlveda T. , 2002).

Bioventeo (Bioventing)

Es una técnica de tratamiento biológico *in situ* que combina la ventilación mecánica de los COV con la utilización de microorganismos autóctonos para degradar compuestos orgánicos adsorbidos por el suelo en la zona no saturada.

Mediante esta tecnología, la actividad de las bacterias es estimulada introduciendo un flujo de aire en la zona no saturada por medio de pozos de inyección, si fuera necesario, también se añadirían nutrientes para favorecer el proceso. En esta técnica se utilizan bajos caudales de aire para proporcionar sólo el oxígeno suficiente para mantener la actividad microbiana y así estimular la biodegradación (Miliarium, 2008).

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

Biolabranza

Durante el proceso de biolabranza, la superficie del suelo contaminado es tratado en el mismo sitio por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) se controlan para optimizar la velocidad de degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados (Riser-Roberts, 1998).

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

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



Atenuación natural

Trabajo que la naturaleza hace por sí misma, para degradar los contaminantes a través de los ciclos biogeoquímicos que llevan a cabo los microorganismos nativos del suelos, así como los procesos naturales superficiales tales como la dilución, volatilización, biodegradación, adsorción y las reacciones químicas con materiales sub superficiales permitiendo reducir las concentraciones del contaminante de manera pasiva.

Los contaminantes que pueden tratarse por esta tecnología son: solventes volátiles (incluyendo BPCs), HTPs, metales y explosivos. Gasolinas (Van Deuren y col., 1997).

Este método implica costos adicionales por el modelamiento para la predicción de velocidades de degradación, contenedores, muestreo y análisis para determinar el grado de contaminación y confirmar su degradación y el estado de la limpieza (Volke Sepúlveda, 2002).

Bioslurping

Es una tecnología que utiliza el vacío y la actividad de los microorganismos para la remediación de suelo contaminados con hidrocarburos. Consiste en extraer a vacío aire del suelo, favoreciendo el flujo de nuevo aire a esta zona, lo que se aprovecha para estimular la actividad de los microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos (Miliarium, 2008).

Pueden ser extraídos los hidrocarburos menos densos que el agua que se encuentra flotando sobre el nivel freático y en el agua capilar. Es aplicable incluso en zonas donde el nivel freático se encuentra a más de 10 metros de profundidad. Es una tecnología rentable que combina la descontaminación de la zona no saturada con la extracción de compuestos contaminantes que se encuentran flotando en el agua subterránea (López Almanza, 2012).

Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*.

Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAPs; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn (Sellers, 1999). Esta técnica muestra una atractiva relación costo-beneficio: "Los costos de operación representan tan solo el 50 % de los de las tecnologías convencionales" (Macek et al, 2000).



3.4.2. Tratamiento Físico-Químico *In Situ*

Algunas de las técnicas de tratamiento físico-químico *in situ*, son las siguientes:

Fracturamiento Neumático

Se inyecta aire presurizado bajo la superficie para desarrollar grietas en zonas de permeabilidad baja sobre sedimentos consolidados, abriendo nuevos pasadizos que incrementan la eficiencia de extracción de muchos procesos *in situ*.

Estabilización y Solidificación (S/E)

La Estabilización y solidificación (S/E) es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación. La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan (atrapan físicamente) al contaminante formando un material sólido, y no necesariamente involucra una interacción química entre el contaminante y los aditivos solidificantes. (Sellers, 1999; EPA, 2001).

Para la estabilización de contaminantes orgánicos no polares como grasa y aceites, hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos halogenados y PCB se utilizan los agentes tipo cemento y tipo puzolanas estos químicos estabilizantes pueden impedir el fraguado, su durabilidad disminuye en largos periodos de tiempo y los volátiles pueden escapar a la mezcla (López Almanza, 2012).

Tecnologías de Pantalla

Tienen por objetivo la contención de los contaminantes en el subsuelo, consisten en la introducción de paredes o barreras impermeables en el suelo de manera que se evita la migración de la contaminación. Se aplica cuando la descontaminación resulta técnica o económicamente inviable mediante alguna de las demás técnicas o cuando la contaminación esté muy localizada (Miliarium, 2008).

Estas se pueden utilizar como un complemento de otras técnicas de remediación. Esta es una técnica muy aplicada, ya que el agua confinada dentro de la barrera se puede bombear y depurar.

Enjuague de suelos (Flushing In Situ)

Consiste en la inyección (mediante pozos, zanjas, sistemas de aspersion o sistemas de infiltración) de una disolución de enjuague que contiene un aditivo (disolventes orgánicos, disoluciones ácidas o tensoactivas) para incrementar la solubilidad del contaminante y así coadyuvar a movilizar los contaminantes para elevar el nivel freático en la zona contaminada del suelo.



Extracción de vapor del suelo (soil vapor extraction) (EVS)

La EVS es una tecnología en la que se aplica un vacío al suelo, para inducir un flujo controlado y continuo de aire, y remover así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo. El vacío se aplica a través de los pozos de extracción para crear un gradiente de presión/concentración que induce a los volátiles de la fase gaseosa a difundirse a través del suelo hacia los pozos de extracción. Los gases que se extraen son colectados y tratados posteriormente (Lenoir & Tornari, 2004).

La EVS a menudo es usada para remediar sitios contaminados por derrames o fugas de COVs y algunas gasolinas. Se aplica a la zona no saturada de suelos para la extracción de contaminantes volátiles de tipo orgánico. Los costos de operación de la EVS se encuentran entre 10 y 50 USD/m³ (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).

Extracción por solvente

El residuo y el solvente son mezclados en un extracto, disolviendo el contaminante orgánico en el solvente. Se colocan los orgánicos extraídos y el solvente en un separador, donde son apartados para su tratamiento y uso posterior.

Inyección de aire (air sparging)

Se aplica en la zona saturada y en la zona de succión capilar y es complementaria de la extracción de vapores. Consiste en la introducción de aire por debajo del nivel freático a través de canales excavados verticales u horizontales. El aire inyectado hace burbujear la zona saturada y se desplaza el equilibrio vapor-liquido, volatilizándose los COV más insolubles, que se suelen extraer mediante un sistema de extracción de vapores.

Esta tecnología es diseñada para funcionar con altos caudales de aire, además el oxígeno añadido en la corriente de entrada a las aguas y al suelo de la zona no saturada estimula el crecimiento de microorganismos y por tanto, la biodegradación de contaminantes por debajo y por encima del nivel freático (Miliarium, 2008).

Aireación

Es considerado un método de eliminación pasiva para contaminantes volátiles. En este proceso, el suelo se excava y se vierte una fina capa, de unos 20 cm, sobre una superficie impermeable y se espera a que los COV se volatilicen. (Argote Sierra & Martínez de la Hoz, 2011)

Es una técnica de bajo costo, pero también se trata de un proceso muy lento, en el cual los contaminantes son devueltos a la atmósfera, estos compuestos pueden degradarse rápidamente, los hidrocarburos reaccionan fácilmente con los radicales hidroxilo atmosféricos, degradándose en un plazo que va desde un solo día para el dodecano hasta los 9 días para el benceno (Miliarium, 2008).



3.4.3. Tratamiento Térmico *In-Situ*

Algunas de las técnicas de tratamiento térmico *in situ*, son las siguientes:

Extracción de vapores del suelo (EVS) Térmicamente Reforzado

La inyección de aire caliente/vapor o calentamiento eléctrico se utiliza para incrementar la movilidad de los volátiles y facilitar la extracción. El proceso incluye un sistema para manejar los gases extraídos (INECC, 2007).

Tratamiento Electrocinético

Esta técnica es aplicable a la zona saturada, y consiste en la aplicación de una corriente de baja intensidad (que respete costos y respete a los organismos de la zona) entre dos electrodos cerámicos introducidos en la zona contaminada los cuales provocan la migración de las especies con carga. Los compuestos orgánicos cargados positivamente migrarán hacia el cátodo y los compuestos cargados negativamente lo harán hacia el ánodo.

Los costos variarán con la cantidad de suelo a tratar, la conductividad del suelo, el tipo de contaminante, el espacio de electrodos y con el tipo de diseño de proceso empleado. Los costos netos son cercanos a 50 USD/m³ (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).

Vitrificación In Situ

El proceso de vitrificación utiliza energía eléctrica para producir el calor necesario para fundir el suelo. Se implantan varillas, denominadas electrodos, en el área contaminada, se envía una fuerte corriente eléctrica entre los electrodos lo cual funde el suelo que se encuentra entre ellos, la fundición comienza cerca de la superficie del suelo y continúa hacia abajo, a medida que el suelo se funde, los electrodos se hunden más profundamente en la tierra, con lo cual el suelo más profundo también se funde, cuando se corta la energía eléctrica, el suelo fundido se enfría y vitrifica, o se sea convierte en un bloque sólido de material parecido al vidrio, los electrodos pasan a formar parte del bloque.

La vitrificación *in situ* constituye una alternativa agresiva, es aplicable a problemas relativamente superficiales, pero se ha llegado a aplicar con éxito hasta unos 6 m de profundidad (López Almanza, 2012).

Esta técnica es aplicable generalmente para inmovilizar la mayoría de contaminantes inorgánicos. Sin embargo, se ha probado que el proceso también puede destruir o remover COVs, COSs, dioxinas y BPCs (INECC, 2007).

Los costos de operación de la vitrificación varían en función de los costos de energía eléctrica, humedad y profundidad del sitio. Cabe mencionar que en general, se prefiere recurrir al aislamiento que a corto plazo ofrece solución a un menor costo.



Pirólisis

La pirólisis es la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se realiza a presión mayor a la atmosférica y a temperaturas de operación mayores a 430 °C. Los hornos y equipos utilizados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores en ausencia de aire (Riser-Roberts, 1998; Kreiner, 2002).

Se utiliza para tratar COSs y plaguicidas. Puede aplicarse para tratar BPCs, dioxinas, desechos de alquitrán y pinturas, suelos contaminados con creosota y con hidrocarburos. Ha mostrado buenos resultados en la remoción de BPCs, dioxinas, HAPs y otros compuestos orgánicos. La pirólisis no es efectiva para destruir o separar compuestos inorgánicos de un suelo contaminado (INECC, 2007).

3.4.4. Tratamiento Biológico Ex Situ

Algunas de las técnicas de tratamiento biológico *ex situ*, son las siguientes

Composteo

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

El composteo se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con PCP, gasolinas, HTPs, HAPs. Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y toxicidad de explosivos (TNT). El uso de estrategias de composteo, se ha adoptado seriamente hasta los últimos 3 a 5 años (Van Deuren y col., 1997; Semple y col., 2001).

Es una tecnología que puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses. Los costos típicos se encuentran entre 130 y 260 USD/m³ (Riser-Roberts, 1998).

Tratamiento Biológico, fase sólida controlada (Landfarming)

Es una tecnología de biorremediación que requiere al excavación de los suelos contaminados y su disposición sobre una superficie impermeable (normalmente algún tipo de geomembrana). Esta geomembrana está dispuesta sobre la superficie del terreno adyacente a la zona contaminada. Los suelos excavados contaminados,



son mezclados con residuos orgánicos. Los procesos incluyen camas de tratamiento preparadas, células de bio- tratamiento, montones de suelo y composteo.

Se aplica a los suelos contaminados superficialmente y periódicamente se pasa el arado, o bien se cultiva en el suelo para airear los lodos generados (Barbosa Amaya, 2011).

Biopilas

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

Biorremediación en fase de lodos (biorreactores)

Uno de los reactores más utilizados para biorremediar suelos es el biorreactor de lodos, en el cual el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido, y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en la fase sólida. El tratamiento puede realizarse también en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado (Alexander, 1994).

Los biorreactores de lodos aerobios, se utilizan principalmente para tratar HTPs, COSs no halogenados y COVs. Se utilizan también reactores secuenciales de lodos aerobios/anaerobios para tratar BPC's, COS's halogenados, plaguicidas y desechos de artillería (Van Deuren y col., 1997).

Los biorreactores de lodos pueden clasificarse como una tecnología de corto a mediano plazo. El uso de biorreactores de lodos oscila entre 130 y 200 USD/m³ (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).

3.4.5. Tratamiento Físico-Químico Ex Situ

Algunas de las técnicas de tratamiento físico-químico *ex situ*, son las siguientes

Oxidación / Reducción química

La oxidación/reducción química convierte los contaminantes peligrosos a compuestos no peligrosos o menos tóxicos que son más estables, menos móviles o inertes, como agua y dióxido de carbono (INECC, 2007).

La oxidación química es una técnica muy adecuada para la eliminación de ciertos contaminantes orgánicos, sobre todos cuando éstos se encuentran a profundidades considerables, a las que otros métodos no pueden llegar, sin embargo es un método caro de remediación (INECC, 2007).



Es una tecnología de corto a mediano plazo, cuyos costos oscilan entre 190 y 600 USD/m³ (Van Deuren y col., 1997).

Descloración

Consiste en la inyección en el suelo de aditivos como la cal viva (CaO), cal apagada Ca(OH)₂ o sosa NaOH, que provocan un aumento en el pH del suelo hasta valores de 9-11 y un aumento de calor al reaccionar el suelo con ellos. Esta combinación de calor y alcalinidad provoca la descloración de los PCB, que se desprenden de los átomos de Cl presentes en su estructura química (Miliarium, 2008).

Barreras reactivas permeables

Consiste en la intercepción del paso del agua subterránea para eliminar los contaminantes presentes en ella mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Se trata de un sistema reactivo completado por un sistema adicional que conduce el flujo de agua hacia la barrera reactiva, la cual contiene materiales adsorbentes como el carbón activado, agentes reductores y aceptores biológicos de electrones (Miliarium, 2008).

Su funcionamiento es óptimo en suelos arenosos poco compactados con flujo sostenido de aguas subterráneas y la contaminación no debe encontrarse por debajo de los 15 metros de profundidad. (López Almanza, 2012).

Lavado del suelos (soil washing)

Consiste en excavar el suelo contaminado y llevarlo a un sitio preestablecido y formar pilas con éste e instalar drenes dentro de las mismas a través de las cuales se introduce el agua para lavado o agua con surfactante (Jafvert, 1996).

El lavado de suelos se ha utilizado con éxito para tratar suelos contaminados con hidrocarburos, HAPs, PCP, palguicidas y metales pesados. Por medio de inundación, pueden recuperarse compuestos inorgánicos (metales), y tratarse COVs, COSs, gasolinas y pesticidas (INECC, 2007).

Las soluciones utilizadas y los solventes pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo; es difícil tratar suelos poco permeables o heterogéneos; los surfactantes usados en el lavado pueden adherirse al suelo y disminuir su porosidad; los fluidos pueden reaccionar con el suelo reduciendo la movilidad de los contaminantes. En general, se requiere pretratar los suelos con alto contenido de materia orgánica y es necesario tratar los vapores generados (INECC, 2007).

La inundación y el lavado son tecnologías de corto a mediano plazo. Los costos para la inundación oscilan entre 20 y 200 USD/m³, y para el lavado el costo promedio es de 150 USD/m³ (INECC, 2007).



3.4.6. Tratamiento Térmico *Ex Situ*

Algunas de las técnicas de tratamiento térmico *ex situ*, son las siguientes.

Desorción térmica (DT)

Los procesos de desorción térmica (DT) consisten en calentar (90 a 540°C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el fin de vaporizarlos y por consiguiente separarlos del suelo. El calor acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, para posteriormente ser dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases con el uso de un gas acarreador o un sistema de vacío. Es un proceso de separación física no destructivo.

Con base en la temperatura de operación, la (DT) puede clasificarse en dos grupos tal como se muestra en la Figura 40 (EPA, 2001).

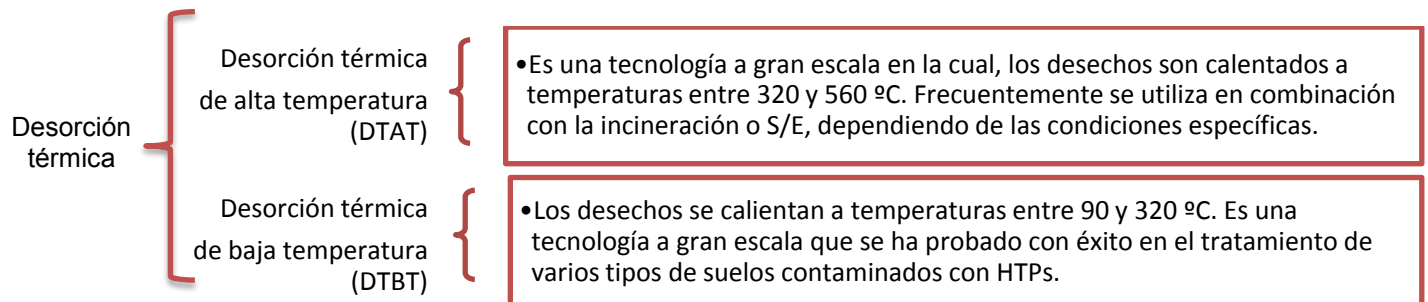


Figura 40 Grupos de técnicas de desorción térmica.

El proceso de DT puede aplicarse en general, para la separación de compuestos orgánicos de desechos, así como para suelos contaminados con creosota e hidrocarburos. Los sistemas de DTBT pueden usarse para tratar COV's no halogenados y gasolinas y, con menor eficiencia, para COS's. Los procesos de DTAT se utilizan principalmente para tratar COS's, HAPs, BPC's y pesticidas, pero pueden aplicarse también para COV's y gasolinas (Van Deuren y col., 1997).

