



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**EVALUACIÓN DE UNA MUESTRA PROBLEMA DE SUELO PARA SU
REMEDIACIÓN Y REINTEGRACIÓN A UN ÁREA NATURAL.**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

Jonatan Alberto Enriquez Ramirez

CIUDAD DE MÉXICO AÑO 2019.





Universidad Nacional
Autónoma de México



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: **Profesor: José Agustín García Reynoso**
VOCAL: **Profesor: Alejandra Mendoza Campos**
SECRETARIO: **Profesor: Leonardo Damián Soria Rodríguez**
1er. SUPLENTE: **Profesor: Alberto Castellanos Campillo**
2º SUPLENTE: **Profesor: Úrsula Manríquez Tolsá**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CTO. EXTERIOR S/N, C.U., 04510 CIUDAD DE MÉXICO, CDMX.

ASESOR DEL TEMA:

M. EN C. ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

(nombre y firma)

SUSTENTANTE (S):

Jonatan Alberto Enriquez Ramirez.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de química, por brindarme la oportunidad de formarme como un excelente profesionista.

A mis padres por darme la oportunidad de estudiar y guiarme por un camino lleno de retos y aprendizaje.

A mis hermanas y hermano por apoyarme siempre incondicionalmente cuando las situaciones fueron difíciles.

A mi familia por apoyarme siempre y aconsejarme.

A todos mis profesores que siempre se empeñaron por nosotros sus alumnos a ser profesionistas ejemplares.

A mis mejores amigos: Mauricio Sánchez, Elías Arana, Citlalli Chino, Marisol Laborie, Amaranta rocha, Yered Romero, Fernando Leyva, Yered Romero, Fernando Leyva, Manuel Motta, Andrea Martínez, Alejandro Segura, Gemma Constante, gracias por su apoyo y consejos.

A mi mejor amiga Elena García, gracias por tu consejo y tu gran amistad siempre saldremos adelante.

¡Gracias Totales!

Dedicatoria

- ❖ A mi madre María de Lourdes que me trajo a este mundo y ahora está en el cielo cuidándome.
- ❖ Dedico este trabajo a mi mamá Luz María Ramírez Martínez por enseñarme a vivir la vida.
- ❖ A mi padre Jaime Enriquez Hernández por apoyarme incondicionalmente durante toda mi vida y enseñarme a esforzarme siempre.
- ❖ A mis hermanos Monserrat, Viridiana y Damián por siempre estar a mi lado y apoyarme.
- ❖ A toda mi familia tíos, tías y primos.
- ❖ A todos mis amigos, Va por ustedes.

1 Índice

2	Glosario.....	7
3	Introducción.....	9
4	Objetivo.....	11
4.1	Objetivos particulares.....	11
5	¿Qué es un suelo contaminado?.....	12
5.1	Causas y efectos de la contaminación del suelo.....	12
6	Historia y normativa vigente de suelos contaminados.....	14
6.1	Normatividad vigente de sitios contaminados.....	18
7	Gestión de suelos contaminados.....	25
7.1	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA).....	26
7.2	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).....	28
7.3	Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA).....	30
7.4	Entidades Federativas que realizan la gestión de sitios contaminados.....	31
8	Contexto internacional de los sitios contaminados.....	32
8.1	Organización de las Naciones Unidas (ONU).....	32
8.2	Convenio de Estocolmo.....	33
8.3	Convenio de Minamata.....	33
9	Contaminantes.....	33
10	Caracterización de los suelos.....	34
11	Características y propiedades de la materia orgánica de los suelos.....	36
12	Tecnologías de tratamiento para suelos contaminados.....	37
12.1	Clasificación de las tecnologías de remediación.....	37
12.2	Desorción térmica.....	39
12.3	Extracción por solvente.....	40
12.4	Lavado de suelos.....	40
12.5	Inundación de suelos.....	41
12.6	Extracción de vapores.....	41
12.7	Extracción multifásica.....	42
12.8	Catálisis química.....	42
12.9	Inyección de aire.....	42
12.10	Bombear y tartar.....	43
12.11	Biorremediación.....	44

12.12	Tratamiento químico.....	44
12.13	Fitorremediación.....	46
12.14	Electroremediación.....	47
13	Investigación preliminar (Fase I).....	49
13.1	Costos de las tecnologías.....	50
14	Descripción del caso de estudio.....	51
14.1	Localización.....	51
14.2	Clima.....	51
14.3	Orografía.....	52
14.4	Población.....	52
14.5	Tipo de industria.....	52
14.6	Jales mineros.....	54
14.7	Tipo de suelo.....	55
14.8	Flora.....	56
14.9	Fauna.....	56
15	Caracterización de la muestra de suelo problema.....	56
16	Sistema CONTEX.....	57
16.1	Diclorometano.....	60
16.2	Adaptación del sistema CONTEX.....	61
17	Resultados después de realizar el tratamiento.....	63
18	Comparación de la muestra problema antes y después de la remediación.....	64
19	Conclusiones.....	66
20	Usos del suelo después del tratamiento y manejo de residuos.....	68
21	Recomendaciones.....	69
	Bibliografía.....	70
	Anexo A.....	72
	Anexo B.....	83
	ANEXO C.....	87

2 Glosario

- **ASEA:** Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente.
- **BPCS:** Bifenilos Policlorados.
- **BTEX:** Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos.
- **CENAPRED:** Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- **CG:** Cromatografía de gases.
- **CONACYT:** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- **COV:** Contaminante Orgánico Volátil.
- **DGGIMAR:** Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas.
- **DRSC:** Dirección de Restauración de Sitios Contaminados.
- **EM:** Espectrometría de masas.
- **EPA:** Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency).
- **ETDA:** Ácido Etilendiamino Tetracético.
- **FL:** Hidrocarburos Fracción Ligera.
- **FM:** Hidrocarburos Fracción Media.
- **HAP:** Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.
- **HTP:** Hidrocarburos del Petróleo.
- **INE:** Instituto Nacional de Ecología.
- **INEGI:** Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- **LFMN:** Ley Federal sobre Metrología y Normalización.
- **LFRA:** Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.

[Escriba aquí]

- **LGEEPA:** Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
- **LGPGIR:** Ley General para Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- **NMX:** Norma Mexicana.
- **NOM:** Norma Oficial Mexicana.
- **OMS:** Organización Mundial de la Salud.
- **PCP:** Clorofenoles.
- **PH:** Potencial de Hidrogeno.
- **PNN:** Programa Nacional de Normalización.
- **TNT:** Trinitrotolueno.

3 Introducción

El presente trabajo busca fomentar la conservación, protección, restauración de aprovechamiento de los suelos, mediante el análisis del marco teórico de los suelos contaminados, en México de acuerdo a las tecnologías que existen, así como los datos a considerar para seleccionar una tecnología adecuada para el tratamiento, de acuerdo a las características y propiedades del suelo a tratar.

La legislación en México acerca de la remediación de sitios contaminados, nos ayudara a conocer quiénes son los encargados de realizar la remediación de suelos contaminados en México y como lo llevan a cabo, la normatividad vigente de sitios contaminados, muestreo de sitios y los protocolos de medición de las propiedades fisicoquímicas de los sitios contaminados que se pueden realizar dentro del laboratorio para la evaluación de una muestra problema.

Las tecnologías de remediación empleadas en México, fueron divididas en base a su principio de acción o en su caso tipo de tratamiento, por ejemplo: tratamiento biológico, tratamiento fisicoquímico y tratamiento térmico. Así como también se mencionan sus costos de cada tecnología empleada para remediación de suelos.

En México existen gran variedad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos tanto orgánicos e inorgánicos, muchos de estos contaminantes son producto de actividades industriales, mineras y derrame de residuos peligrosos.

Para considerar una tecnología de remediación es muy importante contar con información de las características del suelo contaminado, posteriormente el costo de la tecnología es el siguiente punto a considerar, después en los materiales y equipo que se requieren para el tratamiento.

Las empresas que realizan remediaciones utilizan más los tratamientos biológicos como el composteo y la biolabranza. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física son también tecnologías comúnmente empleadas, en el presente trabajo enfoca este tipo de remediaciones ya que tendremos una muestra de suelo problema, para realizar análisis fisicoquímicos y determinar la mejor remediación.

De acuerdo a las características presentadas por un suelo contaminado representa un reto para elegir su remediación, ya que algunas propiedades pueden determinar el tipo de contaminante y si este es persistente o no en el ambiente, así como sus características naturales del suelo que determina la transportación del contaminante a otros sitios.

Las tecnologías de remediación actúan al destruir el contaminante o separándolo del suelo. El uso de una tecnología depende del contaminante o contaminantes, su costo y estado de desarrollo, por ejemplo: si es en escala piloto o gran escala.

4 Objetivo.

Determinar el tipo de remediación eficiente considerando su costo beneficio para su reintegración a un área natural o en dado caso detener la movilidad de los contaminantes. Con base a las características fisicoquímicas establecidas en la normatividad NMX-021-RECNAT- 2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, y clasificación de los suelos, de una muestra problema de suelo, para su caracterización

4.1 Objetivos particulares.

- Determinar las Propiedades fisicoquímicas una muestra de suelo con origen de la región minera de San Joaquín Querétaro, basándose en los protocolos de la normatividad, para determinar su caracterización de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 de la muestra de suelo.
- Seguir los protocolos de la NMX-021-RECNAT- 2000 para determinar propiedades fisicoquímicas del suelo tomando en cuenta el material del laboratorio de ingeniería química.
- Determinar la remediación de la muestra de suelo con base en las características fisicoquímicas, para realizar una comparación con lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000.
- Con base en los resultados, determinar si la remediación tuvo efecto para la destrucción o inmovilización de los contaminantes en la muestra de suelo y si este puede ser reintegrado a su área natural.

5 ¿Qué es un suelo contaminado?

Un suelo contaminado es aquel que ha sufrido cambios en sus características físicas, químicas o biológicas que por su naturaleza, dimensión o duración en el tiempo resulte incompatible con sus propiedades funcionales de uso o suponga una amenaza grave para la salud pública o el medio ambiente.

5.1 Causas y efectos de la contaminación del suelo.

El suelo ha sido utilizado para el depósito de los residuos, incluyendo aquellos que han sido removidos del aire y de la tierra. En los últimos años, la mayor parte de los esfuerzos en la protección ambiental se han abocado a limpiar el aire y el agua, así como evitar que se sigan contaminando, esto porque su relación con los problemas a la salud de la población es más directa.

La contaminación de suelo es un problema grave para ser humano y el ambiente, ya que ya que los contaminantes debido a su movilidad pueden no solo estar presentes en el suelo, si no también dispersarse en el aire y en el agua subterránea o en mares y ríos.

En algunas ocasiones la contaminación es el resultado de la aplicación de plaguicidas o fertilizantes en la tierra, o a un inadecuado almacenamiento, manejo o disposición de sustancias tóxicas, entre otras causas de la contaminación de suelos son por:

- Fugas de materiales peligrosos (en especial los hidrocarburos y sus derivados) de tanques, contenedores subterráneos, tuberías y ductos.
- Lixiviación (sólido-líquido) de residuos peligrosos en sitios de almacenamiento y en sitios donde se desarrollan actividades de manejo de residuos peligrosos.
- Derrame de residuos peligrosos en un accidente de transporte de estos.
- Mala disposición de residuos peligrosos o sólidos que se encuentren contaminados por estos en la disposición final de residuos sólidos urbanos.

Los suelos contaminados tienen consecuencias negativas en el ambiente, la salud humana y en el valor monetario del predio con un suelo contaminado, los principales efectos de la contaminación de suelos son:

- Al actuar como filtro regulador durante la recarga de acuíferos y protección de éstos, se puede contaminar el recurso hídrico de éstos.
- Modificar los ciclos biológicos, biogeoquímicos y de red trófica que se lleven a cabo en éstos.
- Modificar el hábitat biológico y de reserva para la preservación de especies y diversidad genética.
- Al ser base física para producción de alimentos contaminarlos y producir enfermedades al ser humano.
- Contaminar gran variedad de recursos forestales.

6 Historia y normativa vigente de suelos contaminados.

La protección del ambiente se origina en efecto, a partir de lo previsto en la constitución política de los Estados Unidos Mexicanos, a continuación, se muestra el orden de jerarquía de los distintos elementos que conforman la legislación ambiental en México (Figura 1).

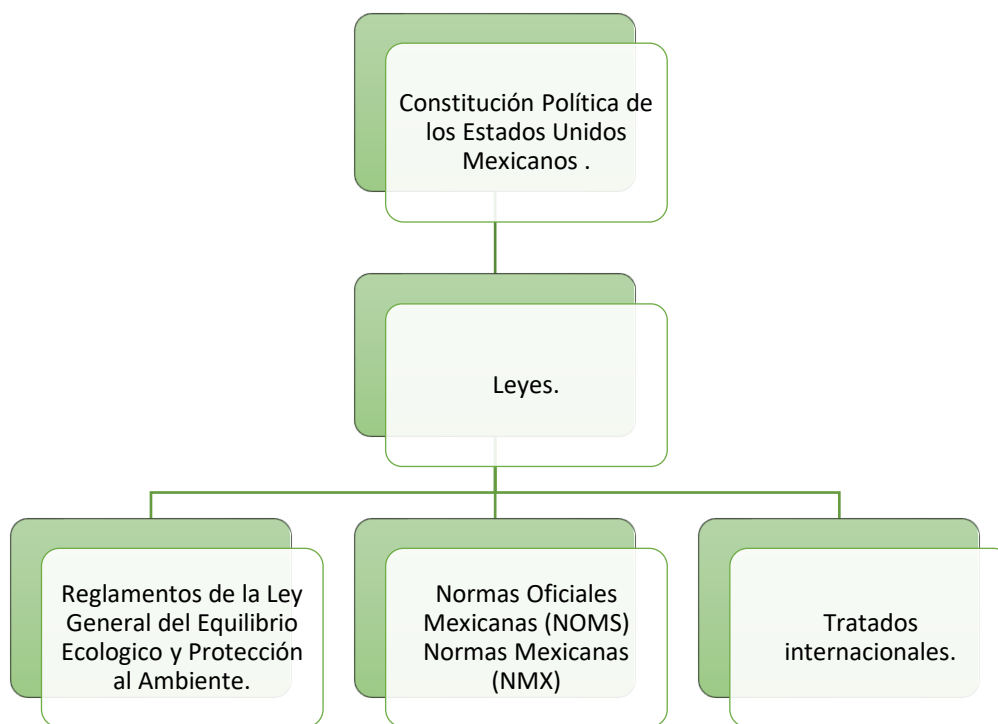


Figura 1. Jerarquía del sistema jurídico ambiental en México.

Estructura de la legislación ambiental en México.

En 1988 se estableció la regulación de los residuos peligrosos basada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) no se previó la de los sitios contaminados por ellos, sin embargo, se formularon los principios que hoy en día regulan la gestión para el control y reparación de la contaminación en los suelos contaminados:

- La responsabilidad respecto al equilibrio ecológico, comprende tanto las condiciones presentes como las que determinarán la calidad de la vida de las futuras generaciones.
- La prevención de las causas que los generan, es el medio más eficaz para evitar los desequilibrios ecológicos.

- El control y la prevención de la contaminación ambiental, el adecuado aprovechamiento de los elementos naturales y el mejoramiento del entorno natural en los asentamientos humanos, son elementos fundamentales para elevar la calidad de vida de la población.

Para reconocer que es más costoso remediar que prevenir, se llevó a regular la gestión de los sitios contaminados en el marco de la legislación para la prevención de la generación y la gestión integral de los residuos peligrosos, a fin de introducir medidas para reducir el riesgo de contaminación por residuos a lo largo de las distintas fases que comprende su manejo, además de que conducen a la remediación de dichos sitios.

La evolución en materia ambiental, el marco regulatorio y el marco normativo de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos se muestra a continuación (Tabla 1). A partir de que surgen las necesidades de implementar leyes, normas, reglamentos, incluso firmar convenios internacionales para la gestión de sitios contaminados en el país.

Tabla 1. Evolución del marco jurídico e instrumentos aplicables en la remediación de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos

Año	Constitución	Convenios internacionales	Leyes	Reglamentos	Normas Oficiales Mexicanas	Normas Mexicanas
1971			LFPA (Abrogada)			
1982			LFPA (Abrogada)			
1988			LGEEPA	Reglamento de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos (Abrogado)		
1992			LAN			
1999	Adición al artículo 4 (Ambiente adecuado)		LGPGIR			
2003						
2004		Convenio de Estocolmo (entra en vigor)			NOM-147-SEMARNAT/SS	
2005					NOM-052-SEMARNAT	
2006				Reglamento de la LGPGIR		NMX-134-SCFI y NMX-AA-132-SCFI 2007
2007						NMX-AA-141-SCFI
2008						NMX-AA-105-SCFI, NMX-AA-145-SCFI y

Tabla 1. Evolución del marco jurídico e instrumentos aplicables en la remediación de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos

Año	Constitución	Convenios internacionales	Leyes	Reglamentos	Normas Oficiales Mexicanas	Normas Mexicanas
						NMX-AA-146-SCFI
2012	Reforma (Ambiente sano y responsabilidad para quien provoque un daño)				NOM-138-SEMARNAT/SSA1	
2013			LFRA			
2014			Ley de la ASEA	Reglamento de la ASEA		NMX-AA-105-SCFI (Cancela la anterior) y NMX-AA-141-SCFI (Cancela la anterior)
2015		Convenio de Minamata (Ratificado por México)			NOM-133-SEMARNAT	
2016						NMX-AA-132-SCFI (Cancela la anterior)

Fuente: Elaborada por la DGGIMAR de la SEMARNAT.

6.1 Normatividad vigente de sitios contaminados.

En la actualidad se han Publicado 14 normas que regulan la gestión de sitios contaminados en México, para la aplicación de las Normas oficiales mexicanas (NOM) es de carácter obligatorio y son elementos fundamentales para consolidar el marco jurídico en materia ambiental en el país, ya que establecen los límites máximos permisibles de hidrocarburos o concentraciones de metales en la contaminación de los suelos, para los lineamientos para el muestreo en la caracterización de sitios contaminados y establecer las especificaciones para la remediación, estas normas dan la certidumbre a la efectividad de los resultados de la remediación de suelos contaminados.

Las normas mexicanas (NMX) son optativas, en las NMX se encuentran métodos de referencia para el análisis de contaminantes y en el caso de metales, las especificaciones para el muestreo de suelos contaminados.

En la (tabla 2) se encuentran las Normas Mexicanas y Normas Oficiales Mexicanas referidas a la regulación los sitios contaminados.

Tabla 2 Normas obligatorias y voluntarias relacionadas con sitios contaminados.

No.	Norma	Nombre
Normas oficiales mexicanas que regulan la gestión de suelos contaminados		
1	NOM-147-SEMARNAT/SS-2004	Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
2	NOM-021-RECNAT-2000	Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
3	NOM-052- SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
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.

Tabla 2 Normas obligatorias y voluntarias relacionadas con sitios contaminados.

No.	Norma	Nombre
5	NOM-133-SEMARNAT-2015	Protección ambiental-Bifenilos Policlorados (BPCs)-Especificaciones de manejo.
Normas Mexicanas que regulan la gestión de suelos contaminados		
1	NMX-AA-134-SCFI-2006	Suelos – Hidrocarburos Fracción Pesada (FP) por extracción y gravimetría – método de prueba.
2	NMX-AA-145-SCFI-2008	Suelos - Hidrocarburos Fracción Media (FM) por cromatografía de gases con detector de ionización de llama – método de prueba.
3	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.
4	NMX-AA-105-SCFI-2014	Suelos - Hidrocarburos Fracción Ligera (FL) por cromatografía de gases con detectores de

Tabla 2 Normas obligatorias y voluntarias relacionadas con sitios contaminados.

No.	Norma	Nombre
		ionización de flama o espectrometría de masas (Cancela a la NMX-AA-105-SCFI-2008).
5	NMX-AA-141-SCFI-2014	Suelos – Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos (BTEX) por cromatografía de gases con detectores de espectrometría de masas y fotoionización método de prueba (Cancela a la NMX-AA-141-SCFI-2007).
6	NMX-AA-132-SCFI-2016	Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra (Cancela a la NMX-AA-132-SCFI-2006).

Fuente: DGGIMAR de la SEMARNAT.

De acuerdo a la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN), las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) deben ser revisadas cada 5 años a partir de la fecha de su entrada en vigor y las Normas Mexicanas (NMX) dentro de los 5 años siguientes a la publicación de la declaratoria de vigencia, con el propósito de revisar si las normas deben ser actualizadas debido a nuevos criterios, lineamientos o tecnologías que haya en la disposición.

El programa de revisión o elaboración de las normas se establece en el Programa Nacional de Normalización (PNN), el cual es un instrumento de planeación, coordinación e información de las actividades de normalización que se realizan a nivel nacional e incluye el listado de temas a normalizar por parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales durante el año que corresponda.

7 Gestión de suelos contaminados.

Ante la problemática ambiental que enfrenta al país, han surgido necesidad de realizar herramientas para que la legislación ambiental regule y permita gestionar, para prevenir y realizar la remediación de los sitios contaminados con los objetivos de no alterar ningún estado base, así como preservar la salud humana.

Ante cualquier base jurídica ambiental que se desea realizar debe fundamentarse en las disposiciones que establece la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Al contar con el propósito de ubicar la regulación de la prevención de la contaminación de suelos y su remediación, dentro de la legislación ambiental de México. El marco constitucional ambiental establece los alcances que podrá tener dicha regulación.

A continuación, se citan las disposiciones jurídicas que constituyen las bases constitucionales del derecho ambiental están contenidas en los artículos 4º, 25º, 27º y 73º.

ARTÍCULO 4º. - 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.

ARTÍCULO 25°. - Bajo criterios de equidad social, productividad y sustentabilidad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía.

ARTÍCULO 27°. - La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada [...]para preservar y restaurar el equilibrio ecológico.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), como un ordenamiento se cita el artículo 73.

Artículo 73°.- Para expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y remediación del equilibrio ecológico.

La regulación recae en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA) y la Ley General para Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) ante los retos que actualmente enfrenta México por la contaminación causada por el manejo inadecuado de los residuos, en el caso de prevención y control de la contaminación de los suelos en México.

7.1 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

En 1988 se emitió la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual se establece la prevención de la contaminación de suelos como una mala disposición de los residuos, así como de proceder a su remediación.

En el artículo 3° fracción XXXIII indica las implicaciones de realizar la restauración de los procesos naturales, así como la definición de residuos peligrosos.

Artículo 3°. - fracción XXXIII, restauración se define como el conjunto de actividades tendentes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales. En ese sentido la restauración implicaba realizar acciones tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones del suelo que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

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

Con ayuda de la regulación de la LGEEPA, la definición de residuo cubrió prácticamente a todos los materiales generados en los distintos ámbitos productivos, procesos de tratamiento o actividades de consumo, a condición de que su calidad impidiera su empleo en los mismos procesos en los que se generaron (SEMARNAT, 2007). En dicha Ley, se definen los siguientes conceptos:

- Contaminación: la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.
- Contaminante: toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural.
- Material peligroso: elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, represente un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico infecciosas.