Estas tecnologías no son efectivas en zonas saturadas, suelos muy compactos o con permeabilidad variable, además de que producen emisiones gaseosas (INECC, 2007).

La limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos por DT varía entre 50 y 350 USD/m³. En términos generales, la DT con uso de vapor puede costar más de 400 USD/m³ (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).

Descontaminación por gas caliente

El proceso involucra incrementar la temperatura del suelo contaminado o material por un periodo determinado. El efluente gaseoso del material se trata de un sistema de combustión posterior para destruir todos los contaminantes volatilizados (Barbosa Amaya, 2011).



Incineración

En los procesos de incineración tanto *in situ* como *ex situ*, se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870 a los 1200 °C con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno.

Existen diferentes tipos de incineradores; los tipos de incineradores más comúnmente utilizados se muestran en la Figura 41 (Van Deuren y col., 1997).

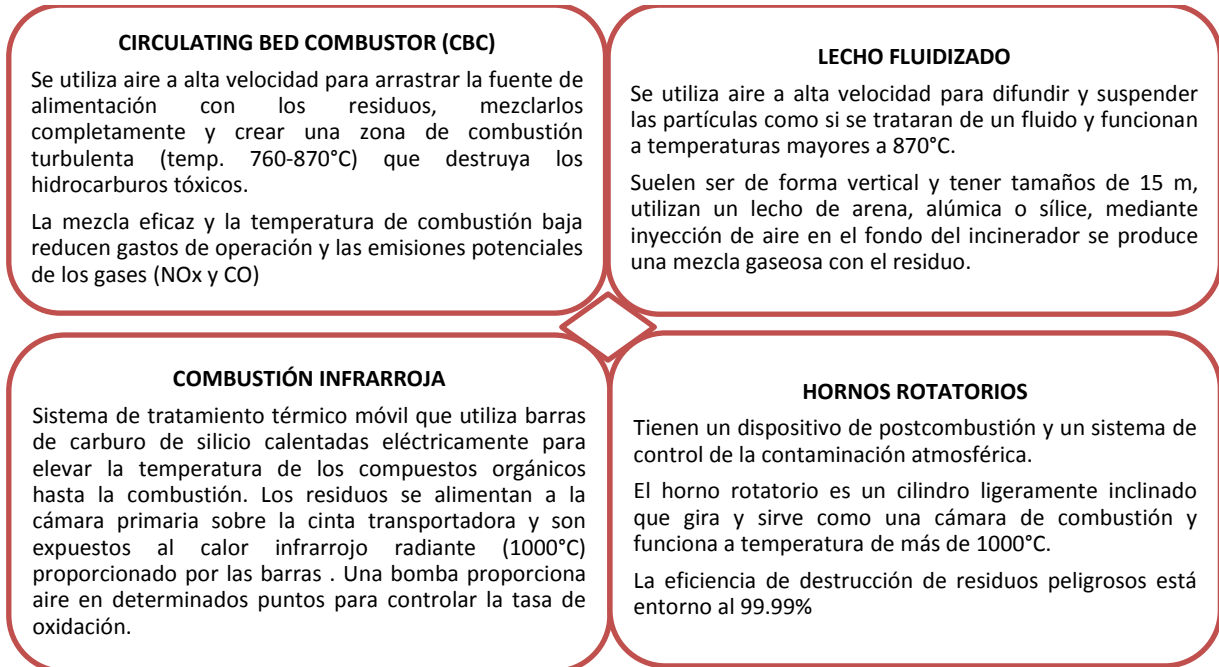


Figura 41 Tipos de sistemas de incineración (Miliarium, 2008).

La cantidad de material que requiere eliminación es muy inferior a la cantidad inicial de material contaminado. Es necesario tratar los gases de combustión (dioxinas y furanos); para el tratamiento de BPCs y dioxinas, deben emplearse incineradores fuera del sitio; los metales pesados pueden producir cenizas que requieren estabilización; para tratar metales volátiles (Pb, Cd, Hg y As) se necesitan sistemas de limpieza de gases; los metales pueden reaccionar con otros compuestos formando compuestos más volátiles y tóxicos. Se usa para remediar suelos contaminados con explosivos, residuos peligrosos como hidrocarburos clorados, BPCs y dioxinas.

Es una tecnología de corto a largo plazo. Los costos de incineradores fuera del sitio oscilan entre 200 y 1000 USD/ton; para tratar suelos contaminados con dioxinas y BPCs los costos van desde los 1500 a 6000 USD/ton. Esta tecnología se costea por peso y no por volumen de material tratado (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).



3.4.7. Trenes de Tratamiento

En algunos casos, dos o más tecnologías innovadoras o tradicionales pueden usarse juntas en lo que se conoce como “trenes de tratamiento” estos son procesos integrados o bien, una serie de tratamientos que se combinan en una secuencia para proporcionar el tratamiento necesario (INECC, 2007).

Se suelen utilizar cuando un suelo está contaminado con compuestos orgánicos y metales, puede tratarse primero por biorremediación para eliminar los compuestos orgánicos y después por S/E para reducir la lixiviación de los metales (López Almanza, 2012).

También puede usarse para hacer un medio más fácilmente tratable por una tecnología subsecuente, para reducir la cantidad de desechos que necesitan un tratamiento posterior con una tecnología subsecuente y más costosa o cuando se desea disminuir el costo total del tratamiento.

Los requisitos que debe de cumplir una técnica de remediación limpia son las siguientes:

- ✓ Reducir la concentración de los contaminantes, como respuesta directa de su aplicación.
- ✓ No transferir los contaminantes de un matriz a otra.
- ✓ Ser irreversible, esto es, no permitir que después de cierto tiempo los contaminantes vuelvan a reaparecer en el lugar.
- ✓ No crear mayores disturbios ambientales que los propios de la contaminación.
- ✓ Ser una tecnología integral que incluya tratamiento de desecho en caso de generarlos.



3.5. IMPLEMENTACIÓN DE LA REMEDIACIÓN

Una vez conocidas las técnicas de remediación existentes, para proceder a la implementación de la técnica de remediación es de suma importancia tener en cuenta los siguientes aspectos, para una remediación efectiva.

3.5.1. Pruebas de Tratabilidad

Antes de seleccionar una técnica de tratamiento es necesario recopilar información detallada sobre el estado del lugar y los contaminantes, así como realizar un estudio de tratabilidad para determinar las posibilidades de éxito de una técnica de remediación, esto se representa en la Figura 42 (EPA, 1996).

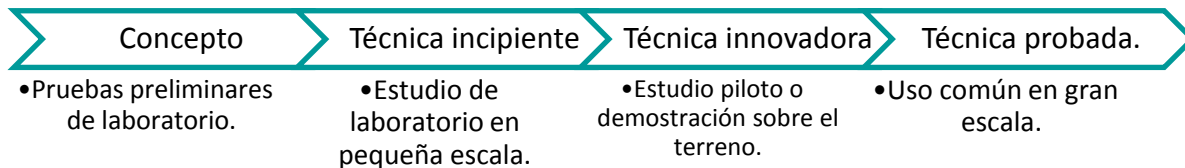


Figura 42 Niveles de estudios de tratabilidad (EPA, 1996).

Prueba preliminar de laboratorio

Es el estudio de tratabilidad más rápido y económico, que se hace con el propósito de obtener más información sobre las características de los desechos a fin de determinar si podría tratarse con una técnica determinada. Una prueba preliminar de laboratorio se puede hacer en cuestión de días y generalmente cuesta entre 10,000.00 y 50,000.00 USD (EPA, 1996).

Prueba de laboratorio en pequeña escala

Consiste en simular un proceso de tratamiento con una cantidad muy pequeña de desechos y proporciona más información sobre la eficacia (y en algunos casos, sobre el costo) de una técnica. El objetivo es determinar si con la técnica se podrán cumplir las normas para la limpieza del sitio. El costo de estas pruebas generalmente se sitúa entre 50,000.00 y 250,000.00 USD (EPA, 1996).

Estudio piloto de tratabilidad

Generalmente se hace sobre el terreno o en el laboratorio y requiere la instalación de equipo de tratamiento, este estudio se usa para establecer objetivos de eficacia, costo y concepción para la técnica de tratamiento. Su costo generalmente supera los 250,000.00 USD, se usa casi exclusivamente para perfeccionar la concepción de la técnica después de otros estudios de tratabilidad (EPA, 1996).



3.5.2. Propuesta de Remediación

Se recopila y sistematiza la información generada en la caracterización y el estudio histórico de un sitio contaminado, con el fin de entender las relaciones y causalidades entre la presencia de los contaminantes, las distintas rutas y vías de exposición y los efectos adversos observados en el medio ambiente o los efectos potenciales que pudieran presentarse (Hernandez & Sánchez, 2011).

- ✓ Recopilar y clasificar toda la información obtenida.
- ✓ Analizar con un grupo de trabajo multidisciplinario.
- ✓ Verificar los datos obtenidos a través de entrevistas con otras fuentes de información.
- ✓ Establecer un sistema de discriminación de información, donde las fuentes oficiales y las que se obtienen con un fundamento normativo son las de mayor valor.

La selección de una tecnología de remediación para un suelo con características particulares, depende de los criterios establecidos en la Figura 43.



Figura 43 Criterios para la selección de una tecnología de remediación (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2005).

Es necesario integrar conceptos de mecánica de fluidos, modelación matemática y aspectos legales, económicos y sociales para dar una solución integral al problema ya que no existe una técnica claramente superior en prestaciones a las demás, sino que su competitividad depende básicamente del binomio suelo-contaminante. Es



decir, solamente tras el conocimiento de los anteriores parámetros resulta posible seleccionar el procedimiento idóneo para la rehabilitación de un suelo contaminado.

En cuanto a los costos, las tecnologías térmicas son más costosas del mercado, mientras que dentro de las más económicas se encuentran las tecnologías de biorremediación aplicadas *in situ*.

En la Tabla 17 se muestran algunas de las características de las tecnologías de tratamiento de suelos.

Tabla 17 Técnicas de remediación de suelos (INECC, 2007).

Técnica	Lugar de Aplicación	Velocidad de tratamiento	Costo económico
<i>Tecnologías de pantalla</i>	<i>In situ</i>	Lenta	Bajo
<i>Vitrificación in situ</i>	<i>In situ</i>	Media	Alto
<i>Reducción de la volatilización</i>	<i>In situ</i>	Solución temporal	Bajo
<i>Estabilización/Solidificación</i>	<i>In situ</i> <i>Ex situ</i>	Rápida	Bajo
<i>Extracción de vapores</i>	<i>In situ</i>	Media	Bajo
<i>Inyección de aire</i>	<i>In situ</i>	Media	Bajo
<i>Aireación</i>	<i>Ex situ</i>	Lenta	Bajo
<i>Extracción por solventes</i>	<i>In situ</i>	Media	Medio
<i>Descontaminación por gas caliente</i>	<i>Ex situ</i>	Media	Alto
<i>Enjuague de Suelos</i>	<i>In situ</i>	Media	Medio
<i>Lavado de Suelos</i>	<i>Ex situ</i>	Rápida	Medio
<i>Tratamiento electrocinético</i>	<i>In situ</i>	Media	Alto
<i>Oxidación-Reducción química</i>	<i>In situ</i>	Rápida	Medio
<i>Barreras reactivas</i>	<i>In situ</i>	Lenta	Medio
<i>Atenuación natural</i>	<i>In situ</i>	Lenta	Bajo
<i>Biodegradación</i>	<i>In situ</i>	Lenta	Bajo
<i>Bioaugmentación</i>	<i>In situ</i>	Lenta	Bajo
<i>Bioestimulación in situ</i>	<i>In situ</i>	Lenta	Bajo
<i>Biorremediación</i>	<i>In situ</i>	Media	Medio
<i>Bioventing</i>	<i>In situ</i>	Media	Bajo
<i>Bioslurping</i>	<i>In situ</i>	Media	Bajo
<i>Landfarming</i>	<i>Ex situ</i>	Media	Bajo
<i>Biopilas</i>	<i>Ex situ</i>	Media	Bajo
<i>Compostaje</i>	<i>Ex situ</i>	Media	Bajo
<i>Biodegradación en fase de lodos</i>	<i>Ex situ</i>	Media	Alto
<i>Fitorremediación</i>	<i>In situ</i>	Lenta	Bajo
<i>Pirólisis</i>	<i>In-situ</i>	Rápida	Alto
<i>Incineración</i>	<i>Ex situ</i>	Rápida	Alto
<i>Desorción térmica</i>	<i>Ex situ</i>	Rápida	Medio

En la Figura 44 se muestran los costos por tonelada de suelo tratado, en función al tipo de tecnología de remediación. Según la EPA en una recopilación de costos y obteniendo un promedio.

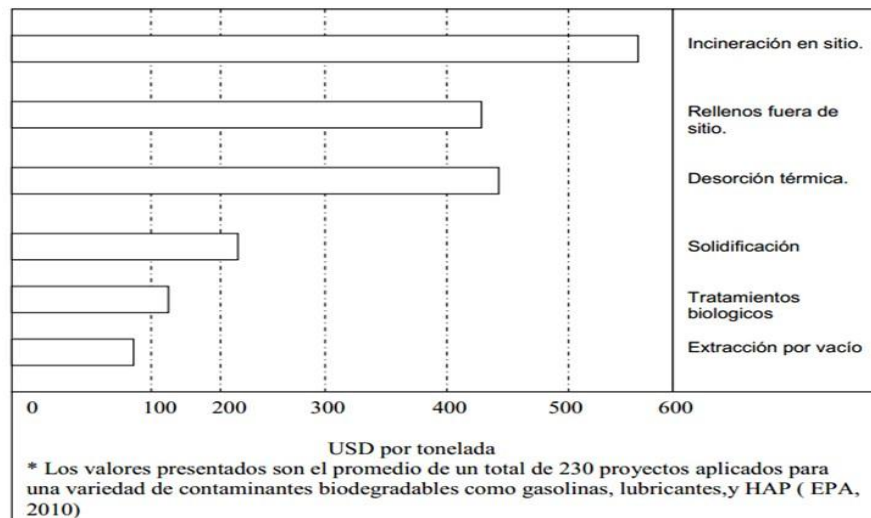


Figura 44 Costos (Dólares USA) promedio por tonelada de suelo tratado, en función al tipo de tecnología de remediación (Barbosa Amaya, 2011).

En la Tabla 18 se presentan los diferentes tipos de contaminantes tratados por diferentes tecnologías de remediación durante los años 2008 – 2010 en Estados Unidos. Siendo el 54% técnicas fisicoquímicas, 31% térmicas y 15% biológicas.

Tabla 18 Tipos de contaminantes tratados por diferentes tecnologías de remediación (EPA, 2010).

Tecnología	COV	COV-H	COS	COS H	BTEX	HAP	H/P	BPC	METALES	TOT
<i>Biológicas</i>										
Biorremediación	25	19	39	8	38	42	28	1	2 ^a	202
Fitorremediación	0	3	0	0	2	0	1	0	1	7
<i>Fisicoquímicas</i>										
TQ	2	3	0	4	1	1	3	3	8 ^d	25
RE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Aireación	0	4	0	1	1	0	0	0	0	6
Inundación	5	8	5	4	6	3	1	0	4	36
EV	31	171	25	24	91	12	2	2	0	358
Lavado	0	0	1	1	0	1	1	1	3	8
S/E	11	15	13	35	7	11	12	30	155	289
ES	1	2	1	3	0	1	0	3	0	11
<i>Térmicas</i>										
DT	12	29	13	20	20	14	9	12	0	129
Incineración	23	48	37	63	29	22	32	38	2 ^c	294
Vitrificación	0	2	0	2	1	0	0	1	0	6
Total de Proyectos	110	305	134	165	196	107	89	91	175	1372

TQ: tratamiento térmico; RE: remediación electrocinética; EV: extracción de vapores; S / E: solidificación / estabilización; ES: extracción de solventes; DT: desorción térmica. COV: compuestos orgánicos volátiles; COV- H: COV halogenados; COS: compuestos orgánicos semi- volátiles; COS-H; COS halogenados; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; HAP: hidrocarburos aromáticos policíclicos; H / P: herbicidas y pesticidas orgánicos; BPC: bifenilos policlorados.

a. Biorremediación de cromo hexavalente: reducción del Cr (VI) a Cr(III)

b. Reducción química de Cr(VI) a Cr (III)

c. Incineración de compuestos orgánicos (alta temperatura), con recuperación de metales de Pb o Hg.

Fuente: EPA (2010)



De acuerdo a la “Relación de empresas autorizadas para la prestación de servicios de remediación de suelos contaminados y materiales semejantes a suelos contaminados” por parte de la SEMARNAT en su versión actualizada el 30 de abril de 2014, en México existe un total de 234 empresas autorizadas para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y materiales semejantes a suelos contaminados, estos son todos aquellos materiales que por sus propiedades mecánicas, físicas y químicas presentan semejanzas con los suelos contaminados, tales como lodos de presas, lodos y sedimentos de cárcamos, lodos y sedimentos de tanques de almacenamiento, entre otros.

Como se puede observar en la Figura 45, aproximadamente el 50% de éstas empresas están localizadas en el Distrito Federal y en Veracruz, Así como también hay empresas en Tabasco, Estado de México, Nuevo León, Tamaulipas, Puebla, Coahuila, Guanajuato, Michoacán, y en Otros estados como lo son: Campeche, Oaxaca, San Luis Potosí, Sinaloa, Baja California, Chihuahua ,Hidalgo, Querétaro y Yucatán. Cabe recordar que Veracruz, Tabasco, Tamaulipas, Campeche, Guanajuato y Oaxaca son los estados con más sitios contaminados.

Ubicación de las Empresas Mexicanas autorizadas para la remediación de suelos contaminados.

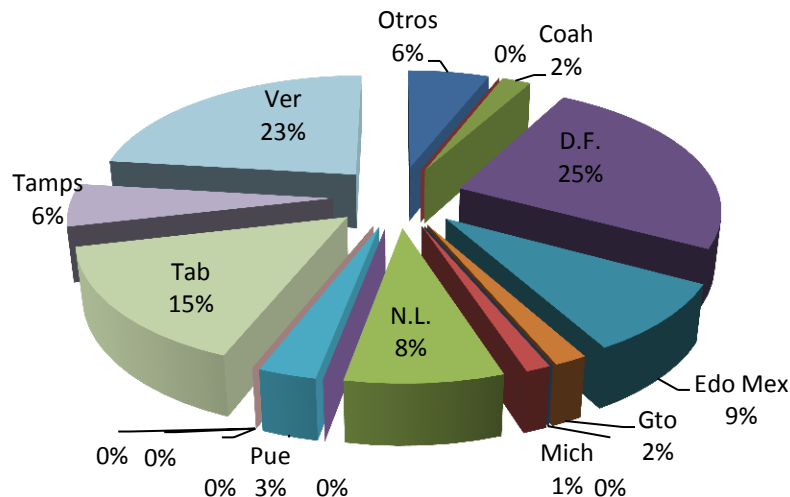


Figura 45 Ubicación de las Empresas Mexicanas autorizadas para la remediación de suelos contaminados (SEMARNAT, 2014).

Dentro de los contaminantes tratados, principalmente se encuentran los suelos y materiales semejantes a suelos, contaminados con hidrocarburos, lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación.

Aunque también se encuentran alrededor de 15 empresas que realizan remediación en suelos contaminados con ácidos y bases, 4 empresas que se dedican a la remediación de lodos aceitosos acumulados en obras e instalaciones de PEMEX utilizando la precipitación química y separación física de las fases sólida y líquida por centrifugación y filtración (*off site*), 3 empresas que tratan lodos plomizos por medio



de procesos fisicoquímicos a base de precipitación química y separación física de las fases sólida y líquida por centrifugación y filtración.

Sólo una empresa ofrece restauración de suelos contaminados con metales pesados (Cr VI, As, Be, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se, V, Tl) a través del método de solidificación/estabilización (*off site*).

Como se muestra en la siguiente figura de las empresas autorizadas para remediar suelos contaminados, la mayoría utiliza métodos biológicos (biorremediación por biopilas, biorremediación por landfarming y bioventeo aerobio), oxidación química y la extracción de vapores para el tratamiento.

El lavado de suelos, la neutralización química, la estabilización/solidificación, la desorción térmica y otros procesos como los son; la centrifugación, la precipitación química y separación física de las fases sólida y líquida por centrifugación y filtración, extracción por solventes, reacción química entre dos productos, un emulsificante y un silicato con el residuo dando como resultado un encapsulamiento, composteo, constituyen otra parte importante de las tecnologías más empleadas en México. La Figura 46 muestra los tipos de tratamientos utilizados en México.

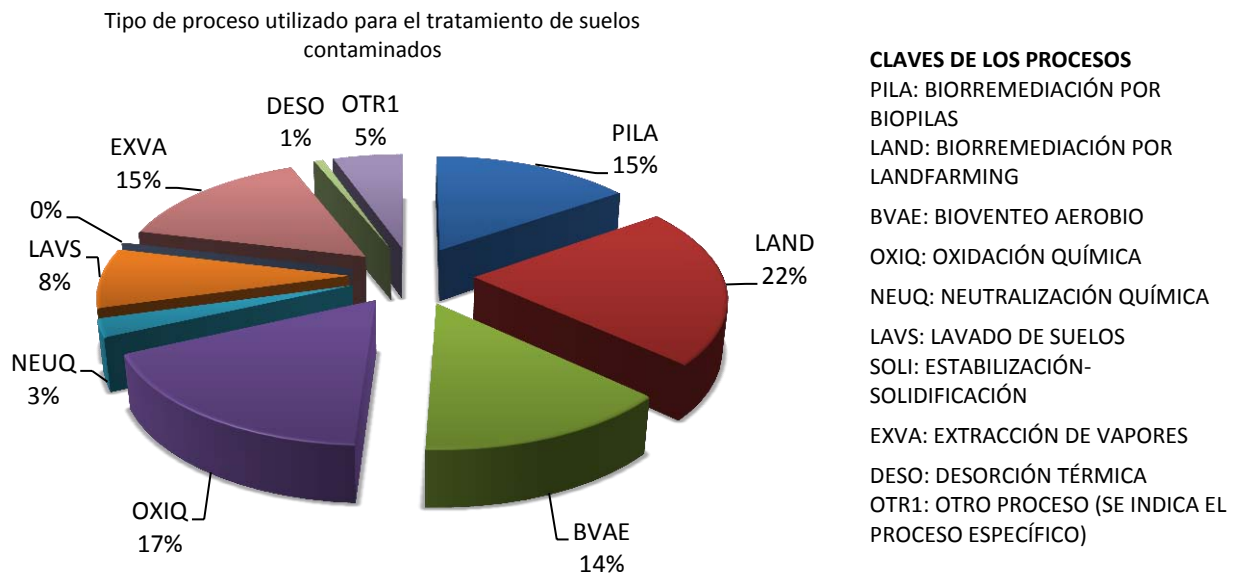


Figura 46 Tipo de tratamiento utilizado por las empresas autorizadas en México para la remediación de suelos contaminados (SEMARNAT, 2014).

El 57% de estas empresas utiliza proceso *off site* y el 40% utiliza procesos *in situ*, siendo tan solo un 3% los procesos realizados *ex situ*.

En la elección de la mejor alternativa de remediación es fundamental conocer cuáles son las empresas que realizan este tipo de tratamientos, que método emplean para ello, esto con el fin de elaborar una efectiva propuesta de remediación.



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

“Solo veinte centímetros del suelo, separan al hombre del hambre” así como en la conferencia “Cultivando el Futuro” (Regional Aapresid, 2012) el Doctor Gastón Fernández utilizó esta frase para concientizar a los productores presentes sobre la importancia de cuidar el medio ambiente, participar con las instituciones, producir sustentablemente y sobre todo comprometerse con la actividad agropecuaria, en efecto, el suelo es el elemento central en la producción de alimentos y soporte de la infraestructura, entre muchas otras funciones importantes que realiza, por lo cual se debe aplicar una correcta y efectiva remediación ante las emergencias ambientales a causa de las fugas de hidrocarburos en el suelo, con el fin de preservar este importante elemento natural.

Los impactos ambientales provenientes de accidentes deben prevenirse al máximo, mediante inspecciones y mantenimiento adecuado y sistemático. Así como contar con un mecanismo de respuesta rápida. Así como también en las operaciones diarias debe darse puntual seguimiento al cumplimiento de obligaciones ambientales.

Recordemos que si se cumple con las obligaciones ambientales: contención, limpieza, caracterización y remediación no tenemos de que preocuparnos, de lo contrario, su incumplimiento puede ser sancionado por diferentes vías. Por la Autoridad Ambiental (LFRA), Penal (CPF), Administrativa (LGEEPA, LGPGIR), Civil (CCF y CFPC), Juicio ante Tribunales Federales, Amparo, así como también Acciones Colectivas.

Se recomienda la elaboración de un diagnóstico interno de los sitios contaminados (vinculación operativa de especialistas ambientales con líneas de mando). Detección oportuna de focos rojos (sitios contaminados relevantes por extensión, gravedad, impacto mediáticos). Programar acciones y disponibilidad presupuestal. Así como darle seguimiento y rendición de cuentas sobre los sitios caracterizados y/o remediados.

La restauración de algunos suelos contaminados es necesaria para eliminar el riesgo a los humanos ya que algunos contaminantes son extremadamente tóxicos y pueden llegar a ser carcinogénicos.

En la actualidad existen diversos métodos para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, con el fin de conocer el método más adecuado, que ofrezca mejores resultados en un menor tiempo y a un costo más accesible es de suma importancia una buena caracterización, especializada del sitio, ya que cada suelo es diferente, va a tener propiedades distintas y los elementos que entren estarán móviles en manera distinta respondiendo a las propiedades del suelo.



El éxito de un proyecto de remediación de una pluma de hidrocarburo depende enteramente del entendimiento geológico e hidrogeológico del entorno. Es necesario integrar conceptos de mecánica de fluidos, modelación matemática y aspectos legales, económicos y sociales para dar una solución integral al problema.

Se están realizando muchas investigaciones referentes a los proceso de remediación de sitios contaminados con hidrocarburos, donde el ingenio, la curiosidad y el intelecto humano se demuestran a cada instante, en el presente trabajo me dedique a investigar algunos estudios los cuales nos pudieran ahorrar tiempo y dinero si se aplican desde el inicio de la caracterización, muchos de ellos están aún en procesos pilotos, pero todas estas investigaciones dan paso a grandes avances en la ciencia, a los cuales tenemos que estar muy al pendiente ya que estos nos podrían ahorrar costos y tiempo si son manejados adecuadamente.

La legislación en este tema está en contante cambio ya que es un tema nuevo, antes de 1998 no existía ningún tipo de regulación en este tema, cada vez la regulación es más exigente, es necesario mantenerse al día, informándonos diariamente a cerca de la nueva regulación, no atemorizarnos con la cantidad de información que encontramos, o la que no encontramos tanto en la literatura como en la red, si no perder de vista el objetivo principal, organizarla, analizarla, estructurarla y hacerla funcional tal y como se procedió a la realización de ésta guía.

Para dar atención a la remediación de un sitio contaminado, es muy complejo, no olvidemos que el suelo es un ser vivo, puede reaccionar de manera favorable o desfavorable a los mecanismos utilizados, tenemos que ser cuidadosos y no perder la calma, ni las esperanzas ya que nuestro planeta lo vale.

La remediación de sitios contaminados está en constante aumento, lo cual es un indicador del impacto positivo producto de los cambios introducidos en la gestión y el medio ambiente.

Con este trabajo se ha logrado tener una guía metodológica que permitirá planear de forma ágil proyectos de remediación de sitios contaminados. Como dijera Friedrich Engels "Una onza de acción es el valor de una tonelada de teoría". Pero es fundamental cada gramo de teoría.



BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, L. (Marzo de 2013). *Suelos*. Recuperado el 06 de Abril de 2014, de Diplomado en Gestión Ambiental para la Industria Petrolera.
- Alemán Caporal, A. (Septiembre de 2009). *"Determinación de hidrocarburos totales del petróleo en suelos y sedimentos de la cuenca del Río Coatzacoalcos"*. Recuperado el febrero de 2014, de Universidad Veracruzana: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/12345678/915/1/Arizbeth%20Melanie%20Aleman%20Caporal.pdf>
- Andromalos, K., & Sarubbi, A. (24 - 27 de noviembre de 1998). *"Tratamientos de Contención y Control - Monitoreo"*. Recuperado el 01 de Junio de 2014, de Curso Latinoamericano de especialización en técnicas de remediación ambiental, AIDIS: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/remediacion/tema09.pdf>
- ArcGIS. (2015). *Introducción al SIG*. Recuperado el 18 de marzo de 2014, de ArcGIS Resources: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000t000000.htm>
- Argote Sierra, C., & Martínez de la Hoz, J. (2011). *Comparación técnica del método Endrill con los métodos convencionales de tratamiento de cortes de perforación*. Recuperado el 23 de mayo de 2014, de Universidad Industrial de Santander: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/919/2/142173.pdf>
- Arroyo, M., & Quesada, R. (s.f.). *Aplicación de sistemas de biorremediación de suelo y aguas contaminadas por hidrocarburos*. Recuperado el 10 de febrero de 2014, de Instituto Geológico y Minero de España. GEOCISA. Div. Protección Ambiental de Suelos. : <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdf/lib15/028.pdf>
- ASTM. (1995). *"Guía de Normas para la Acción Correctiva Basada en Riesgos [Risk-Based Corrective Action (RBCA)], de Aplicación en Sitios con Fuga de Petróleo"*. Recuperado el 11 de febrero de 2014, de Ingeniero Ambiental: [http://www.ingenieroambiental.com/4031/00069-AST\[1\]...pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4031/00069-AST[1]...pdf)
- ATSDR. (2014). *Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades*. Recuperado el 15 de mayo de 2014, de <http://www.atsdr.cdc.gov/es/>
- Barbosa Amaya, H. (Agosto de 2011). *Remediación de Suelos*. Recuperado el 11 de Marzo de 2014, de Tecnológico de Estudios Superiores Oriente del Estado de México: <http://www.tesoem.edu.mx/alumnos/cuadernillos/2011.038.pdf>
- Bautista Zúñiga, F. (2011). *Técnicas de Muestreo para manejadores de recursos naturales*. Recuperado el 10 de junio de 2014, de Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.: <http://www.ciga.unam.mx/ciga/images/stories/publicaciones/libros/tmestreo.pdf>
- Benavides López de Mesa, J., Quintero, G., Guevara Vizcaíno, A., Jaimes Cáceres, D., & Gutiérrez Riaño, S. (22 de junio de 2006). *Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo*. Recuperado el 09 de Marzo de 2014, de Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca (UNICOLMAYOR): http://www.unicolmayor.edu.co/invest_nova/NOVA/ARTREVIS1_5.pdf



- Carter, M., & Gregorich, E. (2006). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Recuperado el febrero de 2014, de Canadian Society of Soil Science: http://www.planta.cn/forum/files_planta/methods_of_analysis_212.pdf
- Cortés Lucas, A. (2007). *Los Suelos Contaminados y su gestión*. Recuperado el 18 de marzo de 2014, de Universidad de Barcelona: http://constructopostnormal.files.wordpress.com/2007/03/microsoft-powerpoint-presentaci_363n-1-chile.pdf
- Davis, G., Patterson, T., & Patterson, B. (Julio de 2004). *"Petroleum and Solvent Vapours: Quantifying their Behaviour, Assessment and Exposure"*. Recuperado el febrero de 2014, de CSIRO Land and Water Report: http://www.clw.csiro.au/publications/consultancy/2004/WA_DoE_Vapour_Review.pdf
- Dorronsor, C. (09 de octubre de 2013). *Constituyentes del Suelo. Fase sólida*. Recuperado el 10 de agosto de 2014, de Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada. España.: <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema02/m1solida.htm>
- Douglas, W., Milton, L., & Keith, D. (Septiembre de 1981). *"Chemical Class Separation and Characterization of Organic Compounds in Synthetic Fuels"*. Recuperado el 3 de marzo de 2014, de American Chemical Society: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ac00234a017>
- EPA. (Abril de 1996). *Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras Para suelos contaminados, fango residual, sedimentos y detritos*. Recuperado el 13 de mayo de 2014, de Contaminated Site, Clean-Up Information: <http://www.clu-in.org/download/remed/spaninno.pdf>
- EPA. (Abril de 1996). *Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras Para suelos contaminados, fango residual, sedimentos y detritos*. Recuperado el 18 de Abril de 2014, de EPA: <http://www.clu-in.org/download/remed/spaninno.pdf>
- EPA. (Enero de 2003). *Guía para el Ciudadano sobre Vitriificación*. Recuperado el 28 de 11 de mayo de 2014, de EPA: http://www.epa.gov/superfund/action/spanish/pdfs/es_vitrification.pdf
- Facultad de Ingeniería. UNAM. (1 de octubre de 2012). *"6° Curso de Remediación de Suelos y Acuíferos"*. Recuperado el 27 de mayo de 2014, de División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra: http://www.dict.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=163&Itemid=99
- Fernández Linares, L., Rojas Avelizapa, N., & Roldán Carrillo, T. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Recuperado el 16 de marzo de 2014, de Publicaciones, Instituto Nacional de Ecología: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/509.pdf>
- Flores Baca, M. (Marzo de 2013). *Evaluación de Riesgo Ambiental*. Recuperado el 19 de mayo de 2014, de Diplomado de Gestión Ambiental para la Industria Petrolera.
- Flores Puente, M., Torras Ortiz, S., & Téllez Gutiérrez, R. (2004). *Medidas de Mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de Hidrocarburos*