En cuanto a la prevención y control de la contaminación del suelo para su protección, a continuación, se presentan los artículos de esta Ley relacionados con la regulación de hidrocarburos, en tanto se consideran residuos peligrosos, así

Se establecen criterios en los que éstos deben sustentarse y ser tomados en consideración al emitir los actos de autoridad correspondientes a los que se hace

mención en dichos artículos; que en el caso de las autoridades federales se relacionan con la gestión de los materiales y residuos peligrosos, y en el de las autoridades locales con la gestión de los residuos sólidos.

7.2 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)

Publicada en octubre de 2003, establece bases legales que hacen referencia a la prevención de la contaminación de sitios con residuos peligrosos, así como a su remediación.

En el primer artículo señala que uno de sus objetos es establecer bases, para entre otros, lograr fines relacionados con la generación de información confiable, armonizada y pertinente para orientar la toma de decisiones.

ARTÍCULO 1.- La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

Dentro de la ley en su artículo 5, fracciones XXVIII, XL y XLI se localizan las definiciones de Remediación, sitio contaminado y tratamiento.

XXVIII.- Remediación: 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.

XL.- Sitio Contaminado: lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o

residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas.

XLI.- Tratamiento: procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se cambian las características de los residuos y se reduce su volumen o peligrosidad.

Es importante mencionar que la definición de residuo peligroso se debe puntualizar, ya que es un punto muy importante para identificar la problemática del sitio contaminado, dentro de la fracción XXXII se señala la definición.

XXXII.- Residuos Peligrosos: son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que *hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley.*

Esta ley establece que los generadores de residuos peligrosos, así como sus gestores deben apegarse a la normatividad ambiental vigente y cuenten con sus respectivas autorizaciones vigentes, para el manejo de residuos.

ARTÍCULO 41.- Los generadores de residuos peligrosos y los gestores de este tipo de residuos, deberán manejarlos de manera segura y ambientalmente adecuada conforme a los términos señalados en esta Ley.

Además, que realizan tratamiento de los residuos peligrosos y prestan servicios para su manejo deberán presentar su información técnica para su sustento, así como lo demanda la ley.

ARTÍCULO 58.- Quienes realicen procesos de tratamiento físicos, químicos o biológicos de residuos peligrosos, deberán presentar a la Secretaría los procedimientos, métodos o técnicas mediante los cuales se realizarán, sustentados en la consideración de la liberación de sustancias tóxicas y en la propuesta de medidas para prevenirla o reducirla, de conformidad con las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan.

En el artículo 69, las acciones de remediación que se deben llevar a cabo en los sitios contaminados, conforme lo establece la Ley y su Reglamento, así como la realización de las actividades relacionadas con el manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación.

ARTÍCULO 69.- Las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación de sitios con éstos, están obligadas a llevar a cabo las acciones de remediación conforme a lo dispuesto en la presente Ley y demás disposiciones aplicables.

7.3 Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA)

Esta ley nace del compromiso de determinar la responsabilidad de los daños ocasionados al medio ambiente y a las personas pertenecientes al Estado Mexicano, con motivo a un mejoramiento al sistema jurídico mexicano en donde se hacía falta regular las acciones que se realizaban en contra del medio ambiente.

Como un ejemplo se hace mencionar el artículo 13 de la (LFRA):

ARTÍCULO 13.- La reparación de los daños ocasionados al ambiente consistirá en restituir a su Estado Base los hábitats, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, sus condiciones químicas, físicas o biológicas y las relaciones de interacción que se dan entre estos, así como los servicios ambientales que proporcionan, mediante la restauración, restablecimiento, tratamiento, recuperación o remediación. La reparación deberá llevarse a cabo en el lugar en el que fue producido el daño. Los propietarios o poseedores de los inmuebles en los que se haya ocasionado un daño al ambiente, deberán permitir su reparación, de conformidad a esta Ley.

En cuanto a la definición del estado base de un sitio contaminado se cuenta con la definición en la ley:

VIII.- Estado base: Condición en la que se habrían hallado los hábitats, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, las relaciones de

interacción y los servicios ambientales, en el momento previo inmediato al daño y de no haber sido éste producido.

De acuerdo al análisis de lo que establece la ley, obliga a realizar una restauración de los sitios contaminados y llevarlos a su estado base.

7.4 Entidades Federativas que realizan la gestión de sitios contaminados

La realización de la gestión de suelos contaminados es realizada por entidades federativas, cuando son propietarias de los predios cuyos suelos han sido contaminados, también son responsables de su remediación, sin embargo, las entidades federativas no siempre cuentan con la capacidad técnica o económica suficiente para llevar a cabo una remediación.

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, a través de la Dirección de Restauración de Sitios Contaminados (DRSC) de la dirección general de gestión integral de materiales y actividades riesgosas (DGGIMAR), desarrolla acciones para identificar, inventariar, registrar y categorizar los sitios contaminados con residuos peligrosos, asimismo autoriza la transferencia de sitios contaminados, los programas de remediación tanto para emergencias como pasivos ambientales, a prestadores de servicios para el tratamiento de suelos contaminados y la conclusión de los programas de remediación de sitios (con excepción de las actividades del Sector Hidrocarburos).

La SEMARNAT puede participar en la remediación de un sitio contaminado con materiales o residuos peligrosos que representen un riesgo al medio ambiente y la salud humana:

- Cuando se realice una declaratoria de un sitio contaminado como abandonado (Art. 73 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR))
- El sitio haya sido expropiado por causa de utilidad pública (Art. 3 LGPGIR)
- Se expida una declaratoria de remediación por el ejecutivo federal (Art.73 LGPGIR)

- El sitio sea propiedad de alguna entidad federativa o municipio (Art. 29, fracción XV del reglamento de la SEMARNAT)
 - Se realice una remediación por mandato federal o a través de un laudo arbitral internacional (Art. 29, fracción XIII del reglamento de la SEMARNAT)
- Esta participación de la SEMARNAT no implica la sustitución de responsabilidades de la remediación del sitio.

La SEMARNAT, a través de la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) en coordinación con los gobiernos estatales y municipales, ha participado en acciones e invertido recursos públicos para la remediación de sitios contaminados considerados pasivos ambientales desde 2003.

Los artículos 68, 69 y 70 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) establecen que los responsables de la remediación de un sitio contaminado con materiales o residuos peligrosos son:

- Las personas físicas o morales que, directa o indirectamente, contaminen un sitio u ocasionen un daño o afectación al ambiente.
- Las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación de sitios con éstos.
- Los propietarios o poseedores de predios de dominio privado y los titulares de áreas concesionadas, cuyos suelos se encuentren contaminados.

8 Contexto internacional de los sitios contaminados.

A nivel internacional existe gran preocupación por la contaminación de los suelos, por lo que se han valido de programas y marco normativo para identificar, clasificar y remediar los suelos contaminados.

8.1 Organización de las Naciones Unidas (ONU).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) desde 1992 en la cumbre del río, reconoció la importancia de la preservación de los suelos y sus usos potenciales en

el desarrollo sustentable, además de la existencia de “convenios internacionales” que incluyen sitios contaminados. Por ejemplo: Convenio de Estocolmo y Minamata.

8.2 Convenio de Estocolmo.

Se refiere a los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) que son tóxicos, así como preexistentes a la degradación y se bioacumulan en los seres vivos, su transporte es por el aire, el agua, o bien por medio de las especies, por lo que atraviesan fronteras internacionales y se depositan lejos del lugar de su liberación, acumulándose en ecosistemas terrestres y acuáticos.

El artículo 6 del Convenio de Estocolmo señala: Cada Parte se esforzará por elaborar estrategias adecuadas para identificar los sitios contaminados con productos químicos incluidos en el Anexo A, B o C; y en caso de que se realice el saneamiento de estos sitios, ello deberá efectuarse de manera ambientalmente racional (Stockholm Convention, 2009).

8.3 Convenio de Minamata.

El Convenio de Minamata tiene por objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de Mercurio y compuestos de Mercurio (ONU Medio Ambiente, 2017). Este convenio fue ratificado por México el 29 de septiembre de 2015. El Convenio establece en su Artículo 12, referente a sitios contaminados, que cada Parte procurará elaborar estrategias adecuadas para identificar y evaluar los sitios contaminados con Mercurio o compuestos de Mercurio. Además, alienta a las Partes a cooperar en la formulación de estrategias y la ejecución de actividades para detectar, evaluar, priorizar, gestionar y, según proceda, sanear sitios contaminados (PNUMA, 2013).

9 Contaminantes.

Los compuestos químicos se clasifican en orgánicos e inorgánicos. Los compuestos orgánicos se componen de átomos de carbono, y su origen es antropogénico o natural.

Los compuestos orgánicos se dividen en seis grupos:

- a) Compuestos orgánicos volátiles (COV).
- b) Compuestos orgánicos volátiles halogenados (COV halogenados).
- c) Compuestos orgánicos semivolátiles (COS).
- d) Compuestos orgánicos semivolátiles no halogenados (COS halogenados).
- e) Combustibles.
- f) Explosivos.

Los compuestos inorgánicos no contienen átomos de carbono e incluyen a los metales.

10 Caracterización de los suelos.

El suelo constituye un recurso natural, que realiza diversas funciones dentro de los ecosistemas, proporcionando un soporte mecánico, así como nutrientes para el crecimiento de las plantas, y microorganismos.

La matriz del suelo está constituida por cinco componentes principales:

- Minerales.
- Aire.
- Agua.
- Materia orgánica.
- Organismos vivos.

Las características de un suelo pueden determinar la selección de un proceso de remediación. Por otra parte, la selección de una tecnología de remediación puede eliminarse con base en la clasificación de una muestra de suelo, u otras características del suelo. A continuación, se describen los datos que se pueden obtener con facilidad y en un tiempo corto, para clasificar una muestra de suelo y controlar la eficiencia de una tecnología de remediación.

- **Tamaño de partícula:** Una muestra de suelo se clasifica en función del tamaño de sus partículas, teniendo en cuenta sus principales componentes:
 - Arcillas: Tamaño de partículas (<0.002 mm).
 - Sedimentos: Tamaño de partículas (0.002-0.05 mm)

- Arenas: Tamaño de partículas (0.5-2.0 mm).

Considerar esta característica es muy importante ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partículas, tienen un impacto directo en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, por lo tanto, impactan en la eficiencia de una tecnología de remediación, en general las arenas y las gravas finas son más fáciles de tratar.

- **Heterogeneidad:** un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de las tecnologías “In situ” que dependan del flujo de un fluido ya que podrían crearse canales indeseables en el suelo y alterar los resultados de una tecnología de remediación.
- **Densidad Real:** Es la relación de la masa del suelo con su volumen, donde la masa del suelo es medida directamente del peso del suelo y su volumen indirectamente con la densidad del agua, midiendo la cantidad de volumen desplazado por el suelo.
- **Permeabilidad:** Es la facilidad o dificultad de un líquido para fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo, es uno de los factores que controla la efectividad de las tecnologías in situ, en general una baja permeabilidad disminuye significativamente la efectividad de una tecnología de remediación.
- **pH:** el pH de un suelo determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando la solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de los contaminantes, y otros constituyentes del suelo. Además, muchos contaminantes inorgánicos cambian en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de PH.
- **Humedad:** la humedad de un suelo es un factor importante a la hora de seleccionar una tecnología de remediación, si el suelo contiene una alta humedad impide el movimiento del aire a través de las partículas del suelo, además de causar problemas a la hora de excavar y transportar el suelo, en el caso particular de las tecnologías térmicas tiene a aumentar los costos.

- **Materia orgánica:** El contenido de materia orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus.

11 Características y propiedades de la materia orgánica de los suelos.

La materia orgánica de los suelos constituye un factor muy importante en la caracterización de los suelos, ya que en el caso de la fertilidad de un suelo esta característica provee de nutrientes para plantas y microorganismos.

De esta propiedad derivan reacciones químicas ya sea mediadas o gobernadas por la materia orgánica, entre las que se incluyen el intercambio iónico, oxido-reducción, complejación de metales y adsorción de complejos orgánicos naturales.

La materia orgánica está constituida por:

- Restos de animales o vegetales en fase de descomposición microbiana.

Sustancias no Húmicas, por ejemplo:

- Polisacáridos.
- Ligninas.
- Polímeros lipídicos.
- Proteínas.
- Resinas.
- Tintas de origen vegetal.
- Sustancias húmicas producto de la degradación microbiana de residuos orgánicos.

La composición de la materia orgánica aporta datos de interés acerca de la estabilidad y calidad ambiental de los ecosistemas, de su fertilidad potencial y de la actividad físico químico de los correspondientes suelos.

12 Tecnologías de tratamiento para suelos contaminados.

Las tecnologías de tratamiento implican cualquier operación unitaria o procesos de operaciones unitarias que alteran la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas para su remediación o disminución de su toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA 2001).

Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición de desechos peligrosos que no han sido tratados y sus capacidades.

Las posibilidades de éxito, estas pueden variar según sea el caso de las condiciones del sitio y las propiedades fisicoquímica del contaminante, así como la escala de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (Sellers 1999).

12.1 Clasificación de las tecnologías de remediación.

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

- A) Estrategia de remediación.
- B) Lugar en que se realiza el proceso de remediación.
- C) Tipo de tratamiento.

Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación, se detallara cada una de las clasificaciones.

- Estrategia de remediación:
 - Destrucción o modificación de los contaminantes: Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.
 - Extracción o separación: Los contaminantes se extraen y/o separan del sitio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica, etc.)

- Aislamiento o inmovilización del contaminante: Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos para su tratamiento.
- Lugar de realización del proceso de remediación:
 - In situ: Los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.
 - Ex situ: Para remover los contaminantes se requiere de excavación o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (on site) o fuera de él (off site).
- EL Tipo de tratamiento se divide en tres:
 - Tratamientos biológicos (biorremediación): En este tipo de tratamientos se utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
 - Tratamientos fisicoquímicos: Este tipo de tratamientos se utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del sitio contaminado para quitar, separar o contener la contaminación.
 - Tratamientos térmicos: Utilizan las propiedades del suministro de calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

Las tecnologías de tratamientos de suelo pueden encontrarse en estas clasificaciones ya dependiendo de la necesidad de la remediación, ya que hay varios factores a considerar como el costo de la remediación ya que si el costo es muy elevado no sería factible realizar la remediación del suelo contaminado, es importante innovar en el actual estado del país para poder resolver los grandes problemas que nos causa la contaminación de los suelos ya que no solo afecta al ser humano, si no al ecosistema entero, a continuación se enlistan las tecnologías más importantes para suelos contaminados.

12.2 Desorción térmica

La desorción térmica es un proceso ex situ que consiste en calentar (90° a 540°C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el propósito de conseguir la desorción en vez de la destrucción de los contaminantes al incinerarlos (Figura 2). El calor acelera la liberación y el transporte de contaminante a través del suelo, hasta ser dirigidos a un sistema de tratamiento de gases con el uso de un gas acarreador o un sistema de vacío. En si es un proceso de separación física y no destruye el contaminante, en base a la temperatura de operación la desorción térmica se puede clasificar en dos grupos:

- Desorción térmica de alta temperatura: Es una tecnología a gran escala en el cual los desechos son calentados a temperaturas que varían entre los 320°C y 560°C . se utiliza en combinación con la incineración dependiendo de las condiciones específicas del suelo contaminado.
- Desorción térmica de baja temperatura: los contaminantes de calientan a temperaturas que van desde los 90°C hasta los 320°C es una tecnología a gran escala.

La desorción térmica puede implementarse por:

- A) Inyección de vapor.
- B) Inyección a presión de aire caliente.
- C) Calentamiento del suelo por ondas de radio (radio frecuencia) que producen energía que se transforma a energía térmica.

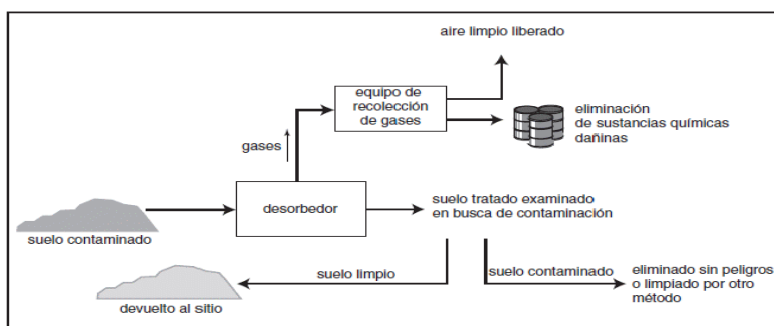


Figura 2. Desorción térmica. Fuente: <http://med.se-todo.com/himiya/43272/index.html>

El proceso de desorción térmica puede aplicarse en general para la separación de compuestos orgánicos, su costo varía entre los 50 y 350 USD/m³, si se realiza con vapor su costo es de hasta más de 400 USD/ m³.

12.3 Extracción por solvente

Este proceso utiliza solventes orgánicos para disolver contaminantes y así removerlos del suelo contaminado, posteriormente el solvente requiere un tratamiento ya sea para destruir o separar los contaminantes, esta tecnología presenta limitaciones ya que puede modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo, además de que puede reaccionar con el suelo y reducir su movilidad de los contaminantes.

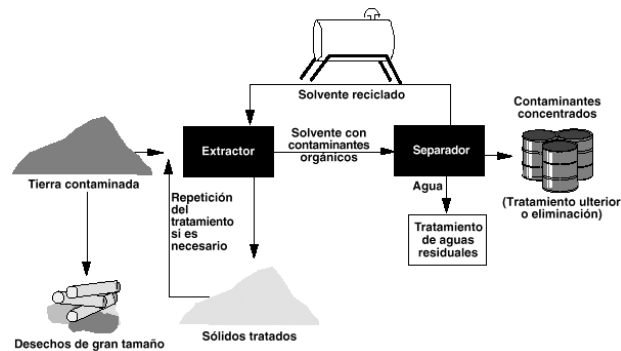


Figura 3. Extracción por solvente. Fuente: Curso de 100h de Recuperación de suelos contaminados. Abril 2008.

12.4 Lavado de suelos

Los contaminantes sorbidos en las partículas finas del suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas en un suelo excavado, de esta manera ayuda a reducir el volumen y concentración de material contaminante ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo.

El lavado de suelos (Figura 4) se ha utilizado con éxito en suelos contaminados con hidrocarburos, pesticidas y metales pesados, las limitaciones de esta tecnología, pues es difícil tratar suelos poco permeables su costo promedio es de 150 USD/m³.



Figura 4. Lavado de suelos. Fuente: Curso de 100h de Recuperación de suelos Contaminados. Abril 2008.

12.5 Inundación de suelos.

Esta tecnología inyecta o aplica al suelo grandes cantidades de agua, en ocasiones con algún aditivo, los cuerpos de agua cercanos se aplican para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada, favoreciendo así el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación, debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada.

El costo de la inundación varía entre los 20 y 200 USD/m³.

12.6 Extracción de vapores.

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. Comúnmente la tecnología se lleva a cabo in situ. Sin embargo, en algunos casos, puede usarse como una tecnología ex situ (Roser-Roberts 1998, EPA 2001). La efectividad de esta tecnología depende principalmente de la volatilidad de los contaminantes, de la permeabilidad y homogeneidad del suelo contaminante.

Generalmente es utilizada para remediar sitios contaminados por derrames o fugas de contaminantes orgánicos volátiles (COV) y algunas gasolinas, esta tecnología no es recomendable para la remoción de aceites, pesados, metales o dioxinas. La tecnología es aplicable solo para compuestos volátiles, la humedad, la materia orgánica y permeabilidad del suelo al aire afectan al proceso no es adecuada para zonas saturadas, su costo varía de 10 USD/m³ a los 50 USD/m³.

12.7 Extracción multifásica

Es una tecnología en la cual se utiliza el vacío para extraer gases volátiles y agua subterránea para separarlos en el exterior y tratarlos para su depuración.

El agua y los gases extraídos del proceso son tratados en el mismo emplazamiento para sus respectivos módulos de tratamiento.

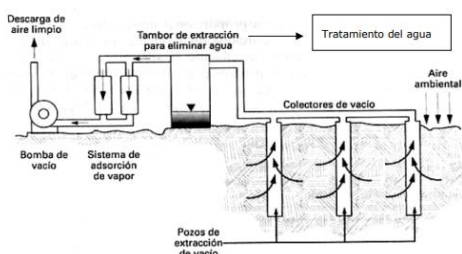


Figura 5. Extracción multifásica. Fuente: Curso de 100h de Recuperación de suelos Contaminados. Abril 2008.

12.8 Catálisis química.

La catálisis química transforma los contaminantes en productos inocuos para el medio ambiente, la tecnología utiliza sustancias abióticas, normalmente oxidantes. Los radicales hidróxidos OH^\cdot son mucho más efectivos. Los oxidantes de uso más común son el peróxido de hidrógeno, el ozono y el permanganato de potasio.

Los agentes oxidantes para actuar deben de entrar en contacto con los contaminantes y este contacto se ve dificultado en suelos con baja permeabilidad. Es una técnica que se puede utilizar combinándola con la tecnología de biorremediación in situ.

12.9 Inyección de aire.

Esta tecnología permite reducir la concentración de contaminantes volátiles en la zona saturada por medio de una extracción con vapor, el suelo permite la extracción de contaminantes.

La tecnología consiste en la inyección de aire a través de bombas, que al pasar por conductos entra en aire en contacto con el agua y permite que las burbujas de aire que se generan atrapen a los contaminantes.

El aire que se utiliza en esta tecnología está compuesto de ozono y el mecanismo con los contaminantes es que se oxidan, si el suelo contiene contaminantes volátiles la tecnología puede ser más eficiente suministrando vapor en vez de aire, el aire o el vapor suministrado sale a través de los pozos de extracción y este se debe tratar con un tratamiento secundario dentro del proceso.

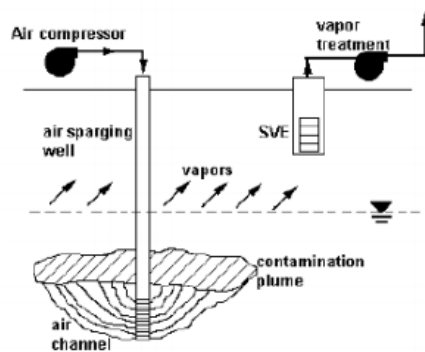


Figura 6. Inyección de aire. Fuente: web Clu-in. Technologies.

12.10 Bombear y tratar.

Esta tecnología consiste en extraer agua contaminada del subsuelo mediante bombas en pozos de extracción para su posterior tratamiento ex situ, esta tecnología se aplica para contaminantes con alta solubilidad en agua y baja absorción en el suelo, ya que una vez tratada el agua puede volver inyectarse al manto acuífero o en otro punto.

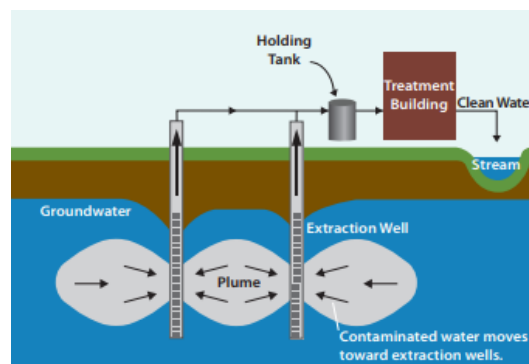


Figura 7. Pump and treat. Fuente: <https://enviraj.com/Pump%20and%20Treat.html>

12.11 Biorremediación.

Esta tecnología puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse in situ o ex situ, en condiciones aerobias (presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis et. Al. 1998). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación esta tecnología ha tenido éxito para el tratamiento de suelos, lodos, y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo (HTP), solventes como el benceno y tolueno, explosivos como el TNT, clorofenoles (PCP), pesticidas, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Van Deuren et, al. 1997).