- en infraestructura de transporte terrestre*. Recuperado el 14 de abril de 2014, de Instituto Mexicano del Transporte (IMT):
<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt257.pdf>
- Flores Serrano, R. (Marzo de 2013). *Evaluaciones de riesgo ambiental para establecer niveles de remediación en sitios contaminados*. Recuperado el 10 de marzo de 2014, de 1er curso sobre soluciones a la contaminación de suelo y acuíferos.
- García Morales, D. (Marzo 2013). Proceso de atención a emergencias ambientales por derrame de hidrocarburos. *Gerencia de Protección Ambiental, Pemex Refinación*. México D.F.: 1° Curso sobre soluciones a la contaminación de suelo y acuíferos.
- Greenpeace. (2013). *Derrame de Petroleo en Coatzacoalcos, Veracruz. Un año sin sanciones*. Recuperado el 20 de agosto de 2014, de Cronica de los hechos. :
http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2013/Derrame_Coatzacoalcos.pdf
- Hernandez, J. L., & Sánchez, V. M. (01 al 3 de agosto de 2011). *Levantamiento técnico de sitio*. Recuperado el 06 de marzo de 2014, de Curso sobre Remediación de sitios contaminados. RelASC:
http://www.relascmex.org/pdfs/curso-remediacion-agosto-2011/2-1_Levantamiento_tecnico_sitio_Victor_Granados.pdf
- Hernandez-Espíritu., A. (Marzo de 2013). *La importancia de la modelación matemática como herramienta predictiva en la remediación de acuíferos*. Recuperado el 28 de marzo de 2014, de 1er Curso sobre Soluciones a la contaminación de suelos y acuíferos". Instituto de Ingeniería, UNAM.
- INECC. (15 de 11 de 2007). *Tecnologías de Remediación*. Recuperado el mayo de 2014, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/372/tecnolog.html>
- INECC. (15 de 11 de 2007). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados por EPT*. Recuperado el 20 de Febrero de 2014, de Publicaciones, Instituto Nacional de Ecología:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/459/cap4.html>
- INECC. (s.f.). *Prevención y control de la contaminación del suelo*. Recuperado el Mayo de 2014, de Instituto Nacional de Ecología:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/133/prevencion.html>
- Instituto de Ingeniería. (Marzo de 2013). *"1° Curso sobre soluciones a la contaminación de suelo y acuíferos"*. Recuperado el 25 de Mayo de 2014, de Instituto de Ingeniería, UNAM.: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/Videoteca/Paginas/ContaminacionSuelosAcuiferos.aspx#>
- Instituto Nacional de Ecología. (15 de noviembre de 2007). *"Fuentes de contaminación en México"*. Recuperado el 07 de mayo de 2014, de Instituto Nacional de Ecología:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/372/fuentes.html>
- Iturbe Argüelles , R. (2013). *Lavado de suelos con alto contenido de finos*. Recuperado el 19 de mayo de 2014, de Instituto de Ingeniería :



- <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/SolucionesContaminacionSuelo/RosariolturbeArguelles.pdf>
- IUSS. (2014). *International Union of Soil Sciences*. Obtenido de <http://www.iuss.org/>
- IUSS-ISRIC-FAO. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Recuperado el 06 de Marzo de 2014, de Food and Agriculture Organization of de United Nations (FAO): <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a0510s/a0510s00.pdf>
- Jacott, M., Arias, J., Guzmán, H., & Franco, A. (2011). *"Impactos de la actividad petrolera y en la salud humana y el ambiente"*. Recuperado el 03 de marzo de 2014, de México Tóxico:
http://www.mexicotoxico.org.mx/sites/default/files/pdf/documentos/impacto_del_petroleo.pdf
- Jiménez, R. (10 de mayo de 2013). Suelos, mecanismos de contaminación y técnicas de remediación. *Diplomado en Gestión Ambiental en la Industria Petrolera*. Facultad de Química.
- Jordán Lopez, A. (Curso de 2005-2006). *"Manual de Edafología"*. Recuperado el 22 de abril de 2014, de Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química, Agrícola de la Universidad de Sevilla.: <http://biblioteca.utsem-morelos.edu.mx/files/asp/topografia/manual%20De%20Edafologia-Jordan.pdf>
- Lasser, J., & Saval, S. (2004). *Beneficios y limitaciones de los métodos geofísicos en detección de manchas de contaminación por hidrocarburos*. Recuperado el 20 de mayo de 2014, de Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (Geohidrología y contaminación de acuíferos): <http://lesser.com.mx/esp/pub/04-2%20Metodos%20Geofisicos%20en%20Deteccion%20de%20Manchas.pdf>
- Lenoir, C., & Tornari, G. (Octubre de 2004). *Contaminación y Tratamiento de Suelo*. Recuperado el 09 de marzo de 2014, de Sustentabilidad UAIS:
http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/cont_y_tratam_suelos.pdf
- LFRA. (24 de Junio de 2009). *Código Penal Federal*. Recuperado el 20 de marzo de 2014, de Diario Oficial de la Federación:
http://www.oas.org/juridico/spanish/mesicic3_mex_anexo7.pdf
- LFRA. (07 de Junio de 2013). *Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA)*. Recuperado el 19 de marzo de 2014, de Diario Oficial de la Federación:
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFRA.pdf>
- LGEEPA. (16 de enero de 2014). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)*. Recuperado el 12 de mayo de 2014, de Diario Oficial de la Federación, Última Reforma:
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>
- LGPGIR. (04 de Junio de 2014). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*. Recuperado el 28 de julio de 2014, de Diario Oficial de la Federación, Última Reforma:
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_040614.pdf
- LGPGIR. (04 de junio de 2014). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*. Recuperado el 28 de julio de 2014, de Diario Oficial de la Federación, Última Reforma:
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_040614.pdf



- López Almanza, E. (Diciembre de 2012). *Remediación de Suelos*. Recuperado el 02 de mayo de 2014, de Instituto Tecnológico Superior de Irapuato:
<http://es.slideshare.net/lobezno81/remediacion-curso>
- Mallea Alvarez, M. (s.f.). *Remediación se suelos contaminados y análisis de un proyecto piloto en Chile, en el marco del sistema de evaluación de impacto ambiental*. Recuperado el 24 de mayo de 2014, de Asociación Chilena de Derecho Ambiental:
<http://www.achidam.cl/documentos/Remediaciondesueloscontaminados.pdf>
- Martínez, V., & López, F. (2001). *Efecto de Hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso*. Recuperado el 3 de mayo de 2014, de Revista Terra Latinoamericana: <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/19/1/art9-17.pdf>
- Massachusetts Institute of Technology. (s.f.). *Waste Containment and Remediation Technology*. Recuperado el 17 de abril de 2014, de Massachusetts Institute of Technology: <http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-34-waste-containment-and-remediation-technology-spring-2004/lecture-notes>
- Matus, C. (15 de agosto de 2013). *Periodistas en español.com*. Recuperado el 15 de agosto de 2014, de <http://periodistas-es.com/mexico-exigen-justicia-por-contaminacion-petrolera-5425>
- Miliarium. (2008). *Técnicas de remediación de suelos contaminados*. Recuperado el 04 de febrero de 2014, de Miliarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente.:
<http://www.miliarium.com/Prontuario/TratamientoSuelos/Welcome.asp>
- Ministerio de Energía y Minas. (Octubre de 2000). *Guía para el muestreo y análisis de suelo*. Recuperado el 23 de marzo de 2014, de Ministerio de Energía y Minas:
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/regionales/Publicaciones/GUIA%20HIDROCARBUROS%20XVII.pdf>
- Morales, A. T. (7 de enero de 2012). *Denuncia Greenpeace desastre ecológico por derrame de petróleo*. Recuperado el 19 de agosto de 2014, de La Jornada:
<http://www.jornada.unam.mx/2012/01/07/economia/023n2eco>
- Noguera Cáceres, J. (11 de diciembre de 2003). *Caracterización de zonas contaminadas por métodos geoquímicos*. Recuperado el Abril de 2014, de Tesis Doctorales en Red, Universidad Autónoma de Barcelona:
<http://www.tdx.cat/handle/10803/3436>
- PEMEX. (2013). "Séptimo seminario internacional de respuesta a emergencias, caracterización y remediación de sitios impactados por hidrocarburos". México D.F.
- Pemex Refinación . (2006-2012). *Infraestructura de Plantas de Proceso, Sistema de Ductos y Terminales de Almacenamiento y Reparto*. Recuperado el 3 de mayo de 2014, de Pemex Refinación:
<http://www.ref.pemex.com/files/content/03transparencia/RC/REF05.pdf>
- Pemex Refinación. (Noviembre de 2014). Producciones.
- Peña, C., Carter, D., & Ayala-Fierro, F. (2011). *Toxicología Ambiental: Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental*. Recuperado el 16 de marzo de 2014, de



- Universidad de Arizona:
<http://superfund.pharmacy.arizona.edu/content/toxicologia-ambiental>
- Pérez Jiménez, C. J. (2014). *Técnicas Analíticas*. Recuperado el 11 de mayo de 2014, de Universidad de Zaragoza Modelado y evaluación de prestaciones de sistemas informáticos:
http://webdiis.unizar.es/asignaturas/SPN/material/tecnicas_analiticas.pdf
- Pérez, É. Á. (08 de abril de 2014). "Pemex reporta 52 tomas clandestinas en Puebla". Recuperado el 21 de agosto de 2014, de El Universal.:
<http://www.eluniversal.com.mx/estados/2014/pemex-puebla-tomas-clandestinas-1001683.html>
- PROFEPA-SEMARNAT. (2012). *Emergencias Químicas Reportadas a la PROFEPA (Período 2000-2012)*. Recuperado el 12 de febrero de 2014, de PROFEPA:
http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/215/1/analisis_de_emergencias_2000_2012.pdf
- RBCA. (Diciembre de 2008). *Risk-based corrective action (RBCA) para suelos contaminados*. Recuperado el 11 de marzo de 2014, de Terratest Medio Ambiente: <http://www.terratest.es/doceventos/folletosrbca.pdf>
- Regional Aapresid. (18 de octubre de 2012). *Regional Aapresid*. Recuperado el 14 de Agosto de 2014, de <http://www.aapresid.org.ar/regionales/cultivando-el-futuro-en-tres-arroyos/>
- ReLASC. (02 de agosto de 2011). "Curso de Capacitación sobre Remediación de sitios contaminados", *Contaminated Site, Clean-Up Information*. Recuperado el 23 de junio de 2014, de ReLASC: https://www.clu-in.org/conf/tio/relascmex2_080211/prez/relascmex2bw.pdf
- Romero Torres, T., Cortinas de Nava, C., & Gutiérrez Avedoy, V. (Junio de 2009). "Diagnóstico nacional sobre la situación de los contaminantes orgánicos persistentes en México". Recuperado el 12 de junio de 2014, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/new.consultaPublicacion.php>
- Sabroso González, M., & Pastor Eixarch, A. (2004). *Guía sobre suelos contaminados*. Recuperado el 10 de febrero de 2014, de CEPYME Aragón:
http://www.conectapyme.com/files/medio/guia_suelos_contaminados.pdf
- Santos, J., Humberto, R., & Gutiérrez, M. (30 de junio de 2008). *Diseño de un sistema de tratamiento para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos aplicando el método de biolabranza*. Recuperado el 01 de abril de 2014, de Instituto de Geografía, UNAM. Red de Ciencias Ambientales:
http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EO/TAO-20.pdf
- Saval. (14 de marzo de 2013). *Bases Bioquímicas de la biorremediación*. Recuperado el 25 de mayo de 2014, de 1er Curso sobre soluciones a la contaminación de suelo y acuíferos. Instituto de Ingeniería.:
<http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/SolucionesContaminacionSuelo/SusanaSavalBohorquez.pdf>



- Saval Bohórquez, S. (1-3 de agosto de 2011). *Plan de Muestreo*. Recuperado el 11 de abril de 2014, de Encuentro Latinoamericano sobre Remediación de Sitios Contaminados.: http://www.relascmx.org/pdfs/curso-remediacion-agosto-2011/3-1_plan_muestreo_Susana_Saval.pdf
- Schwab, A., Wetzel, S., & Pekarek, S. (1999). *Extraction of Petroleum Hydrocarbons from Soil by Mechanical Shaking*. Recuperado el 14 de febrero de 2014, de Environmental Science & Technology: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es9809758>
- SEMARNAT. (31 de diciembre de 2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000*. Recuperado el 27 de Marzo de 2014, de PROFEPA: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>
- SEMARNAT. (23 de abril de 2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-060-SEMARNAT-1994*. Recuperado el 16 de marzo de 2014, de SEMARNAT: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3345/1/NOM-060-SEMARNAT-1994.pdf>
- SEMARNAT. (Septiembre de 2010). *"Guía Técnica para Orientar en la Elaboración de Estudios de Caracterización de Sitios Contaminados"*. Recuperado el 23 de marzo de 2014, de ReLASC: <http://relascmx.org/pdfs/guia-caracterizacion-pdfs/00-guiacompleta.pdf>
- SEMARNAT. (2012). *Normas Mexicanas en Materia de Contaminación del Suelo*. Recuperado el 10 de marzo de 2104, de SEMARNAT: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nmx-suelo>
- SEMARNAT. (30 de abril de 2014). *Relación de Empresas Autorizadas para la prestación de servicios de remediación de suelos contaminados*. Recuperado el 07 de junio de 2014, de SEMARNAT: <http://tramites.semarnat.gob.mx/images/stories/menu/empresas/rubro15.pdf>
- SEMARNAT-SSA1. (10 de septiembre de 2013). *NORMA Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación*. Recuperado el 04 de marzo de 2014, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013
- Singh, A., & Ward, O. (2004). *Soil Biology: Applied Bioremediation and Phytoremediation*. Recuperado el 14 de febrero de 2014, de Springer: http://download.springer.com/static/pdf/739/bfm%253A978-3-662-05794-0%252F1.pdf?auth66=1411329319_268159529562915a966d7f9b47d68ad9&ext=.pdf
- Torres Delgado, K., & Zuluaga Montoya, T. (2009). *Biorremediación de Suelos Contaminados por Hidrocarburos*. Recuperado el 28 de marzo de 2014, de Biblioteca Digital, Universidad de Colombia.: http://www.bdigital.unal.edu.co/815/1/32242005_2009.pdf
- UAIS. (Diciembre de 2007). *Programa de difusión e investigación en Sustentabilidad*. Recuperado el 07 de abril de 2014, de Universidad Abierta Interamericana,



- Centro de Altos Estudios Globales, Desarrollo Sustentable.:
http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/uaisreview/uaisreview_no1.pdf
UNICAUCA. (28 de septiembre de 2009). *Métodos Geofísicos*. Recuperado el 16 de Mayo de 2014, de Universidad de Cauca:
[ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/.cuentasbajadas29092009/lucruz/docs/Curso %20Fundaciones/Exposiciones%20estudiantes/metodos%20geofisicos.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/.cuentasbajadas29092009/lucruz/docs/Curso%20Fundaciones/Exposiciones%20estudiantes/metodos%20geofisicos.pdf)
Universidad Nacional de La Plata. (01 de enero de 2000). *Técnicas de bioremediación ensayos de tratabilidad - Nivel II*. Recuperado el 14 de abril de 2014, de Estructplan on line:
<http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?idarticulo=588>
USDA. (2014). *United States Department of Agriculture*. Recuperado el 12 de febrero de 2014, de
http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome?navid=EN_ESPANOL
Velasco Trejo, J. A., & Volke Sepúlveda, T. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología.
Vinardell González, J. (11 de julio de 2008). *Biorremediación: aspectos generales. Biorremediación de: metales pesados, vertidos de petróleo, xenobióticos. Fitorremediación*. Recuperado el 19 de marzo de 2014, de Biotecnología medioambiental, Universidad de Sevilla:
<http://personal.us.es/jvinar/Tema%2022Bt%200708.pdf>
Volke Sepúlveda, T. (2002). Biorremediación de suelos contaminados. *BioTecnología*, 24-39.
Volke Sepúlveda, T. L., & Velasco Trejo, J. A. (Noviembre de 2003). “*Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*”. Recuperado el 7 de junio de 2014, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.:
<http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/composteo2003.pdf>
Volke Sepúlveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (01 de enero de 2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. Recuperado el 11 de marzo de 2014, de Instituto Nacional de Ecología:
[http://books.google.com.mx/books?id=A50ITx37ScsC&pg=PA59&lpg=PA59&dq=En+general+los+materiales+no+consolidados+\(arenas+y+gravas+finas\)+son+m%C3%A1s+f%C3%A1ciles+de+tratar.+Asimismo,+a+mayor+tama%C3%B1o+de+part%C3%ADcula+en+la+fracci%C3%B3n+mineral,+la+per](http://books.google.com.mx/books?id=A50ITx37ScsC&pg=PA59&lpg=PA59&dq=En+general+los+materiales+no+consolidados+(arenas+y+gravas+finas)+son+m%C3%A1s+f%C3%A1ciles+de+tratar.+Asimismo,+a+mayor+tama%C3%B1o+de+part%C3%ADcula+en+la+fracci%C3%B3n+mineral,+la+per)



Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 1 de 28	

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

*GUÍA PARA LA PLANEACIÓN DE
PROYECTOS DE CARACTERIZACIÓN Y DE
REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS*

FANNY ACOSTA GARCÍA

2015

“Un hombre sabio construirá más oportunidades que las que encuentra”.
Francis Bacon



Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 2 de 28	

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	4
OBJETIVO	4
ALCANCE.....	4
I. MODELO CONCEPTUAL INICIAL.....	5
<i>Alcance</i>	5
<i>Levantamiento Técnico</i>	6
<i>Sistema de Información Geográfica (SIG)</i>	8
<i>Modelo Conceptual Inicial</i>	8
II. MODELO CONCEPTUAL FINAL.....	8
<i>Estudios geofísicos</i>	9
<i>Plan de Muestreo</i>	9
<i>Tipo de Muestreo</i>	10
<i>Patrones de muestreo</i>	10
<i>Número de Puntos de muestreo</i>	11
<i>Equipo de perforación y muestreo</i>	11
<i>Métodos Analíticos</i>	12
<i>Software para modelación de flujo y transporte</i>	13
<i>Estudio de Caracterización</i>	13
<i>Modelo Conceptual Final</i>	14
III. PLAN DE REMEDIACIÓN	14
<i>Estudio de Riesgo Ambiental</i>	15
<i>Elección el Nivel de Remedación</i>	16
<i>Evaluación de las Alternativas de Remedación</i>	16
<i>Propuesta de Remedación</i>	19
<i>Pruebas de Tratabilidad</i>	20
<i>Plan de Remedación</i>	21



Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 3 de 28	

ÍNDICES DE DIAGRAMAS

DIAGRAMA 1 MODELO CONCEPTUAL INICIAL	5
DIAGRAMA 2 MODELO CONCEPTUAL FINAL.....	8
DIAGRAMA 3 PATRONES DE MUESTREO.	10
DIAGRAMA 4 NÚMERO DE PUNTOS DE MUESTREO.....	11
DIAGRAMA 5 PLAN DE REMEDIACIÓN.....	14
DIAGRAMA 6 TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN EN MÉXICO.....	16
DIAGRAMA 7 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN.....	20
DIAGRAMA 8 PRUEBAS DE TRATABILIDAD.....	20

ÍNDICES DE TABLAS

TABLA 1 DEFINICIÓN DE ALCANCE	5
TABLA 2 ESTUDIOS GEOFÍSICOS.....	9
TABLA 3 TIPOS DE MUESTREO.....	10
TABLA 4 EQUIPO DE PERFORACIÓN Y MUESTREO.....	11
TABLA 5 EQUIPOS PARA TOMA DE MUESTRAS.....	12
TABLA 6 MÉTODOS ANALÍTICOS.....	12
TABLA 7 SOFTWARE PARA MODELACIÓN DE FLUJO Y TRANSPORTE.....	13
TABLA 8 ESTUDIO DE RIESGO AMBIENTAL.....	15
TABLA 9 NIVELES DE REMEDIACIÓN.....	16
TABLA 10 TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN EN MÉXICO.....	17
TABLA 11 VELOCIDAD DE TRATAMIENTO Y COSTO DE LAS TÉCNICAS.....	18
TABLA 12 TRENES DE TRATAMIENTO.....	19



Introducción

En México existen extensas áreas contaminadas con hidrocarburos del petróleo, este tipo de compuestos, se acumulan en ecosistemas marinos y en suelos, siendo responsables de su deterioro, en la actualidad se debe dar especial atención a los impactos ambientales en el suelo a causa de los hidrocarburos, esto con el fin de eliminar el riesgo a la población y al medio ambiente, ya que algunos contaminantes son extremadamente tóxicos. El éxito de un proyecto de caracterización y remediación de un sitio contaminado con hidrocarburo, depende enteramente de la correcta planeación y ejecución del mismo.