Esta tecnología cuenta con tecnologías in situ para estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes, para lograr este objetivo se suministra aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y/o humedad, además de controlar la temperatura y el PH (EPA 2001).

Los procesos de remediación ex situ incluyen:

- Procesos de biodegradación de fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes.
- Biodegradación de fase sólida, donde el suelo se coloca en una celda de tratamiento a esto se le llama composteo o sobre membranas impermeables a esta se le llama biolabranza, en donde se les agrega agua y nutrientes (EPA 2001).

12.12 Tratamiento químico

El tratamiento químico, también conocido como óxido-reducción química, es una tecnología innovadora que implica reacciones de óxido- reducción (redox), las cuales transforman los elementos potencialmente tóxicos en compuestos o elementos no peligrosos o menos riesgosos, reduciendo su toxicidad o su solubilidad y/o aumentando su estabilidad química. Cuando se requiere tratar contaminación por metales y/o metaloides, se busca cambiar el estado de valencia,

ya que de éste depende la capacidad del metal para reaccionar con otros contaminantes o compuestos presentes en el suelo y, por consiguiente, su precipitación; de esta manera, es posible disminuir la concentración biodisponible del elemento potencialmente tóxico en el suelo (US EPA 2001).

El procedimiento puede realizarse in situ o ex situ y combinarse con otras técnicas como la inundación (el agente oxidante o reductor se disuelve en el medio de inundación) o el lavado de suelos (en este caso es deseable que las reacciones redox se desarrollen en el extracto del lavado), o aplicarse directamente en el suelo contaminado a través de una solución, sin llegar a inundarlo; en este último caso, los metales se quedan en el sitio (Averett et al. 1989). Las reacciones redox, necesariamente, implican la transferencia de electrones de un compuesto a otro (el agente oxidante gana electrones, mientras el agente reductor los pierde). La velocidad y duración del tratamiento está dirigida por las características del contaminante, su reactividad con los químicos utilizados y las características del suelo (permeabilidad, pH, temperatura y contenido de materia orgánica); todos estos parámetros pueden afectar la reacción redox y obligar a incrementar la cantidad de reactivo utilizado.

La tecnología se encuentra disponible comercialmente; sin embargo, no puede aplicarse de forma genérica. Es necesario analizar y experimentar con las propiedades particulares de cada suelo para determinar las características que deben tener los agentes oxidantes o reductores. Algunos de los oxidantes más comunes para este tratamiento son: ozono, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio, reactivo Fenton (formado por una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso), hipoclorito, cloro y dióxido de cloro. Como agente reductor puede utilizarse ácido sulfhídrico, de forma que el sulfuro reaccione con metales divalentes como Pb^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Cd^{2+} , formando un complejo insoluble (sulfuro metálico) que precipita en la matriz del suelo. Sin embargo, la aplicación del ácido puede limitar la efectividad de la reacción, ya que muchos suelos tienen una gran capacidad amortiguadora, de manera que el sulfuro liberado es neutralizado rápidamente por otros elementos; por esta razón, realizar la reacción directamente en el suelo puede

representar altos gastos en reactivos y la destrucción de este al abatir su capacidad de amortiguamiento (US EPA 2000).

12.13 Fitorremediación.

Es una tecnología donde el proceso que utiliza se siembran plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos en suelos, lodos y sedimentos, puede aplicarse tanto in situ como ex situ, entre los mecanismos que presenta la Fitorremediación incluyen:

Rizo degradación: Consiste en la eliminación de contaminantes orgánicos (hidrocarburos aromáticos o pesticidas) en el suelo a través de la actividad microbiana estimulada por la presencia de la planta en la rizosfera. La ventaja que tiene esta técnica es que el contaminante se elimina *in situ*, por lo que no hay ningún transporte del contaminante a la planta.

Fitoextracción: Consiste en la eliminación de los contaminantes del subsuelo mediante la absorción por las raíces de las plantas y su translocación a la parte aérea. Estos contaminantes son generalmente metales (plata, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, magnesio, níquel, plomo, zinc), aunque también pueden ser no metales. Las especies que se utilizan para esta técnica de fitorremediación son plantas de elevada tasa de crecimiento y biomasa, puesto que son capaces de absorber entre un 0.1 y un 1 % del peso en materia seca del contaminante. Además, son capaces de tolerar elevada concentración de metales pesados en tallos y hojas. Generalmente se utilizan especies que no son consumidas por animales.

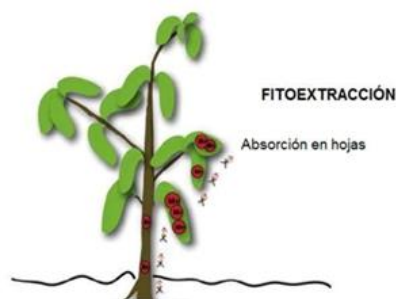


Figura 8. Fitoextracción. Fuente: <https://www.massscience.com/2015/05/19/el-potencial-de-la-fitorremediacion-como-tecnologia-medioambiental/>

- Fitoestabilización: Consiste en la precipitación o inmovilización de contaminantes en el suelo (Figura 9), en la superficie de las raíces o en

el tejido de la raíz con el objetivo de que éstos no estén de manera biodisponible en el sedimento, evitando así que puedan extenderse a otras zonas por procesos de lixiviación. Estos contaminantes son generalmente metales.

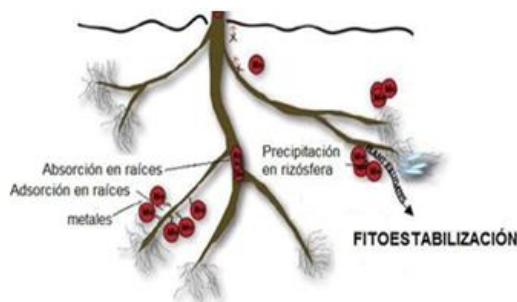


Figura 9. Fito estabilización Fuente: <https://www.massscience.com/2015/05/19/el-potencial-de-la-fitorremediacion-como-tecnologia-medioambiental/>

- Fito degradación: Es la capacidad de las plantas para producir enzimas o co-factores que son necesarios para degradar contaminantes orgánicos del suelo, sedimentos o aguas subterráneas. Esta capacidad tiene la ventaja de que puede darse en suelos pobre en microorganismos, donde no hay demasiada biodegradación.

12.14 Electroremediación.

La remediación electrocinética o electrorremediación es una tecnología innovadora que puede utilizarse para la remediación in situ de suelos contaminados con metales o compuestos orgánicos polares; es una técnica aplicable principalmente a suelos de baja permeabilidad.

➤ Descripción del proceso

El principio de la electroremediación se basa en la aplicación de una corriente directa de baja intensidad a través del suelo contaminado, con el uso de electrodos divididos en extremos anódicos y catódicos (Figura 14). El campo eléctrico moviliza las especies cargadas hacia los electrodos, de manera que los iones metálicos, el amonio y los compuestos orgánicos cargados positivamente se moverán hacia el cátodo, mientras que los aniones (cloro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente) se moverán hacia el ánodo. La corriente

eléctrica genera la formación de un frente ácido en el ánodo y uno básico en el cátodo a partir de la disociación de algunas moléculas de agua; esta generación de condiciones ácidas puede ayudar a la desorción, disolución y transporte de algunos contaminantes metálicos hacia sistemas de recolección ubicados en el cátodo (Probstein 1994).

Electrorremediación in situ de un suelo contaminado. Durante el proceso, los iones con carga positiva (cationes) migran hacia el cátodo y los de carga negativa (aniones), hacia el ánodo.

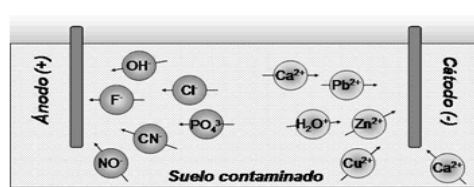


Figura 10. Electroremediación. Fuente: Van Deuren 2002.

Los dos principales mecanismos de transporte de contaminantes a través del suelo hacia los electrodos son la electromigración y la electroósmosis (Probstein 1994). La aplicación de un gradiente de potencial, da como resultado el transporte de iones (electro-migración), el transporte del agua de solvatación de dichos cationes (electro-ósmosis) y el arrastre mecánico de coloides y microorganismos como bacterias (electroforesis). La electro-migración es el mecanismo principal durante la electroremediación. La dirección y velocidad de movimiento de una especie iónica depende de su carga (magnitud y polaridad) y de la magnitud de la electro-ósmosis inducida por la velocidad del flujo. Las especies orgánicas o inorgánicas no cargadas también pueden movilizarse debido al fenómeno electro-osmótico causado por el flujo del electrolito (US EPA 1996). El proceso puede llevarse a cabo básicamente de dos maneras:

Remediación mejorada. Se lleva al cabo por el transporte electrocinético de los contaminantes hacia uno de los electrodos para su extracción y tratamiento o disposición ex situ. Puede realizarse por diversos métodos como la precipitación, la co-precipitación en el electrodo, el bombeo del agua cercana al electrodo y el acomplejamiento en columnas de intercambio iónico. Este tratamiento es recomendable para suelos contaminados con metales.

Tratamiento sin remoción. Se logra por el transporte electro-osmótico de los contaminantes a través de zonas de tratamiento colocadas entre los electrodos; la polaridad de los mismos es revertida periódicamente, por lo que el flujo electro-osmótico cambia de dirección, pasando frecuentemente por las zonas de tratamiento. Este método es recomendado para suelos contaminados con especies orgánicas (US DOE 1995).

13 Investigación preliminar (Fase I).

Dentro de la investigación preliminar se realizó la investigación bibliográfica de las principales tecnologías de remediación de suelos comúnmente utilizadas en México, las tecnologías de remediación para suelos fueron divididas con base a su principio de acción o tipo de tratamiento: biológicas, fisicoquímicas y térmicas.

Algunas de las más importantes acerca del uso de las tecnologías de remediación para sitios contaminados son:

- En México existe actualmente una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, tanto orgánicos como inorgánico, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos.
- Antes de considerar el uso de una tecnología de remediación para un sitio particular, es indispensable contar con información del sitio y llevar a cabo su caracterización, así como la del contaminante a tratar. Posteriormente, la tecnología puede elegirse con base en sus costos y la disponibilidad de materiales y equipo para realizar su tratamiento.

Resultados acerca del tipo de contaminantes tratados en sitios contaminados en Estados Unidos de América, indican que más del 80% de los proyectos de remediación están dirigidos hacia contaminantes orgánicos (EPA 2001).

En México al igual que en Estados Unidos, la mayor parte de los suelos contaminados están sometidos a tratamientos de remediación in situ (~80%), más que tratamientos ex situ (~12%).

El total de las empresas autorizadas para remediar suelos en México, más de la mitad emplean métodos biológicos, siendo los más utilizados el composteo y la biolabranza. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías de remediación de suelos contaminados con metales.