Objetivo

Esta guía tiene por objetivo la planeación de proyectos de caracterización y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos considerando los lineamientos de la legislación ambiental vigente, conceptos y criterios técnicos reportados en literatura científica especializada a través de una estructura que facilite la toma de decisiones en la materia para dar una solución integral y efectiva al problema.

Alcance

Esta guía permite consolidar un programa de caracterización y remediación de suelos para atender situaciones de emergencia en suelos contaminados por hidrocarburos, así como la atención de pasivos ambientales.

A través de tres etapas generales.

- I. Modelo Conceptual Inicial.
- II. Modelo Conceptual Final.
- III. Plan de Remediación.



I. Modelo Conceptual Inicial

La primera parte consiste en definir el modelo conceptual inicial, el cual permitirá tener una visión general de forma preliminar de la situación, tal como se muestra en el Diagrama 1.

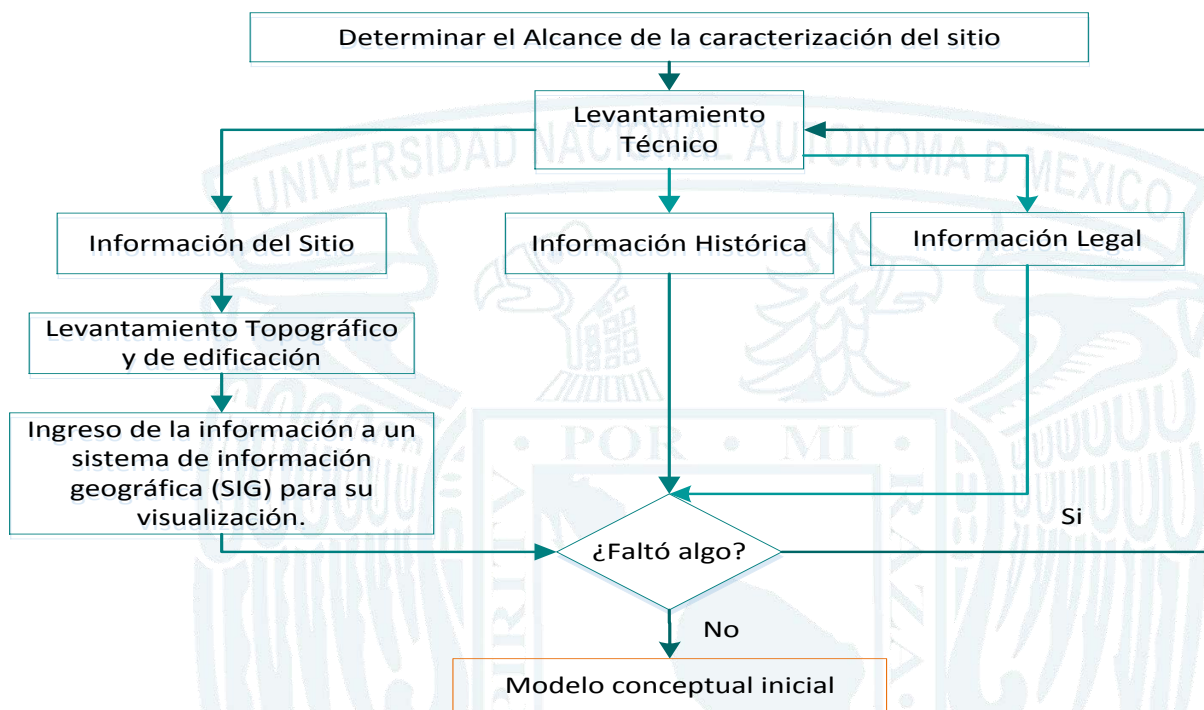


Diagrama 1 Modelo Conceptual Inicial.

Alcance

Primeramente se debe definir el alcance: Esto es la definición de la finalidad para la cual se realiza el estudio de caracterización. Algunos de los métodos para definir el Alcance de la caracterización se tienen en la Tabla 1.

Tabla 1 Definición de Alcance

Finalidad del proyecto	Alcance de la caracterización
Remediar el sitio con base sólo en el estudio de caracterización para alcanzar los Límites Máximos Permisibles de las NOM's.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar tipo de contaminante, área y volumen contaminado. 3. Proporcionar la base técnica para elaborar la propuesta de remediación, determinar las acciones de remediación y el proceso de tratamiento a aplicar y el programa de muestreo final comprobatorio para mostrar que se alcanzaron los Límites Máximos Permisibles de las NOM's. 4. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio.



Finalidad del proyecto	Alcance de la caracterización
<i>Verificar que el/los socavón(es) se encuentren libres de contaminación.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar que no quedan contaminantes en el área de excavación. 3. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio.
<i>Remediar el sitio con base en un estudio de evaluación de riesgo ambiental.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar tipo de contaminante, área y volumen contaminado. 3. Proporcionar la base técnica para evaluar la exposición, determinar los riesgos y definir Niveles de Remediación Específicos del sitio. 4. Proporcionar la base técnica para elaborar la propuesta de remediación, determinar las acciones de remediación, el proceso de tratamiento a aplicar y como comprobar finalmente que se alcanzaron los Límites Máximos Permisibles de las NOM's. 5. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio
<i>Remediar y reutilizar el sitio con base en un estudio de evaluación de riesgo ambiental.</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y ejecutar el muestreo del sitio. 2. Determinar tipo de contaminante, área y volumen contaminado. 3. Proporcionar la base técnica para evaluar la exposición, determinar los riesgos y definir Niveles de Remediación Específicos del sitio. 4. Proporcionar la base técnica para elaborar la propuesta de remediación, determinar las acciones de remediación, el proceso de tratamiento a aplicar y como comprobar finalmente que se alcanzaron los Límites Máximos Permisibles de las NOM's. 5. Definir el uso de las distintas áreas del sitio de acuerdo con los riesgos y las acciones de remediación a ejecutar. 6. Concordancia de la remediación con el proyecto arquitectónico de reutilización del sitio. 7. Liberación de la responsabilidad por la contaminación del sitio.

Levantamiento Técnico

Para realizar recopilación de información acerca de sitio se recomiendan las siguientes preguntas:

- ¿Para qué ha sido utilizado el sitio anteriormente? *
 - ¿Han ocurrido fugas o algún otro tipo de percance anteriormente? *
 - ¿Se han realizado caracterizaciones anteriormente?
 - ¿Se han realizado remediaciones anteriormente?
 - ¿Cuál es la edad y el mantenimiento que se le da a las instalaciones?
 - ¿Existen reportes de la autoridad?
 - ¿Existen notas periodísticas referentes a la zona afectada?
- } Información Histórica
-
- ¿De quién es o de quién ha sido el sitio? (Título de propiedad)*
 - ¿En caso de ser rentado, se tienen los contratos de arrendamiento?
 - ¿El sitio ha sido concesionado?
 - ¿Cuáles han sido los cambios de uso del suelo?*
 - ¿Cuál es el plan de desarrollo del sitio? *
- } Información legal



**GUÍA PARA LA PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE
CARACTERIZACIÓN Y DE REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 7 de 28	

- ¿Dónde se localiza?*
- ¿Es un área urbana industrial y/o comercial?*
- ¿Es un área rural con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.)?*
- ¿Es un área natural protegida?*
- ¿Quiénes son los receptores de la contaminación (suelo, agua, vegetación, ser humano)?*
- ¿Qué tipo de clima tiene?*
- ¿Cuál es el relieve de la zona?*
- ¿A qué profundidad se encuentra el manto freático?*
- ¿Cuál es la dirección del flujo subterráneo?*
- ¿Cuál es el aprovechamiento de dicha agua?*
- ¿Se encuentran cuerpos de agua superficial?*
- ¿Cuál es el uso del suelo actualmente?
- ¿Cuál es el proceso que se realiza en el sitio?
¿Cuáles son las materias primas que requieren?
¿Cuáles son los productos y los residuos que se generan en este proceso?*
- ¿Existen sitios de disposición y/o descarga aledaños a la zona?*
- ¿Cuál es la fuente de la contaminación?*
- ¿Cuáles son los puntos de exposición?*
- ¿En el sitio existen fugas y derrames visibles?*
- ¿En el sitio existen zonas de tanques?
- ¿En el sitio existen áreas de almacenamiento de sustancias y residuos?*
- ¿En el sitio existen drenajes?*
- ¿En el sitio existen zonas de carga y descarga?
- ¿En el sitio existen áreas sin uso específico?
- ¿En el sitio existen edificios, bodegas, talleres, instalaciones subterráneas?*
- ¿Cuál es el límite físico del predio?
- ¿Cuáles son las colindancias de sitio?
- ¿Se encuentra cerca de zonas habitacionales, parques, plazas, norias?*
- ¿Se encuentra cerca de zonas canales y/o pozos?*
- ¿Se perciben olores fuertes o picantes?*

Información
del sitio

- ¿Se presentan discontinuidades como fracturas, fallas o heterogeneidad?*
- De ser así, ¿cuál es la orientación de dichas fracturas, espaciamiento, extensión vertical-horizontal, abertura, rugosidad y relleno de las fracturas?
- ¿Cuáles son los minerales del suelo, sedimento o roca?*
- ¿Cuál es la porosidad y conductividad hidráulica de la matriz no fracturada?
- ¿Cuál es la porosidad y conductividad hidráulica de la matriz fracturada?

Información
geológica

*Preguntas clave, esenciales para la realización del levantamiento técnico.



Sistema de Información Geográfica (SIG)

- Levantamiento topográfico.
 - Análisis de la información en mapas y bases de datos.
- Se recomienda el Software ArcGIS ya que es una infraestructura para crear mapas, organizar datos geográficos y así con esto, la identificación de patrones del suelo.

Modelo Conceptual Inicial

Una vez analizada toda la información se realiza un modelo conceptual. Este es el resultado de un esfuerzo de equipo, basado en información y datos sólidos. El modelo conceptual incluirá la descripción gráfica, esquemática y escrita de la relación entre la fuente de la contaminación y los receptores vulnerables potenciales.

II. Modelo Conceptual Final

Una vez concluido el modelo conceptual inicial, se procede a estructurar el modelo conceptual final, el cual permitirá tener una visión integral y más completa de la situación. Este modelo se ilustra en el Diagrama 2.

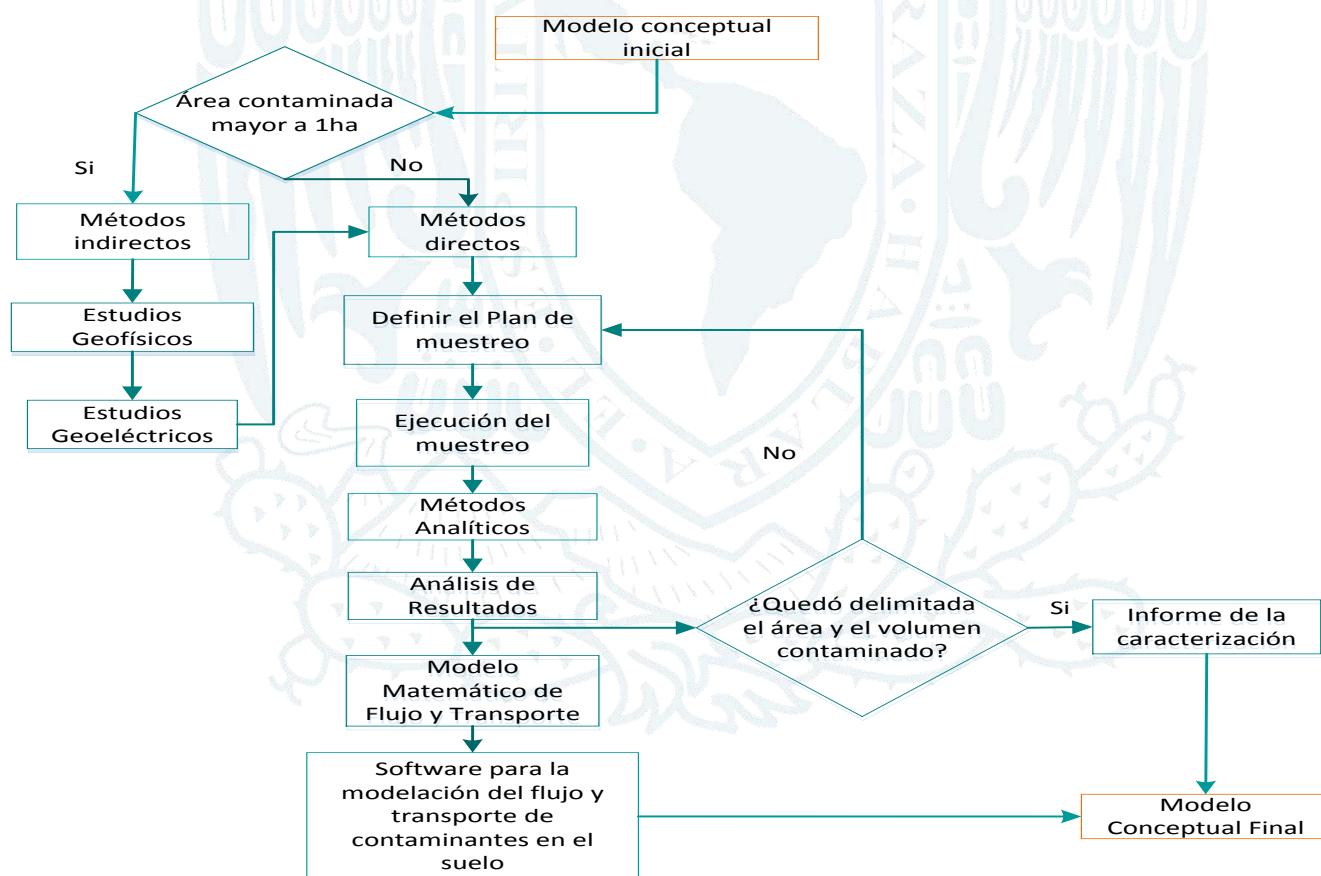


Diagrama 2 Modelo Conceptual Final.



Estudios geofísicos

Estos métodos son aplicables cuando se tienen extensas áreas contaminadas; son de gran utilidad para delimitar de forma más precisa el área contaminada y así tener un eficiente plan de muestreo, y con esto una caracterización más precisa. En la Tabla 2 se muestran estos métodos así como su utilidad.

Tabla 2 Estudios geofísicos.

Método	Utilidad
Resistividad Eléctrica	Identificar cuerpos de rocas y materiales en el subsuelo.
Métodos magnéticos y gravimétricos.	Detectar cavidades y caracterizar vertederos.
Tomografías geoeléctricas.	Detección de plumas de contaminación y caracterización de vertederos.
PID (Photo Ionization Detector).	Detectar el nivel total de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), otros hidrocarburos derivados del petróleo y gases tóxicos (incluyendo hidrocarburos clorados).
Georadar o GPR.	Localizar servicios enterrados, estructuras geológicas, problemas relacionados con la geotecnia, vestigios arqueológicos, y contaminación de suelos y aguas subterráneas.
Gasometría.	Detectar hidrocarburos volátiles.

Plan de Muestreo

El Plan de Muestreo es un documento formal que sirve para programar en forma lógica y racional todas las actividades que están implícitas en un muestreo, incluyendo las especificaciones relacionadas con la toma de muestras. Adicionalmente se deberá anexar la siguiente información:

- ✓ Planos de la localización del sitio acotados y/o imágenes satelitales.
- ✓ Plano de carreteras y/o caminos o calles para llegar al sitio (vías de acceso).
- ✓ Planos oficiales y/o acercamientos de imágenes satelitales de *la delimitación de la zona de muestreo*. Trazo del polígono a estudiar, referir coordenadas.
- ✓ Plano acotado de la zona de estudio generado mediante un levantamiento topográfico (incluir detalles de referencia según tipo de instalación).
- ✓ Plano acotado donde estén marcados los puntos de muestreo, con la identificación que les será asignada, se sugiere que sea acorde con la identificación que se dará a las muestras.
- ✓ Copia de una identificación oficial del responsable técnico.
- ✓ Copia de una identificación oficial del signatario responsable de la toma de muestras.
- ✓ Copia de la acreditación y de la aprobación del laboratorio vigente, con el listado de signatarios autorizados.



Tipo de Muestreo

Algunas de las estrategias aplicadas a la distribución de los puntos del muestreo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Tipos de Muestreo.

Tipo de Muestreo	Especificaciones
Muestreo dirigido a juicio del experto.	Si se tiene información previa del sitio (por documentos o por inspecciones visuales del sitio).
Muestreo Estadístico.	Si se quiere comprobar de manera homogénea la presencia o ausencia de contaminantes en sitios considerados pasivos ambientales o abandonados.
Aleatorio simple.	Áreas homogéneas menores a cinco hectáreas, delimitadas por referencias visibles a lo largo y ancho de toda la zona.
Aleatorio estratificado.	Áreas heterogéneas mayores a cinco hectáreas, no delimitadas a simple vista.

Patrones de muestreo

La estrategia para la selección de un patrón de muestreo se muestra en el Diagrama 3.

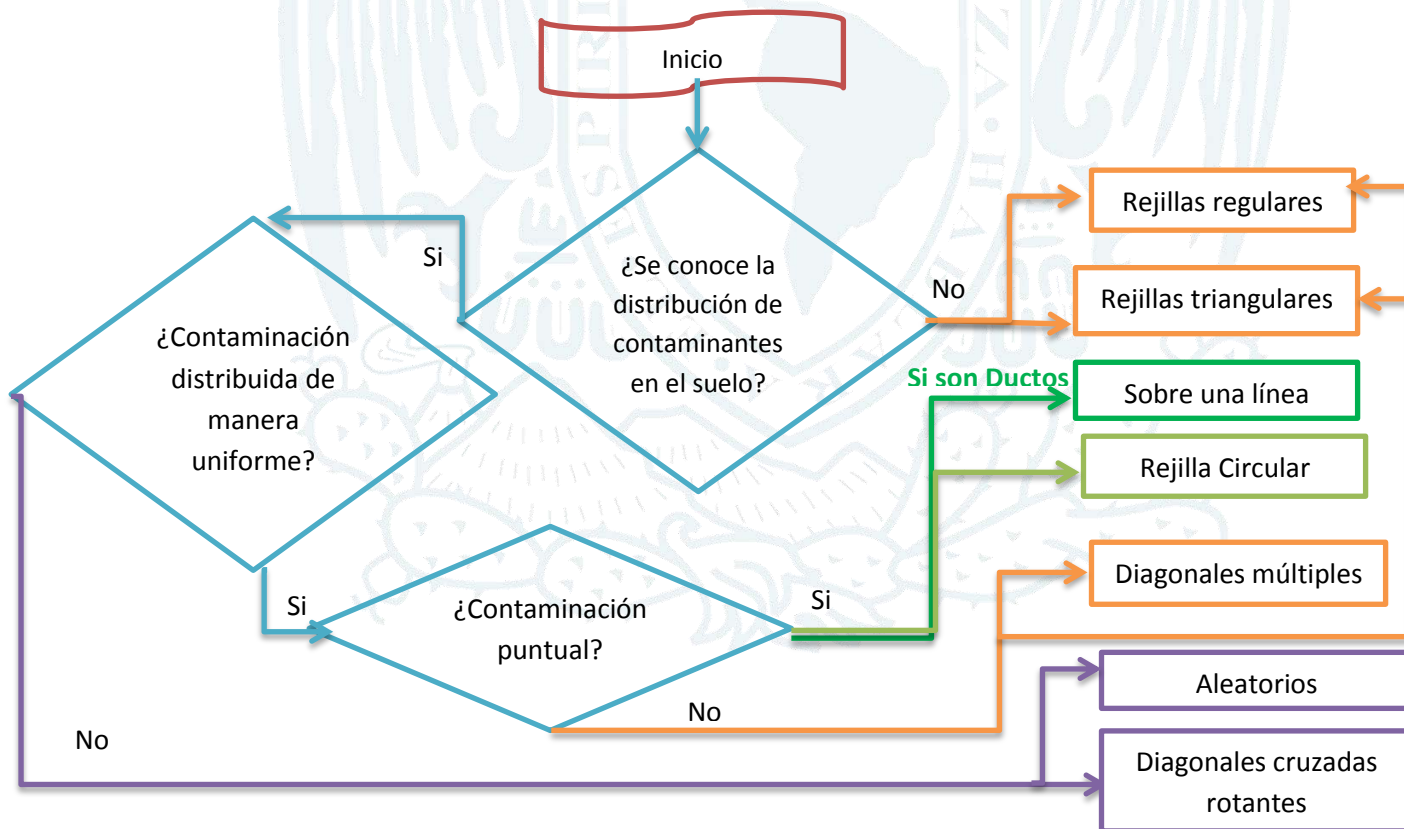


Diagrama 3 Patrones de Muestreo.



Número de Puntos de muestreo

Se puede obtener el número de puntos de muestreo de acuerdo al criterio que se muestra en el Diagrama 4.

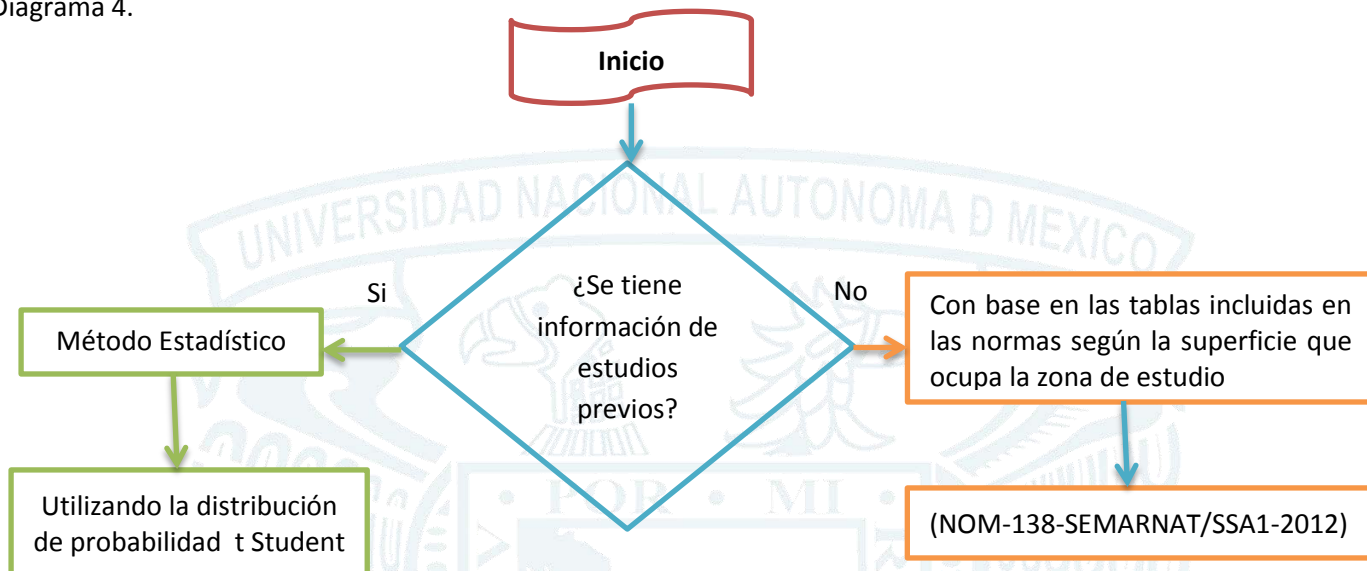


Diagrama 4 Número de puntos de muestreo.

Equipo de perforación y muestreo

Los sistemas comúnmente utilizados para la toma de muestras aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4 Equipo de perforación y muestreo.

Sistema	Aplicación al diseño de muestreo	Ventajas e inconveniente
Calicatas	Suelo de superficie suave (0-100 cm).	Barato, fácil de usar, capacidad de profundidad limitada.
Sondeos Manuales	Suelo duro (0-100 cm).	Relativamente fácil de usar, capacidad de profundidad limitada, costos bajos.
Sondeos Semimecánicos	Suelo rocoso o arenoso (Hasta 10 m).	Buen rango de profundidad, puede requerir de dos o más operadores, costos medios.
Sondeos Mecánicos	Todo tipo de suelo, grandes profundidades.	Buen rango de profundidad, generalmente empleado para ganar acceso a horizontes de suelo más profundos, requiere de mano de obra experimentada, costo más elevado.

Algunos de los equipos generalmente utilizados para la toma de muestras se mencionan en la Tabla 5.

Tabla 5 Equipos para Toma de Muestras.

Equipo para muestreo	Aplicación	Observaciones
<i>Cuchara o cucharones</i>	Suelos hasta 10 cm de profundidad	Muestreos someros en áreas abiertas (fondos o paredes de fosas).
<i>Nucleador Manual (Hand Auger)</i>	Suelos con un rango de profundidad máxima de 2 a 5 metros debajo del nivel de piso.	Este dispositivo se puede aplicar en zonas donde el suelo lo permita.
<i>Nucleadores por empuje directo</i>	Uso general.	Los nucleadores pueden ser utilizados con tubos (liners) y tapas de teflón.
<i>Barrenas (Hollow Stem Auger) de cualquier tipo</i>	Este equipo es utilizado cuando las condiciones particulares del sitio presentan condiciones litológicas restrictivas.	Suelos preferentemente a profundidades mayores a 5 m dnp.
<i>Nucleadores Mecánicos</i>	Uso general.	Los nucleadores son utilizados con tubos (liners) y tapas de teflón, usados también en muestreo con presencia de roca.

Métodos Analíticos

Los métodos analíticos a utilizar de acuerdo al tipo de contaminante que se requiera, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Métodos Analíticos.

Contaminante	Métodos Analíticos
<i>Hidrocarburos Fracción Ligera</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cromatografía de gases con columna capilar y detector de ionización de flama.
<i>Hidrocarburos Fracción Media</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción con solventes. • Cromatografía de gases con columna y detector de ionización de flama.
<i>Hidrocarburos Fracción Pesada</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extracción Soxhlet o Sonicación. • Separación de compuestos polares. • Determinación gravimétrica.
<i>BTEX</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cromatografía de gases con columna capilar y detector de masas.
<i>Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cromatografía de gases con columna capilar y detector de masas.



Software para modelación de flujo y transporte

Algunos de los software más utilizados se muestran en la Tabla 7 de acuerdo al tipo de contaminante y la matriz afectada.

Tabla 7 Software para modelación de flujo y transporte.

Software	Aplicación
<i>ModFlow</i>	Flujo del agua subterránea.
<i>MT3DMS</i>	Remediación del agua subterránea. Simula la migración de contaminantes.
<i>VLEACH</i>	Simula el escurrimiento en un polígono de suelo.
<i>Footprint</i>	Estima la longitud y el área de superficie de benceno, tolueno, etilbenceno, xileno y penachos (BTEX) en aguas subterráneas, producido a partir de un derrame de gasolina que contiene etanol.
<i>Hydrus</i>	Flujo de agua y transporte de solutos en medios porosos saturados variable. Simula el movimiento del agua, el calor, y varios solutos en medios variablemente saturado.
<i>oilvol</i>	Estima el volumen de hidrocarburo libre en un suelo y calcula el volumen de NAPL residual en las zonas saturadas y no saturadas.
<i>FeFlow</i>	Modela el flujo de fluido y el transporte de componentes disueltos y / o procesos de transporte de calor en el subsuelo.

Estudio de Caracterización

En general, el estudio de caracterización debe especificar:

- ✓ Características de las fuentes de contaminación:
 - Tipo de contaminante.
 - Características geohidrológicas del suelo.
 - Volumen de suelo a remediar.
 - Concentraciones.
 - Uso de suelo.
 - Antigüedad del producto.
- ✓ Delimitación en tiempo y espacio de la(s) mancha(s) contaminantes.
- ✓ Las posibles rutas de exposición.
- ✓ Impactos a la salud
- ✓ Los antecedentes del sitio y posibles fuentes de los contaminantes (fotos aéreas históricas proporcionan información valiosa).



Modelo Conceptual Final

Con los datos obtenidos por el laboratorio se procede a realizar un Modelo conceptual final, geológico e hidrológico. En el que se incluyen isolíneas de concentración, así como la determinación de parámetros hidráulicos. Mediante algún modelo matemático de flujo y transporte.

III. Plan de Remediación

Una vez concluido el modelo conceptual final, se tendrá toda la información necesaria para realizar el plan de remediación y con esto el reaprovechamiento o revitalización del sitio, de acuerdo a la siguiente metodología, ilustrada en el Diagrama 5.

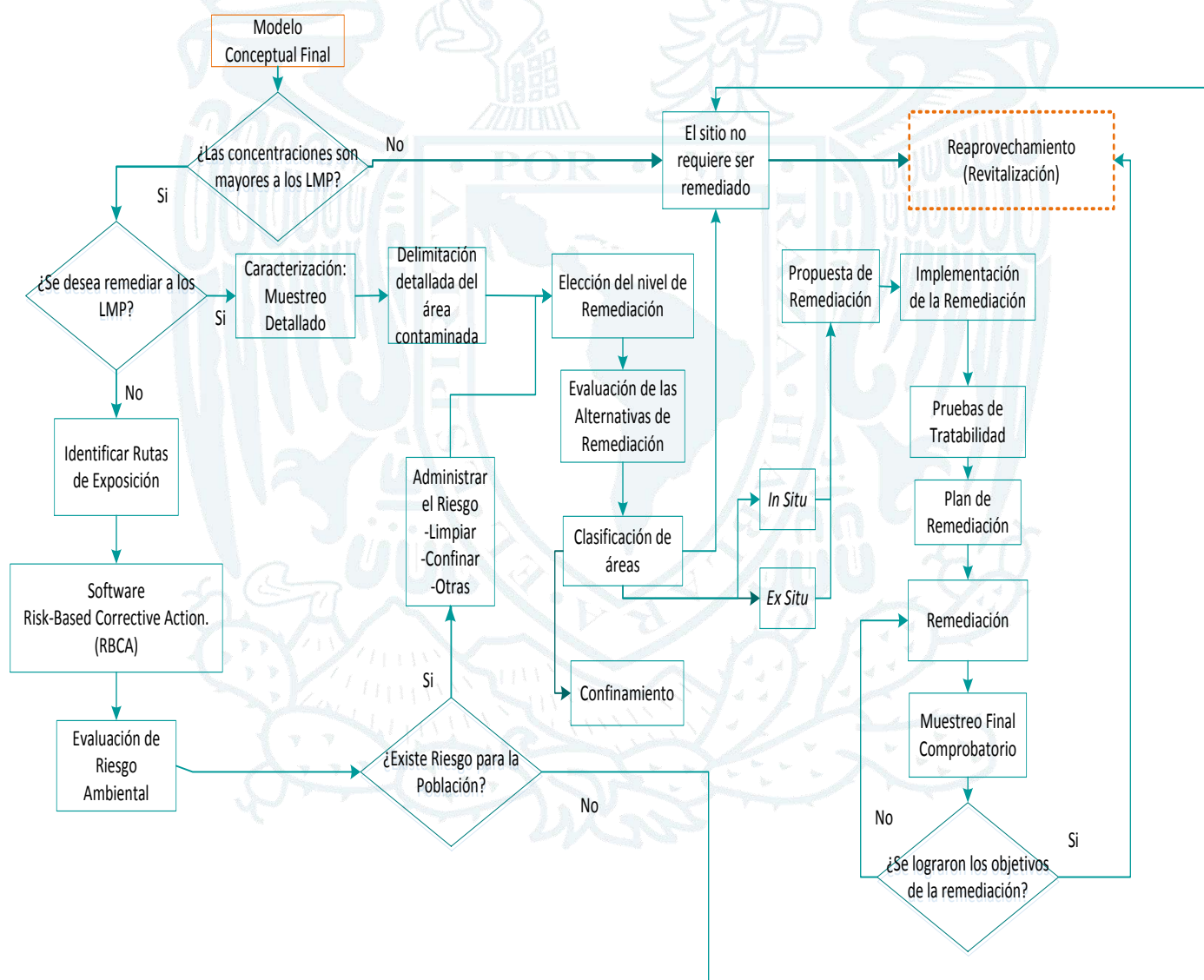


Diagrama 5 Plan de Remediación.