13.1 Costos de las tecnologías

Tabla 3 Costos de la Tecnología

Tecnologías in situ	
Tecnología	Costo
Bioventeo	Entre 10 y 70 USD/ m ³ .
Bioestimulación	Entre 30 y 100 USD/ m ³ .
Bioaumentación	No implica mucho capital ni costos de operación.
Biolabranza	Entre 30 y 70 USD/ m ³
Fitorremediación	Entre 24 y 40 USD/ m ³
Tecnologías ex situ	
Tecnología	Costo
Biorremediación en fase sólida (composteo)	Entre 130 y 260 USD/ m ³
Biorremediación en fase de lodos (biorreactores)	130 y 200 USD/ m ³
Tecnologías de remediación fisicoquímicas	Costos bajos depende de la técnica
Remediación electrocinética (RE)	cercanos a 50 USD/m ³
Lavado de suelos, extracción por solvente e inundación de suelos	Para la inundación oscilan entre 20 y 200 USD/ m ³ , y para el lavado el costo promedio es de 150 USD/ m ³
Tecnología	Costo
Extracción de vapores (EV)	Los costos de operación de la EV se encuentran entre 10 y 50 USD/ m ³
Solidificación/estabilización (S/E)	Depende de las técnicas y equipos a utilizar, pero son caros.
Tratamiento químico	Entre 190 y 600 USD/ m ³
Separación física	Depende de las técnicas y equipos a utilizar
Tecnologías de remediación térmicas	La limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos varía entre 50 y 350 USD/ m ³ . En términos generales, la remediación con uso de vapor puede costar más de 400 USD/ m ³ .

Incineración	Entre 200 y 1000 USD/ton; para tratar suelos contaminados con dioxinas y BPC los costos van desde los 1,500 a 6,000 USD/ton.
Vitrificación	Los costos de operación de la vitrificación varían en función de los costos de energía eléctrica, humedad del sitio y profundidad a la que se realice el proceso.

Fuente: Volke Sepúlveda, Tania y Velasco Juan Antonio, Tecnologías de remediación para suelos contaminados, México: INE-SEMARNAT.

14 Descripción del caso de estudio

14.1 Localización

San Joaquín se localiza al norte del estado de Querétaro, entre 99° 22' y los 99° 39' de longitud Oeste, y entre los 21° 07' y 20 ° 53' de latitud Norte, a una altura de 2,440 msnm.

En el norte del municipio limita con el municipio de Pinal de Amoles y Jalpa de la sierra, en el este con el estado de Hidalgo y al oeste con el municipio de Cadereyta.

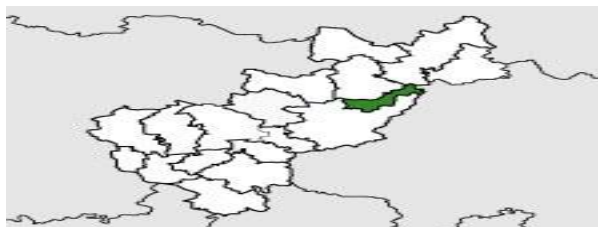


Figura: 13. Ubicación del municipio San Joaquín Querétaro. Fuente: <http://www.queretaro.gob.mx>

14.2 Clima

En el municipio prevalece el clima de tipo templado-húmedo con verano fresco y una temperatura media anual de 14° C; siendo los meses de abril y mayo los más calurosos con un promedio de 30° C.

La precipitación pluvial anual promedio es de 1 150mm. La estación invernal se presenta en los meses de noviembre, diciembre y enero, al cambiar la dirección de los vientos del Norte que propician el descenso de la temperatura que, en algunos días, está por debajo de los -3° C.

En el municipio prevalecen cuatro tipos de clima con las siguientes características:

- a) Semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media.
- b) Semicálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad.
- c) Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad.
- d) Templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad.

14.3 Orografía

El municipio de encuentra cerca de la Sierra Gorda de Querétaro, entre zonas montañosas y boscosas por lo que su topografía ha sido explotada, en el municipio también se encuentran cerros que llegan a los 2,680 metros de altura y algunas barrancas profundas por los que circulan arroyos.

Tabla 4 Cerros con mayor altitud en el municipio

Cerro	Altitud (msnm)
Maguey Verde	2,300
Mojonero	2,340
San Antonio	2,680

Fuente: Consejo Estatal de Población, Demos Gráficos Querétaro. 2001.

14.4 Población

Tabla 5 Datos generales de Población

Población 2005	7,634 habitantes
Población 2010	8,865 habitantes
Superficie	277.687 km ²
Densidad de población	31.92 Habitantes/km ²
Tipo de urbanización	No urbano

Fuente: INEGI.

14.5 Tipo de industria

En el municipio de san Joaquín se desarrolla la industria minera, en el estado de Querétaro se localizan las regiones mineras que de agrupan de acuerdo al tipo de

mineralización que se obtenga en las regiones en la siguiente tabla se mencionan las regiones y el tipo de mineral que se obtiene:

Tabla 6 Regiones mineras del municipio de San Joaquín

Región minera	Zona o distrito minero	Sustancia
I.- Pinal de Amoles	1. Animas 2. Rio Blanco 3. El soyatal 4.-plazuela 5.- Bucareli	Au, Ag, Pb, Zn, Hg, Sb
II. San Joaquín	6. Maconí 7. Santo Entierro 8. San Juan Nepomuceno 9. Calabacillas	Ag, Pb, Zn, Cu, Au, Hg
III.- Bernal	10. San Martín. 11. San Antonio	Au, Ag
IV.- Querétaro	12. San Pedrito	Au, Ag

Fuente: Panorama minero del estado de Querétaro del Servicio geológico mexicano.

La región minera de san Joaquín Querétaro (figura 14) es caracterizada por zonas mineras que han sido abandonadas, las cuales han permitido la exploración y obtención de diversos minerales.

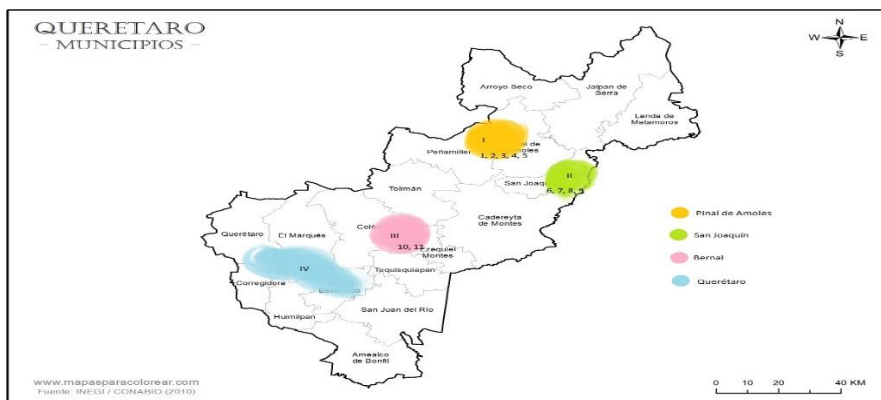


Figura 14. Regiones mineras en Querétaro. Fuente: Panorama minero del estado de Querétaro del Servicio geológico mexicano.

14.6 Jales mineros

En el municipio de San Joaquín en el estado de Querétaro se localizan distritos mineros, que durante ciertos periodos se dedicaron a la obtención de mercurio que repercutieron en el uso y control de la sustancia dentro de nuestro país, alrededor de los años 60s en el municipio quedo abandonada esta actividad.

La definición de jale de acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003 son residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.

El distrito minero de san Joaquín, Querétaro se caracteriza por ser una zona importante de producción de mercurio durante distintas épocas; se tienen indicios de minería durante el periodo prehispánico evidenciada por socavones, el mineral de mercurio que se explotaba como cinabrio (HgS), se utilizaba como pigmento y como ofrenda en algunos rituales. (Cuapio, et al, 2004).

En la sierra gorda la presencia del cinabrio y azogue (Hg metálico) provoco que los habitantes desarrollaran técnicas para su extracción.

En el distrito minero de San Joaquín aún existen cantidades muy elevadas de mercurio fuera de toda norma, tanto en los habitantes de la región como en el ambiente; por ejemplo, los huesos de la población prehispánica, se han encontrado hasta 17.6 ppm de mercurio, en los suelos agrícolas 314.6 ppm, en los terrenos de mina 4164.4 ppm y en el aire 414.8 ng m⁻³ (Hernández-Silva et al.; 2009).

De acuerdo con la agencia informativa CONACYT, realizo un estudio respecto a la dispersión de mercurio (Hg) en las zonas terrestres del municipio de San Joaquín en el estado de Querétaro. Además, que las principales fuentes de emisión del Hg son los jales mineros que se encuentran a cielo abierto, debido a los flujos de masa de aire, influyen de manera significativa en el transporte, existencia y persistencia del mercurio en el ambiente.

14.7 Tipo de suelo.

De acuerdo a las condiciones climáticas de la zona, por lo que hay gran variedad de condiciones para las actividades que se realizan en el suelo del municipio de San Joaquín, EL INEGI en 1997 diseño una cartografía de suelos, para clasificar y ubicar los distintos tipos de suelos de la región (Fig. 15), a continuación, se mencionan los principales tipos de suelos en San Joaquín Querétaro:

- a) Luvisol.
- b) Litosol.
- c) Redzina.
- d) Regosol.
- e) Cambisol
- f) Acrisol.
- g) Vertisol.
- h) Fluvisol.

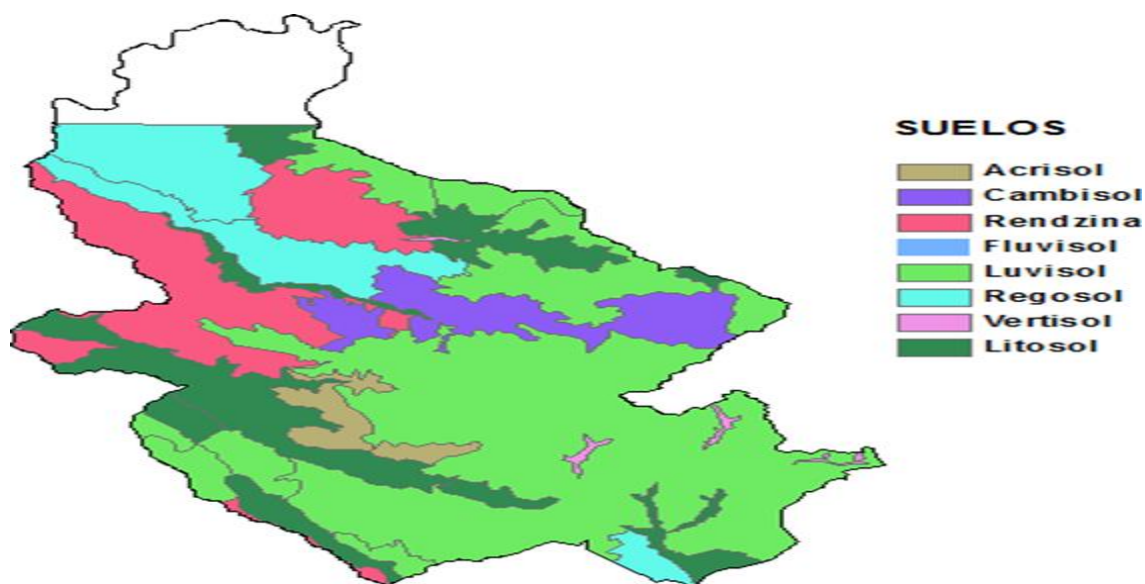


Figura 15. Distribución de los suelos en la región de San Joaquín Querétaro.
Fuente: INEGI.

14.8 Flora

Los bosques ocupan alrededor de un 60% de la superficie dentro del municipio, la vegetación característica es: Pino, encino, cedro rojo, cedro blanco, escobillos, robles y madroños, entre otros.

La zona boscosa más importante del municipio en campo alegre, la cual se nombró parque nacional.

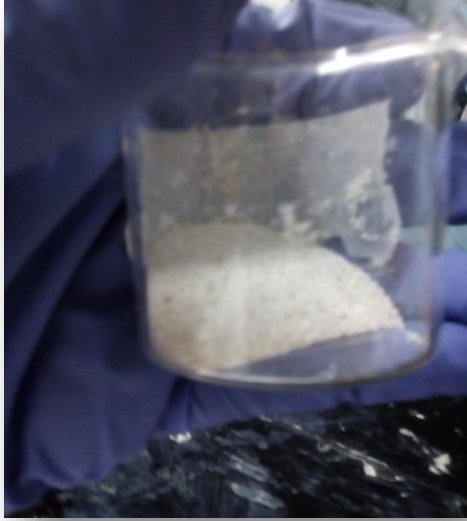
14.9 Fauna.