Estudio de Riesgo Ambiental

La evaluación y valoración de riesgo determina la exposición a la contaminación de las personas por diferentes vías o rutas de exposición, la concentración de los contaminantes en el suelo, así como la toxicidad de las sustancias, para con esto determinar los siguientes niveles de riesgo. Se ilustra este proceso en el Tabla 8.

Tabla 8 Estudio de Riesgo Ambiental.

Nivel de Riesgo	Receptores.	El tipo de área.
Nivel 0, caso A	Solo los recursos naturales no biológicos (suelo y agua).	–Urbana industrial y/o comercial. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) –Área natural protegida.
Nivel 0, caso B	Sólo los recursos naturales no biológicos (suelo y agua) y seres humanos	–Urbana industrial y/o comercial. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) –Área natural protegida.
Nivel 1	–Especies de uso o valor económico. –Especies protegidas. –Ecosistemas valiosos.	–Áreas naturales protegidas. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) *** Y no existe la información toxicológica necesaria para realizar la evaluación de riesgo ambiental.
Nivel 2	–Especies de uso o valor económico. –Especies protegidas. –Ecosistemas valiosos.	–Áreas naturales protegidas. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) *** Y existe la información toxicológica necesaria para realizar la evaluación de riesgo ambiental
Nivel 3	–Especies de uso o valor económico. –Especies protegidas. –Ecosistemas valiosos.	–Áreas naturales protegidas. –Áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola, ganadera, piscícola, etc.) *** Y existe la información toxicológica necesaria para realizar la evaluación de riesgo ambiental y se haya determinado los índices de peligro históricos correspondientes

*** Información adicional.

Esto se puede hacer con ayuda del software Risk-Based Corrective Action (RBCA), el cual es un método que se enfoca explícitamente en la protección de la salud humana y el ambiente.

Elección el Nivel de Remediación

Se procede a identificar el nivel de remediación, para lo cual se propone una clasificación de áreas. Las características de éstas áreas se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Niveles de Remediación.

Áreas	Características
El sitio no requiere ser remediado.	1) Si la concentración del contaminante no rebasa los límites máximos permisibles. 2) Si no existe riesgo para la población.
Remediación Ex situ.	1) Cuando se tiene espacio y/o instalaciones donde realizar el proceso. 2) Cuando la contaminación es profunda. 3) Cuando el medio no favorece la técnica de remediación. 4) Suelos heterogéneos. 5) Procesos en los que se requieran tener las condiciones controladas.
Remediación In situ.	1) Cuando la contaminación es superficial. 2) Cuando no se tiene espacio para manejar el suelo contaminado por separado. 3) Cuando el medio favorece la técnica de remediación. 4) Suelos homogéneos. 5) Procesos en los que no se requieran tener las condiciones controladas.
Confinamiento.	1) Cuando las condiciones del suelo no permiten remediarlo por ninguna de las tecnologías disponibles. 2) Cuando los costos de la remediación son inviables económicamente.

Evaluación de las Alternativas de Remediación

De acuerdo a la "Relación de empresas autorizadas para la prestación de servicios de remediación de suelos contaminados y materiales semejantes a suelos contaminados" por parte de la SEMARNAT en su versión actualizada el 30 de abril de 2014. En México existe un total de 234 empresas autorizadas para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y materiales semejantes a suelos contaminados, estos son todos aquellos materiales que por sus propiedades mecánicas, físicas y químicas presentan semejanzas con los suelos contaminados, tales como lodos de presas, lodos y sedimentos de cárcamos, lodos y sedimentos de tanques de almacenamiento, entre otros. Se muestra en el Diagrama 6 el porcentaje de las técnicas de Remediación en México.

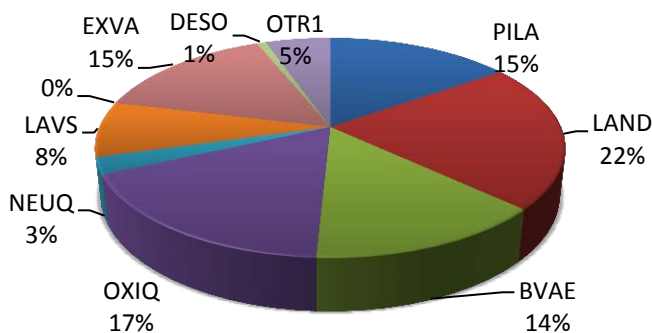


Diagrama 6 Técnicas de Remediación en México.

CLAVES DE LOS PROCESOS

- PILA: BIORREMIEDIACIÓN POR BIOPILAS
- LAND: BIORREMIEDIACIÓN POR LANDFARMING
- BVAE: BIOVENTEO AEROBIO
- OXIQ: OXIDACIÓN QUÍMICA
- NEUQ: NEUTRALIZACIÓN QUÍMICA
- LAVS: LAVADO DE SUELOS
- SOLI: ESTABILIZACIÓN-SOLIDIFICACIÓN
- EXVA: EXTRACCIÓN DE VAPORES
- DESO: DESORCIÓN TÉRMICA



El 57% de estas empresas utiliza proceso off site y el 40% utiliza procesos in situ, siendo tan solo un 3% los procesos realizados ex situ.

En la Tabla 10 se muestran las características favorables de las técnicas de remediación.

Tabla 10 Técnicas de Remediación en México.

Técnica.	Contaminante.	Características favorables del sitio.	Características desfavorables del sitio.
<i>Biorremediación.</i>	-Fracción Ligera -Fracción Media -Hidrocarburos alifáticos lineales	-Adecuada oxigenación -pH 6-8 -Temperaturas superiores a 15 °C -Presencia de poblaciones microbianas diversas. -Porosidad media -Elevada permeabilidad -Mineralogía uniforme -Homogeneidad. -Contaminación superficial	-Componentes muy pesados abundantes en la mezcla. -Mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos. -Concentraciones tóxicas -Escasa actividad microbiana -Ambientes anóxicos. -pH extremos. -Temperaturas bajas. -Rocas fracturadas. -Baja permeabilidad. -Compleja mineralogía. -Heterogeneidad
<i>Bioventeo.</i>	-COVs	-Zona no saturada -Alta Humedad	-Bajo contenido de humedad
<i>Biopilas.</i>	-Contaminantes demasiado volátiles. COV no halogenados e hidrocarburos.	-Suelos contaminados superficialmente. -Suelos heterogéneos. -Suelos húmedos.	-Necesidad de espacio (áreas de tratamiento, aireación y sistemas para colectar lixiviados).
<i>Landfarming.</i>	-Fracción Ligera -Fracción Media	-Suelos contaminados superficialmente. -Suelos heterogéneos. -Suelos húmedos	-Hidrocarburos muy pesados. -Compuestos presentan anillos en su estructura química. -Presentan cloro o nitrógeno.
<i>Estabilización y solidificación (S/E).</i>	-Contaminantes orgánicos no polares como grasa y aceites. -Hidrocarburos aromáticos -Hidrocarburos halogenados -PCB	-Elevada permeabilidad. -Homogeneidad del suelo -Baja humedad	-Suelos con materiales que reaccionen con la sustancia estabilizadora.



Técnica.	Contaminante.	Características favorables del sitio.	Características desfavorables del sitio.
<i>Lavado de Suelo.</i>	Contaminantes orgánicos e inorgánicos. HAPs, PCP, plaguicidas, COVs, COSs, gasolinas y metales pesados.	-Suelos heterogéneos. -Bajo contenido húmico	-Alto porcentaje de limo o arcilla. -Alto contenido de materia orgánica. -Suelos poco permeables o heterogéneos;
<i>Extracción de vapores.</i>	Contaminantes volátiles y semivolátiles. COVs y algunas gasolinas	-Zonas insaturadas. -Zona no saturada -Elevada permeabilidad -Altas temperatura -Apto para zonas con edificaciones. -Baja humedad	-Gran capacidad de adsorción. -Alta humedad. -Alto contenido de materia orgánica.
<i>Oxidación /Reducción Química.</i>	-Compuestos inorgánicos. -COV's no halogenados -COS's. -gasolinas. -plaguicidas.	-Contaminación a profundidades considerables, a las que otros métodos no pueden llegar. -Baja humedad	-Oxidación incompleta o formación de compuestos intermediarios. -La presencia de aceites y grasas disminuye la eficiencia
<i>Desorción térmica.</i> -DTBT (-baja Temperatura). -DTAT (-alta temperatura)	Compuestos orgánicos. DTBT: COV's no halogenados y gasolinas. DTAT: COS's, HAPs, BPC's y pesticidas.	-Baja humedad	-Presencia de cloro. -Zonas saturadas. -Suelos muy compactos -Permeabilidad variable.

En cuestiones de velocidad de tratamiento y costo económico se tiene la Tabla 11.

Tabla 11 Velocidad de Tratamiento y costo de las técnicas.

Técnica	Lugar de Aplicación	Velocidad de tratamiento	Costo
<i>Biopilas</i>	Ex situ	Media	Bajo (50 y 80 USD/m ³)
<i>Landfarming</i>	Ex situ	Media	Bajo (60 y 90 USD/m ³)
<i>Bioventeo aerobio</i>	In situ	Media	Bajo (10 y 70 USD/m ³)
<i>Oxidación-Reducción química</i>	In situ	Rápida	Alto (190 y 600 USD/m ³)
<i>Neutralización química</i>	In situ	Rápida	Alto (150 y 400 USD/m ³)
<i>Lavado de Suelos</i>	Ex situ	Rápida	Medio (prom 150 USD/m ³)



Técnica	Lugar de Aplicación	Velocidad de tratamiento	Costo
<i>Estabilización/Solidificación</i>	In situ Ex situ	Rápida	Medio (260 y 200 USD/m ³)
<i>Extracción de vapores</i>	In situ	Media	Bajo(10 y 50 USD/m ³)
<i>Desorción térmica</i>	Ex situ	Rápida	Medio (50 y 350 USD/m ³) Alto (con uso de vapor más de 400 USD/m ³)

Propuesta de Remedación

En algunos casos, dos o más tecnologías innovadoras o tradicionales pueden usarse juntas en lo que se conoce como “trenes de tratamiento” estos son procesos integrados o bien, una serie de tratamientos que se combinan en una secuencia para proporcionar el tratamiento necesario algunos de estos trenes se mencionan en la Tabla 12.

Tabla 12 Trenes de Tratamiento.

Contaminante	Tren de tratamiento
<i>Contaminantes orgánicos y metales</i>	1) Biorremediación. 2) Solidificación/Estabilización.
<i>Contaminantes orgánicos e inorgánicos en suelos, lodos y sedimentos</i>	1) Biorremediación 2) Fitorremediación
<i>Contaminantes volátiles y semivolátiles COVs y algunas gasolinas.</i>	1) Extracción de vapores 2) Biodegradación
<i>Contaminantes volátiles y semivolátiles COVs y algunas gasolinas. (Para sitios edificados)</i>	1) Impermeabilización superficial con geomembranas impermeables. 2) Inyección de aire caliente. 3) Extracción de vapores
<i>Contaminantes orgánicos. Fracción Ligera y Fracción Media</i>	1) Geomembranas con camas de tratamiento 2) Composteo 3) Landfarming
<i>Contaminantes orgánicos e inorgánicos. HAPs, PCP, pesticidas, COVs, COSs, gasolinas y metales pesados.</i>	1) Inundación de suelos. 2) Lavado de suelos. 3) Gravimetrías. 4) Extracción por solventes.
<i>Contaminantes orgánicos. COS's, HAPs, BPC's y pesticidas,</i>	1) Desorción Térmica de alta temperatura. 1) incineración o S/E.



La selección de una tecnología de remediación para un suelo con características particulares, depende de los criterios señalados en el Diagrama 7.

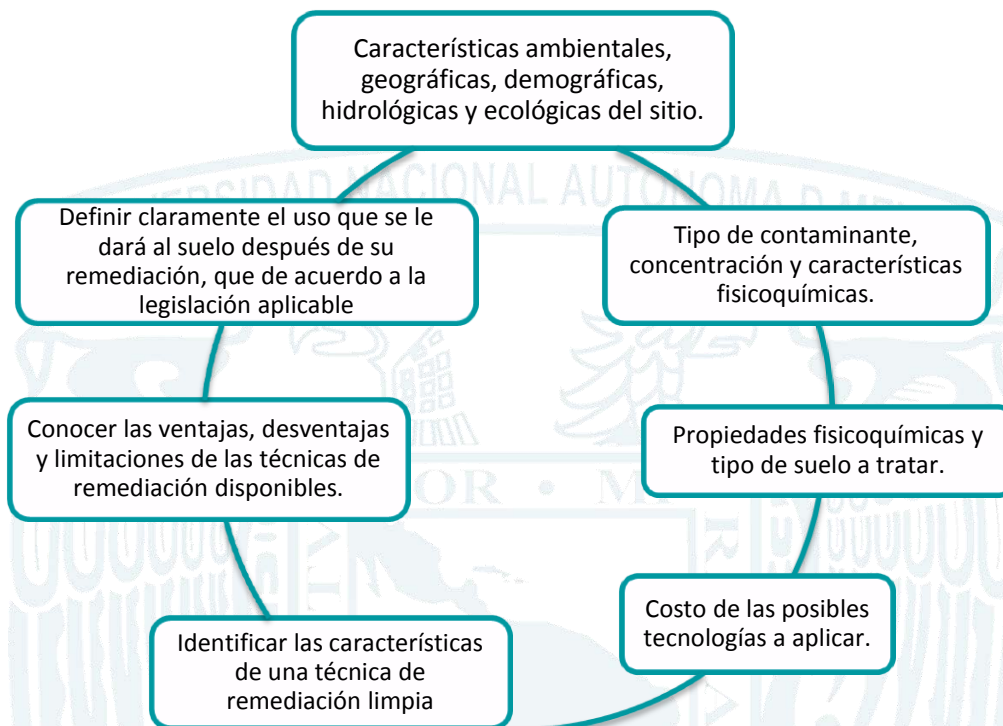


Diagrama 7 Criterios de Selección de Tecnologías de Remediación.

Pruebas de Tratabilidad

Una vez definida la técnica a implementar, se recomienda la realización de pruebas de tratabilidad, esto con el fin de asegurarse que dicho método es eficiente y garantice una remediación efectiva, el proceso para realizar estas pruebas de tratabilidad se ilustra en el Diagrama 8.

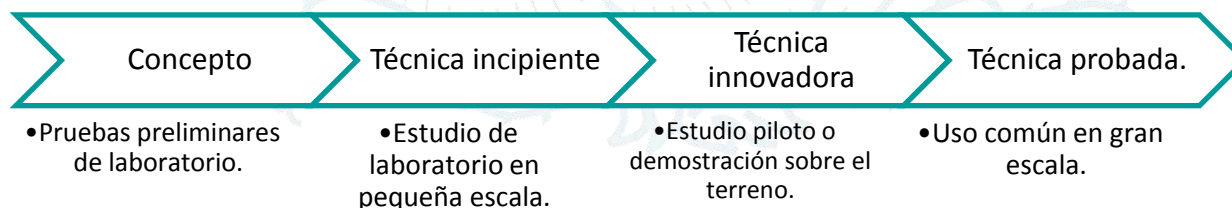


Diagrama 8 Pruebas de tratabilidad.



Plan de Remediación

Es necesario integrar conceptos de mecánica de fluidos, modelación matemática y aspectos legales, económicos y sociales para dar una solución integral al problema, ya que no existe una técnica claramente superior en prestaciones a las demás, sino que su competitividad depende básicamente del binomio suelo-contaminante. Es decir, solamente tras el conocimiento de los anteriores parámetros resulta posible seleccionar el procedimiento idóneo para la rehabilitación de un suelo contaminado.

En el Plan de Remediación se incluyen los siguientes puntos:

Medidas de control de las fuentes (primarias y secundarias) de contaminación.

- Niveles de limpieza (acordado en base a análisis de riesgo a la salud humana/ambiente) o bien criterio de masa removida.

Saneamiento del suelo

- Factibilidad de remediación (medidas de contención).
- Tecnología de remediación (en el menor tiempo posible y sin afectar a terceros: incluido durante el proceso mismo de remediación).
- Monitoreo ("rebound").
- Duración.



Plan de Muestreo

Localización del sitio

País: _____ Estado: _____ Municipio: _____

Dirección Oficial: _____

Uso de suelo (Oficial): _____

Coordenadas UTM: _____

Aparato de Medición de coordenadas. Marca: _____ Modelo: _____

Vías de Acceso al sitio

Vía de Comunicación: _____

Carretera: _____ Calle: _____ Camino: _____

Delimitación de la Zona de Muestreo

Coordenadas del polígono a estudiar UTM: _____

Aparato de Medición de coordenadas. Marca: _____ Modelo: _____

Pendientes en la zona del muestreo: _____

Motivo del muestreo: _____

Tipo de muestreo: _____ Parámetros a estudiar: _____

Norma de Referencia para el muestreo: _____

Distribución de puntos de muestreo

Estrategia aplicada a la distribución de los puntos del muestreo: _____

Patrón de muestreo: _____ Tipo de muestras: _____

Número de puntos de muestreo: _____ Profundidad del muestreo: _____



**GUÍA PARA LA PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE
CARACTERIZACIÓN Y DE REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

Revisión: 0

Fecha: 2015

PROYECTO: Guía de Planeación

Página 23 de 28

Procedimiento para muestreo

Materiales o herramientas: _____

Metodología: _____

Laboratorio

Laboratorio: _____

Número de acreditación: _____ Vigencia: _____

Registro de aprobación: _____ Vigencia: _____

Nombre del signatario autorizado responsable de la toma de muestras: _____



Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 25 de 28	

Puntos de muestreo

Croquis de la zona de muestreo
con los puntos marcados en éste.