Dentro del municipio se pueden encontrar pequeñas especies como: coyotes, zorros, tejones, tlacuaches, ardillas, el puerco espín, palomas, codorniz, gavilanes, cuervos, zopilotes y conejos.

15 Caracterización de la muestra de suelo problema.

Se recibió una muestra de suelo (figuras 16 a y b), procedente del jale minero del municipio San Joaquín Querétaro, la muestra contiene metilmercurio, es un compuesto que es muy común, se forma a partir de microorganismos y procesos naturales, puede acumularse y depositarse en el suelo. En promedio la concentración de mercurio es de $2.4 - 4164 \text{ mg kg}^{-1}$. Se realizó la caracterización física de la muestra como la realización de las pruebas fisicoquímicas de la muestra.

- a. Color de la muestra: la muestra presenta un color amarillo claro.
- b. Textura: se presenta un suelo arenoso con tamaño aproximado de partículas entre (0.05 – 0.2 mm).
- c. Para la medición del pH de la muestra de suelo se realizaron 3 corridas dando como resultado un promedio de éstas, así como la preparación de 3 alícuotas para la determinación de materia orgánica.



Figuras 16 (a) y (b). Fotos de las Características Físicas de la muestra problema.

Tabla 7 Características de la muestra problema

Característica del suelo	Resultado	
pH	Medición 1	1.5
	Medición 2	1.4
	Medición 3	1.5
	Promedio	1.46
Densidad real	3.68 g/cm ³	
Porcentaje de humedad	11.45%	
Conductividad	9.42 dS/m	
Cantidad de materia orgánica	% materia orgánica: 4.535%	

16 Sistema CONTEX

El sistema CONTEX puede tratar suelos contaminados, se tomó la decisión de realizar una extracción con solvente, este sistema se desarrolló en la compañía Phonix Miljo, ya que al utilizar un solvente, es conveniente en la reducción de la cantidad de la materia orgánica dentro de la muestra de suelo, y así detener la movilidad de los contaminantes en el medio, así como la modificación de los

parámetros fisicoquímicos y compararlos con la **NOM-021-RECNAT-2000**. Durante tres años se hicieron investigaciones dando origen al proceso de extracción continuo, el sistema CONTEX, este sistema está diseñado como planta semimóvil para la eliminación de materia orgánica y también algunas formas de metales pesados. La extracción se lleva a cabo en un circuito cerrado, en este se incluye la completa regeneración del líquido extractor.

En general, la capacidad del sistema es mayor cuando se tratan suelos secos y arenosos, con componentes volátiles; y aumenta cuando se presentan suelos mojados, pesados y con contaminantes no volátiles, porque es una buena opción para el tratamiento de la muestra de suelo problema de acuerdo a estas características.

En general, la capacidad del sistema es mayor cuando se tratan suelos secos y arenosos, Ya que las muestras problema presentan esta característica con componentes volátiles.

Algunas pruebas han demostrado el éxito del sistema para distintos tipos de suelo. Los fragmentos de suelo mayores a 10 cm se tratan en un contenedor separado, en un sistema no continuo, con el mismo principio de extracción.

En la tabla 8 se muestra los resultados que se han obtenido al aplicar el tratamiento a varios suelos contaminados. Se indican los contenidos máximos de contaminantes antes y después de la descontaminación para algunos compuestos.

Tabla 8 Valores máximos para algunos contaminantes presentes en suelos contaminados, antes y después del tratamiento.

	ANTES ppm	DESPUES ppm
Brea	27 000	<30
Gasolina	15 000	<10
Diesel	22 000	<10
Aceites	30 000	<3
Solventes Clorados	3 600	<1
Compuestos BTX	5 000	<1.5
Naftaleno	5 300	<1.5
Fenantreno	23 000	<1

Fuente: tecnologías de tratamiento para la descontaminación de suelos de CENAPRED.

- El suelo contaminado entra el proceso con un tamizado de (tamaño de 5 a 8 cm) y se transporta por bandas a lo alto de una unidad de extracción.
- En la unidad de extracción incorpora el solvente de extracción en este caso es el diclorometano, este solvente se transporta a las partículas del suelo, disolviendo y separando los contaminantes en un proceso de extracción común. El proceso de extracción puede ser adaptada para cada caso específico, de manera que el contaminante se remueva totalmente, esto se logra por ajustes en la relación de alimentación de suelo y de solventes.
- El líquido de extracción se drena por gravitación separándolo del suelo lavado.
- Terminando la operación se elimina completamente el líquido de extracción del suelo por calentamiento con una corriente de vapor inyectada a través del suelo, a una temperatura aproximada de 212°F/100°C. El vapor se genera en una unidad vaporizadora independiente.
- El líquido de extracción contaminado entra a una unidad de destilación, donde se separa del resto de la corriente.
- Se condensa y almacena para poderse reutilizar. Los contaminantes se separan en la destilación en forma de emulsión, la cual se dispone para tratarse en plantas autorizadas para su recuperación o estabilización.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de proceso del sistema CONTEX

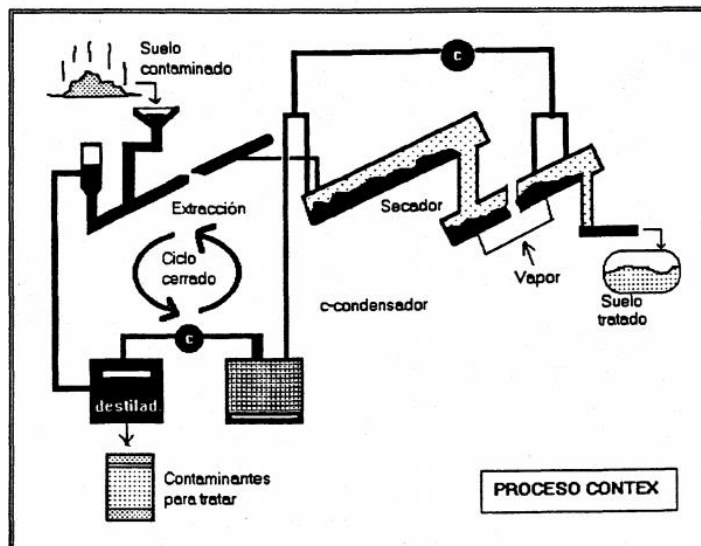


Figura 17: Diagrama de Proceso para el Sistema CONTEX para descontaminación de suelo por extracción con solventes. Phonix Miljo, Steen Vedby/Allan Skov, Junio 1991.

Fuente: tecnologías de tratamiento para la descontaminación de suelos de CENAPRED.

16.1 Diclorometano

Para realizar esta extracción se utilizó el disolvente polar diclorometano, tiene un punto de ebullición de 20°C y una densidad de 1.336 g/ml. Este compuesto es efectivo para la mayoría de los contaminantes orgánicos como aceites, hidrocarburos, breas, fenoles, plaguicidas, bifenilos policlorados (PCBs), etc.

Su fórmula es CH_2Cl_2

El precio de este solvente es de \$ 50.85 dólares el litro

Solubilidad es de 20 g/l

Presión de vapor es de 0.47 atm (20 °C).

Punto de fusión: -95°C

Punto de ebullición: 40°C a 1.013 atm

pH: neutro.



SALUD	2
INFLAMABILIDAD	1
REACTIVIDAD	0
PROTECCIÓN PERSONAL	

Seguridad: Causa Irritación cutáneas, Irritación ocular, se sospecha que causa cáncer, alteraciones en el Sistema nervioso central.

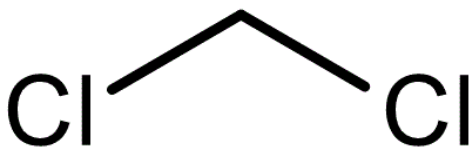


Figura 18. Estructura del Diclorometano. Fuente:
http://www.merckmillipore.com/MX/es/product/Dichloromethane,MDA_CHEM-106454#overview

16.2 Adaptación del sistema CONTEX

Para este trabajo se realizó una adaptación este sistema para adecuarlo con los materiales que se pueden conseguir en el laboratorio de ingeniería química de la facultad y el diclorometano es un solvente que se consiguió para desarrollar este método de extracción de contaminantes de los suelos contaminados y se realizaron las pruebas a la muestra problema.

-La extracción de realizar por gravedad, los embudos se colocan a manera que se coloque el papel filtro (Fig. 19 a).

- Colocar una cama de la muestra alrededor de 2 cm (Fig. 19 a).

- En la unidad de extracción se incorpora el solvente de extracción (diclorometano) al suelo contaminado, el cual fluye a través de éste, disolviendo y separando los contaminantes en un proceso de extracción común (Fig. 19 b).

-El proceso de extracción se adapta para cada caso específico, de manera que el contaminante se remueva totalmente, esto se logra por ajustes en la relación de alimentación de suelo y de solvente, para este caso a escala pequeña se utilizó un

volumen de 10 ml a manera que se mojara toda la cama de suelo contaminado que se preparó y se enjuago con 20 ml de agua destilada.

- Se recupera el solvente para su remediación secundaria.

Para el secado de la muestra se deja reposar en un tiempo de 72 horas (3 días), para que se retire la mayor cantidad de humedad posible del suelo y se realizan las



Figuras 19 (a) colocación de la muestra en el embudo y Figura 19 (b) unidad de extracción y lavado de muestra problema.

pruebas fisicoquímicas y realizar una comparación con las pruebas realizadas antes de la remediación.

17 Resultados después de realizar el tratamiento

Los siguientes datos con los resultados obtenidos después de la remediación, así como la memoria de cálculo para los reactivos que se utilizaron para la remediación, las fórmulas que proponen las normas para realizar la conversión de datos y sus respectivas unidades y una comparación de los datos para posteriormente continuar con las conclusiones del proyecto.

Tabla 9 Resultados después de la remediación

Característica del suelo	Resultado	
pH	Medición 1	6.2
	Medición 2	6.5
	Medición 3	6.5
	Promedio	6.4
Densidad real	20.4273 g/cm ³	
Porcentaje de humedad	0.61%	
Conductividad	9.95 dS/m	
Cantidad de materia orgánica	1.41%	

18 Comparación de la muestra problema antes y después de la remediación.

Tabla 10 Características Antes y después de la remediación

Característica	Antes de la remediación	Después de la remediación	NOM-021-RECNAT-2000
pH	1.46	6.4	Fuertemente ácido: <5.0 Moderadamente ácido: 5.1 - 6.1 Neutro: 6.6- 7.3 Medianamente alcalino: 7.4- 8.5 Fuertemente alcalino: >8.5
Densidad real	3.68 g/cm ³	2.35 g/cm ³	Tipos de suelos: Orgánicos o volcánicos: <1.0 g/cm ³ Arcillosos: 1.0 – 1.19 g/cm ³ Francosos: 1.20 – 1.32 g/cm ³ Arenosos: >1.32 g/cm ³
Porcentaje de humedad	11.25%	0.61%	Medición de la cantidad de agua en la muestra de suelo.
Conductividad	9.78 dS/m	9.95 dS/m	Conductividad en dS/m a 25°C Efectos despreciables de la salinidad: <1.0 Muy ligeramente salino: 1.1 -2.0 Moderadamente salino: 2.1 – 4.0 Suelo salino: 4.1 – 8.0 Fuertemente salino: 8.1 -16.0 Muy fuertemente salino: >16.0
Cantidad de materia orgánica	4.535%	1.41 %	Suelos no volcánicos: % Contenido orgánico: Muy bajo:<0.5 Bajo:0.6 – 1.5 Medio: 1.6 – 3.5 Alto:3.6 – 6.0 Muy alto:>6.0



Figuras 20 (a) muestra problema antes de la remediación, Figura 20 (b) muestra problema después de la remediación.