Parámetros de Campo

Localización del sitio de muestreo: _____

Fecha de muestreo: _____

Temperatura ambiente: _____

Hora de toma de muestra inicial: _____

Hora de toma de muestra final: _____

Método de muestreo: _____

Tipo de muestras: _____

Número de muestras: _____

Croquis de ubicación
de la toma de muestra
en el sitio

Equipo utilizado en la toma de muestra: _____

Equipo utilizado en la perforación del punto de muestreo: _____

Intervalo de profundidad de la muestra (superficial o profunda): _____

Peso (aprox): _____

Volumen (aprox): _____

Textura: _____

Color: _____

Tamaño de grano: _____

Humedad: _____

pH _____ Eh _____

Fotografía

Observaciones.
Características, generalidades del sitio de
muestreo, actividades Humanas observables:

Tipos de contenedores de muestra: _____

Contenedores sellados con: _____

Tipo de preservación: _____

Protección contra la luz: _____

Nombre y firma del responsable: _____



Etiquetas de las muestras

Fecha: _____ Hora: _____ Temp. Amb: _____

CUDIM

Lugar de muestreo: _____

Profundidad: _____ Cantidad de muestra: _____

Número de la muestra: _____ Análisis a efectuar: _____

Nombre del muestreador: _____



Plan de Muestreo (Ex Refinería 18 de Marzo)

Localización del sitio

País: México Estado: Distrito Federal Delegación: Azcapotzalco

Dirección Oficial: Av. 5 de Mayo, colonia Ángel Zimbrón, Delegación Azcapotzalco, código postal 11219

Uso de suelo (Oficial): De Sitio Industrial (Ex Refinería 18 de Marzo) a Espacios Abiertos (Parque Ecológico Bicentenario)

Coordenadas UTM: 2,153,200

Vías de Acceso al sitio

Vía de Comunicación: Prolongación Ingenieros Militares y Avenida 5 de mayo, Aquiles Serdán, Ferrocarriles Nacionales.

Delimitación de la Zona de Muestreo

Coordenadas del polígono a estudiar UTM: N-2153200,S-2152200,E-480000,O-478400

Motivo del muestreo: Al inicio de un tratamiento en el sitio

Tipo de muestreo: Muestreo de Detalle Parámetros a estudiar: Hidrocarburos

Norma de Referencia para el muestreo: NOM-138-SEMARNAT SS-2003

Matriz de las muestras: Suelo

Distribución de puntos de muestreo

Estrategia aplicada a la distribución de los puntos del muestreo: Muestreo Estadístico

Patrón de muestreo: Rejillas rectangulares, para punto de muestreo en las intersecciones.

Tipo de muestras: Simples, para estudios de caracterización y remediación

Número de puntos de muestreo: 55

Profundidad del muestreo: Nivel 1 (0-1.2m), Nivel 2 (1.2-2.4m), Nivel 3 (2.4-3.6m), Nivel 4 (3.6-4.8m), Nivel 5 (4.8-6.0m), Nivel 6 (6.0-7.2m), Nivel 7 (7.2-9m)



Procedimiento para muestreo

Materiales o herramientas: Pala o Cucharón, "Hand Auger" y "Perforadora Rotatoria".

Metodología: Primeramente se procederá a el muestreo superficial con la pala o cucharón, después con ayuda del "Hand Auger" se procederá a la toma de muestras en la zona media y finalmente se utilizará la perforadora rotatoria para el muestreo a grandes profundidades.

Una vez que se tengan estas muestras se les tomará los datos a cada muestra, se meterá a un frasco de vidrio nuevo de boca ancha con tapa y sello de teflón, el cual será etiquetado con su clave única de identificación de muestra (CUDIM) adecuadamente con sus datos correspondientes a cada tipo de muestra, se mantendrá en refrigeración para su conservación a 4°C para ser enviado al laboratorio acreditado, junto con la cadena de custodia para su análisis.

Laboratorio

Laboratorio: Laboratorios de México S.A. de C.V

Parámetros a analizar: Hidrocarburos de Fracción Ligera, Hidrocarburos de Fracción Media, Hidrocarburos de Fracción Pesada, HAP's, BTEX

Número de acreditación: 2404-DHO-077745632000 Vigencia: 23 de Abril 2016

Registro de aprobación: 1412MDF1999 Vigencia: 23 de junio 2002

Nombre del signatario autorizado responsable de la toma de muestras: Ing. Rafael Caballero



**GUÍA PARA LA PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE
CARACTERIZACIÓN Y DE REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 3 de 8	

Cadena de custodia

Laboratorio: Laboratorios de México S.A. de C.V.

Cliente: Remediaciones "Un planeta Feliz" S.A de C.V.

Temperatura: 23°C

Condiciones de preservación: Se preservarán en refrigeración a una temperatura de 4°C por máximo 4 días

No de Muestra	CUDIM	Fecha	Hora	Matriz	Cantidad	Parámetros a analizar	No de recipientes
1	<i>N1_X1_Y6_1</i>	<i>23-04-2000</i>	<i>11:30</i>	<i>Suelo</i>	<i>100g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
2	<i>N1_X2_Y6_1</i>	<i>23-04-2000</i>	<i>12:10</i>	<i>Suelo</i>	<i>150g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
3	<i>N1_X3_Y6_1</i>	<i>23-04-2000</i>	<i>12:35</i>	<i>Suelo</i>	<i>95g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
4	<i>N2_X3_Y5_1</i>	<i>23-04-2000</i>	<i>13:10</i>	<i>Suelo</i>	<i>100g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
5	<i>N2_X3_Y4_1</i>	<i>23-04-2000</i>	<i>13:29</i>	<i>Suelo</i>	<i>105g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
6	<i>N2_X4_Y6_1</i>	<i>23-04-2000</i>	<i>13:59</i>	<i>Suelo</i>	<i>94g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
7	<i>N3_X2_Y6_1</i>	<i>24-04-2000</i>	<i>10:10</i>	<i>Suelo</i>	<i>110g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
8	<i>N3_X3_Y6_1</i>	<i>24-04-2000</i>	<i>10:39</i>	<i>Suelo</i>	<i>100g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
9	<i>N3_X4_Y5_1</i>	<i>24-04-2000</i>	<i>11:10</i>	<i>Suelo</i>	<i>98g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
10	<i>N4_X3_Y6_1</i>	<i>27-04-2000</i>	<i>11:29</i>	<i>Suelo</i>	<i>95g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3
11	<i>N4_X4_Y5_1</i>	<i>27-04-2000</i>	<i>12:02</i>	<i>Suelo</i>	<i>90g</i>	<i>Hidrocarburos</i>	3

Responsable Técnico: Ing. Víctor Hugo Muñoz López

Responsable de la toma de muestras: Ing. Rafael Caballero Gonzalez

Personal involucrado en el traslado de las muestras: Alejandro Islas Jáuregui

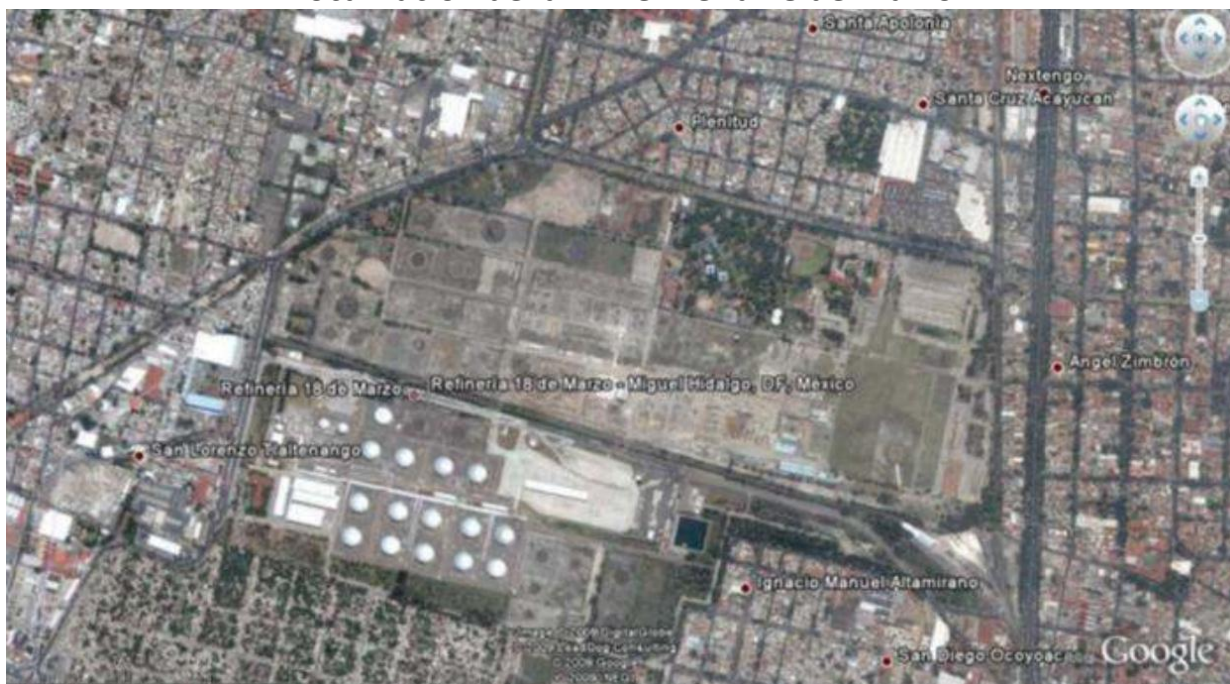
Observaciones: Llovió un poco por la tarde, por tal motivo, las muestras se tomaron en las mañanas.



Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 4 de 8	

Puntos de muestreo

Localización de la Ex Refinería 18 de Marzo



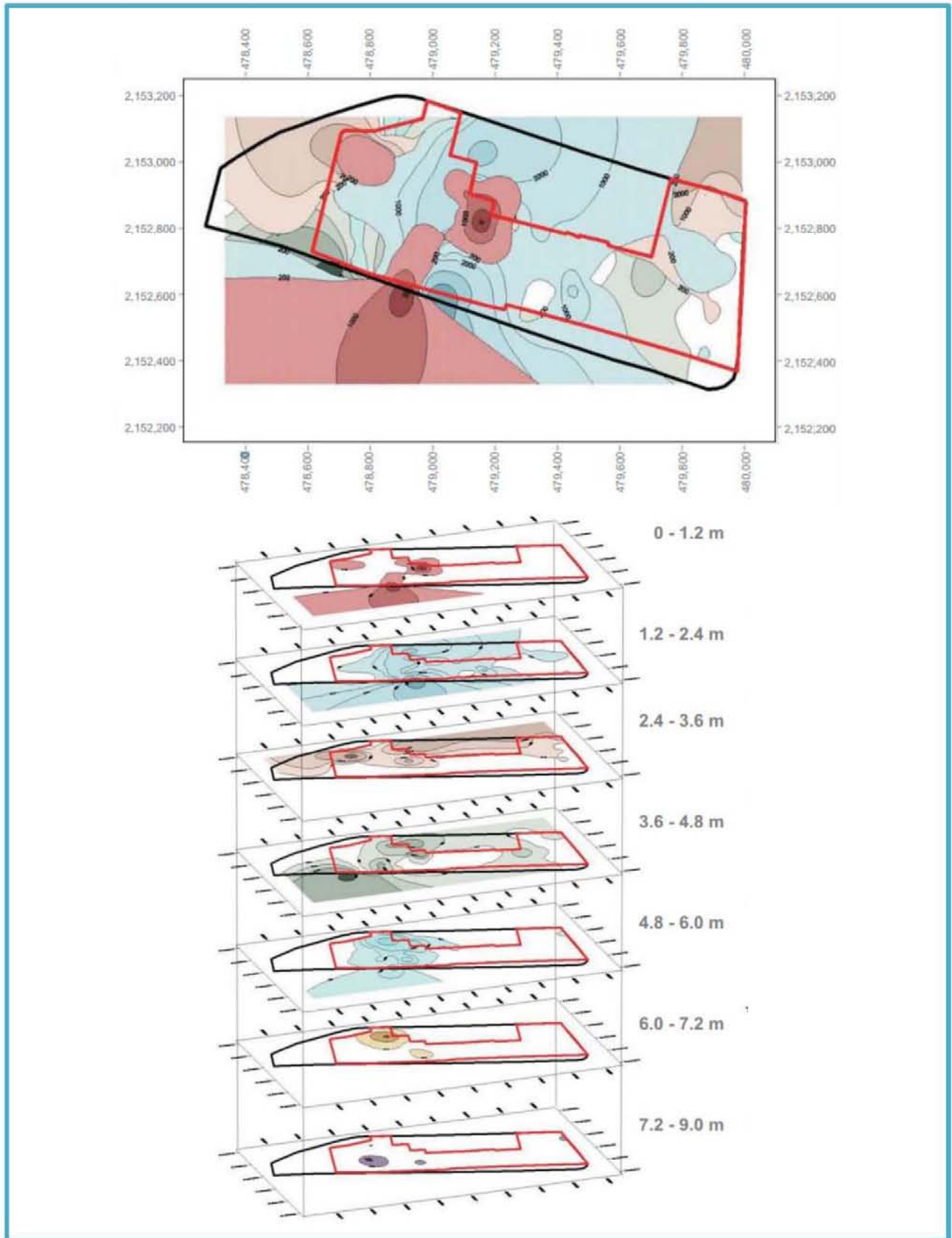
Zona de Trabajo





GUÍA PARA LA PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE
CARACTERIZACIÓN Y DE REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Revisión:	0
Fecha	2015
PROYECTO: Guía de Planeación	
Página 5 de 8	





Muestras

No de Muestra	Coordenadas UTM	Tipo de muestra	Clave única de identificación de muestras (CUDIM)
1	Nivel 1_478,400X-2,153,200Y	Simple	N1_X1_Y6_1
2	Nivel 1_478,600X-2,153,200Y	Simple	N1_X2_Y6_1
3	Nivel 1_478,800X-2,153,200Y	Simple	N1_X3_Y6_1
4	Nivel 2_478,800X-2,153,000Y	Simple	N2_X3_Y5_1
5	Nivel 2_478,800X-2,152,800Y	Simple	N2_X3_Y4_1
6	Nivel 2_479,000X-2,153,200Y	Simple	N2_X4_Y6_1
7	Nivel 3_478,600X-2,153,200Y	Simple	N3_X2_Y6_1
8	Nivel 3_478,800X-2,153,200Y	Simple	N3_X3_Y6_1
9	Nivel 3_479,000X-2,153,000Y	Simple	N3_X4_Y5_1
10	Nivel 4_478,800X-2,153,200Y	Simple	N4_X3_Y6_1
11	Nivel 4_479,000X-2,153,000Y	Simple	N4_X4_Y5_1
12	Nivel 1_479,200X-2,152,800Y	Simple	N1_X5_Y4
13	Nivel 2_479,200X-2,152,800Y	Simple	N2_X5_Y4
14	Nivel 3_479,200X-2,152,800Y	Simple	N3_X5_Y4
15	Nivel 4_479,200X-2,152,800Y	Simple	N4_X5_Y4
16	Nivel 5_479,200X-2,152,800Y	Simple	N5_X5_Y4
17	Nivel 6_479,200X-2,152,800Y	Simple	N6_X5_Y4
18	Nivel 7_479,200X-2,152,800Y	Simple	N7_X5_Y4
19	Nivel 1_479,400X-2,152,600Y	Simple	N1_X6_Y5
20	Nivel 2_479,600X-2,152,200Y	Simple	N2_X7_Y6
...
No Total de muestras:			55



Parámetros de Campo

Localización del sitio de muestreo: *Ex Refinería "18 de Marzo" en Azcapotzalco, D.F.*

Fecha de muestreo: 23/04/2000

Temperatura Ambiente: 23°C

Hora de toma de muestra inicial:
10:00h

Hora de toma de muestra final:
14:00h

Método de Muestreo: Estadístico

Tipo de muestras: Simplex

Número de Muestras: 55



Equipo utilizado en la toma de muestra: "Hand Auger"

Equipo utilizado en la perforación del punto de muestreo: "Perforadora Rotatoria"

Intervalo de profundidad de la muestra (superficial o profunda): 0 m -9 m

Peso (aprox): 100g

Volumen (aprox): 5cm³

Textura: Franco-Arenosa,
30% limo, 10% arcilla,
60% arena.

Color: Café Oscuro

Tamaño de grano: 1.0-0.10mm

Humedad: 25%

pH: 7.5



Observaciones.

Características, generalidades del sitio de muestreo, actividades humanas observables:

Al ser una zona urbana, se observa gran actividad humana, zonas habitacionales, escuelas, puestos de comida, constante tránsito.

Tipos de contenedores de muestra: Vidrio

Contenedores sellados con: Teflón

Tipo de preservación: Refrigeración

Protección contra la luz: Frascos opacos

Nombre y firma del responsable: Ing. Fanny Acosta García



Etiquetas de las muestras

Fecha: 23-04-2000 Hora: 10:30h Temp. Amb: 23°

Lugar de muestreo: 479,000 - 2,152,800

Profundidad: Nivel 3 (3m) Cantidad de muestra: 100g

Número de la muestra: 23 Análisis a efectuar: Fracción Media

Nombre del muestreador: Ing. Ulises Muñoz Solís

CUDIM
N3_X4_Y3_2