Al valorar las muestras de suelo antes y después de la remediación se observaron las siguientes características de la muestra problema:

- a. Color de la muestra: la muestra antes de la remediación presentaba un color amarillo muy claro, después de la remediación se presentó un color pardo oscuro.
- b. Textura: Se presenta el mismo tamaño aproximado de partículas antes y después de la remediación, el tamaño es entre (0.05 – 0.2 mm).
- c. Homogeneidad: la muestra presenta una característica homogénea, antes y después de la remediación.

19 Conclusiones

Se realizaron pruebas fisicoquímicas con base en la normatividad vigente para la caracterización de una muestra de suelo, así como la búsqueda bibliográfica de los tipos de suelos que se localizan en la región de san Joaquín Querétaro, y comparar algunas características físicas del suelo, como se refiere en la NOM-021-RECNAT-2000, además de adaptar algunas técnicas de remediación de suelo tomando en cuenta el material con el que cuenta el laboratorio de ingeniería química.

De acuerdo a la caracterización que se realizó, la muestra presenta un carácter moderadamente ácido, este valor de pH se encuentra dentro del rango (5.1 – 6.5) de acuerdo a la NOM-021 RECNAT-2000. El pH del suelo influye en el desarrollo de las plantas y viceversa, la

acidez también, en parte, el resultado de los lixiviados y descomposición de los restos vegetales, así como de la actividad biológica del suelo. Por ejemplo, influyendo también la descomposición del humus, así como la respiración de los organismos del suelo.

La densidad real nos indica la densidad media de las partículas del suelo, es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. El cálculo de la densidad real es útil para realizar cálculos para el transporte del material contaminante, en el presente trabajo se obtuvo una densidad antes de la remediación de 3.68 g/cm^3 de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 esta muestra de suelo se clasifica como un suelo arenoso, el resultado también indica que tenía humedad, después de realizar la remediación de la muestra se obtuvo un valor de 2.35 g/cm^3 lo cual nos indica que la remediación fue eficiente con la reducción de humedad y parte del material orgánico presente en la muestra.

La humedad del sitio a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo. Por lo que nos ayudaría a que los compuestos orgánicos se volatilicen. En el caso de estudio la muestra arrojó un resultado de 11.25% de

humedad antes de realizar la remediación, después de realizar la remediación del sitio contaminado, el resultado es 0.61%, ya que al utilizar un solvente en la remediación este es volátil, por lo tanto, al utilizarlo en la remediación el % de humedad bajo significativamente lo que nos muestra que la remediación disminuyó esta característica de la muestra problema.

La conductividad en la muestra de suelo problema antes de la remediación, se midió 9.78 dS/m, de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 lo cual indica que el suelo se clasifica como un suelo fuertemente salino, pues el rango va de 8.1 a los 16.0 dS/m, el mercurio puede encontrarse como sales o como complejos, además de encontrarse en los componentes del suelo, después de la remediación de la muestra contaminada no cambio demasiado la conductividad del suelo ya que es una característica de la muestra problema y esto ayuda a la hora de la elección de la remediación a aplicar en la muestra, así a la hora de seleccionar la extracción por solvente para la remediación, el metilmercurio se solubiliza en el disolvente de extracción (diclorometano) por su polaridad.

El contenido de materia orgánica inicial de la muestra problema es de 4.5%, de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, ya que el rango va de 3.6 a 6.0 % para suelos no volcánicos, es un contenido alto de materia orgánica, el material orgánico de los suelos está constituido por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico, favorece a la retención de los compuestos orgánicos como el metilmercurio y así la eficiencia de ciertas tecnologías, en este caso la remediación es efectiva, después de realizar la remediación nos dio como resultado 1.41% de contenido orgánico, de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 nos indica que es un suelo con bajo contenido orgánico.

De acuerdo a la bibliografía el metilmercurio en la región de San Joaquín Querétaro, es generado por los jales mineros a la intemperie, debido a las actividades mineras que se realizaron y los lixiviados mal manejados han aumentado las concentraciones del mercurio en suelo, agua y aire, arrojando valores fuera de las respectivas normas.

Al realizar una remediación a la muestra de suelo con el sistema CONTEX debido a su costo beneficio, ya que el diclorometano no es muy caro, además de su facilidad para adaptarlo con el material que contaba el laboratorio de ingeniería química. Sin embargo, al utilizar una remediación por el sistema CONTEX, al alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo este ya no puede ser reintegrado a su área natural.

20 Usos del suelo después del tratamiento y manejo de residuos

Generalmente, después del lavado de suelos se emplean técnicas de separación (sedimentación, filtración, centrifugación) con el propósito de separar las partículas más finas, en donde se adsorben los contaminantes del volumen original. Las partículas gruesas (limpias) se regresan al sitio, mientras que a las finas (contaminadas) se les realiza un nuevo tratamiento o se disponen adecuadamente en un sitio de confinamiento. Debido a que la mayor parte de las partículas depositadas en el sitio después del tratamiento son gruesas, éstas sólo tienen utilidad como soporte de infraestructuras, después de una adecuada compactación en el sitio y no para fines agrícolas (Van Deuren et al. 2002, US EPA 2001).

Ya que el solvente es el diclorometano y de acuerdo a la información bibliográfica recopilada de los contaminantes encontrados en el sitio de origen de la muestra problema nos pueden generar compuestos más tóxicos en los residuos de la remediación.

De acuerdo al manual del Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED el líquido de extracción contaminado entra a una unidad de destilación, donde se separa del resto de la corriente. Se condensa y almacena para poderse reutilizar.

Además de que los contaminantes se separan en la destilación en forma de emulsión, la cual se dispone para tratarse en plantas autorizadas para su recuperación o estabilización.

21 Recomendaciones

- a) Para mejorar la caracterización de un suelo y su remediación se recomienda estudiar las siguientes características:
- Concentración en el volumen de la muestra.
 - Estructura del contaminante, así como posibles especies que se encuentren en el medio.
 - Solubilidad.
 - Coeficiente octanol/agua.
 - Polaridad.
 - Carga iónica.
 - Difusión.
 - Sorción.
 - Volatilización.
 - Reacciones oxido- reducción.
 - Su distribución a través del sitio.
 - Biodegradabilidad.
 - Medio que se encuentra (suelo o agua o aire).
- b) Al realizar la remediación determinar la concentración del contaminante que se solubilizo en el solvente del diclorometano y cuanto se volatilizo.
- c) Determinar la concentración que persistió en la muestra de suelo problema.
- d) Realizar la caracterización de la relación de las propiedades fisicoquímicas del mercurio y sus especies con su concentración y persistencia en los suelos contaminados.

Bibliografía

- Alexander, M. 1994. Biodegradation and Bioremediation. Academic Press, San Diego. 302 pp.
- Convenio de Minamatta, SEMARNAT.2019. <https://www.gob.mx/inecc/es/prensa/el-convenio-de-minamata-entrara-en-vigor-en-agosto-de-2017-108220>
- Cortinas, C. y C. Mosler (eds.). Gestión de residuos peligrosos. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Dirección General de Inspección y Vigilancia Ambiental. 2019. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/secretaria/estructura/171>
- Fernández Linares Juan Carlos y colaboradores, Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados,2006, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, 186 pp.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) 2019. <https://www.gob.mx/inecc>.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal .2019. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM22queretaro/municipios/2015a.html>.
- Kreiner, I. 2002. Tecnologías para el tratamiento de residuos peligrosos.
- Langenscheidt, A.2006. La minería en la Sierra Gorda de Queretaro. Arqueología Mexicana 77 pp.
- LGEEPA. (1998). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México.
- LGPGIR. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México. Martínez, J., Mallo, M., Lucas,
- María Esther Arcos Serrano, Georgina Fernández Villagómez, Carlos Manuel Ibarrarán Díaz, Cecilia Izcapa Treviño, 1994, TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO PARA LA DESCONTAMINACION DE SUELOS, CENAPRED, 62 pp.
- Martínez-Trinidad, Sergio, Hernández Silva, Gilberto, Ramírez Islas, Martha Elena, Martínez Reyes, Juventino, Solorio Munguía, Gregorio, Solís Valdez, Sara, & García Martínez, Rocío. (2013). Total mercury in terrestrial systems (air-soil-plant-water) at the mining region of San Joaquín, Queretaro.
- Martínez S. (2013). Comportamiento del mercurio total en los sistemas terrestres del distrito minero de San Joaquín Querétaro. Aplicación de los modelos geoestadísticos y de regresión con árboles de decisión. (Tesis de Posgrado). Universidad Nacional autónoma de México. México. 114 pp.
- Merk. Diclorometano. 2019. http://www.merckmillipore.com/MX/es/product/Dichloromethane,MDA_CHEM-106454.
- Mosler, C. 2002. Situación actual de los residuos peligrosos.
- NOM-021-RECNAT. 2000. Establece las especificaciones de fertilidad,

salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.

- NOM-147-SEMARNAT/SSA1. 2004. Proyecto de Norma Oficial Mexicana. Establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.
- NOM-157-SEMARNAT-2009. 2009. Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.
- Panorama minero del estado de Querétaro. Servicio geológico mexicano (SGM), 2017.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) 2019. Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, México. <http://www.profepa.gob.mx/>
- Programa Nacional de Remediación de sitios contaminados. SEMARNAT. DGGIMAR. (20017-2018).
- Riser-Roberts, E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. Lewis Publishers. 542 pp.
- Sellers, K. 1999. Fundamentals of hazardous waste site remediation. Lewis Publishers. 326 pp.
- Semple, K.T., B.J. Reid y T.R. Fermor 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. Environ.Pollution 112: 269-283.
- VEDBY Steen y Skov Allan, Pnonix Miljo, "Mobile Extraction Technology for onsite soil decontamination", Vejen Denmark., Junio 1991.
- Volke Sepúlveda, Tania y Velasco Juan Antonio, Tecnologías de remediación para suelos contaminados, México: INE-SEMARNAT, 2002, 64 pp

Anexo A

Metodología

De acuerdo a la bibliografía hay algunos de los datos del suelo, que pueden obtenerse con relativa facilidad y que controlan la eficiencia de una tecnología de remediación, en el caso de este trabajo se obtuvieron siguiendo los protocolos de la NMX-021-RECNAT-2000 para la caracterización de los suelos contaminados, tomando en cuenta el material con el que se contaba el laboratorio de ingeniería química, los resultados obtenidos de la muestra problema antes y el después de la remediación, para compararlas y determinar la efectividad del tratamiento y la obtención de las conclusiones.

Se tomó una decisión para poder realizar una remediación eficiente con la muestra de acuerdo a la información reunida, el lavado de suelos por medio de una extracción con solvente para la remediación de la muestra de suelo, se investigo acerca de la tecnología, el sistema CONTEX es un sistema adecuado para llevar a cabo la remediación de la muestra problema.

Medición de pH

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

Reactivos:

Agua destilada o desionizada.

Soluciones reguladoras de referencia, pH 4.00, 7.00 y 10.00, las cuales se adquieren preparadas o concentradas para diluirse de acuerdo a la instrucción.

Estas soluciones deben estar a temperatura ambiente al momento de calibrar el medidor de pH.

Material:

- Potenciómetro o medidor de pH equipado con electrodo de vidrio en combinación con electrodo de referencia.
- Balanza con 0.1 g de sensibilidad.
- Frascos de vidrio o plástico transparente de boca ancha con capacidad de 50 a 100 ml.
- Pipeta volumétrica de 20 ml.
- Varilla de vidrio que sirva como agitador manual.
- Piceta.
- Cinta magnética.

Procedimiento:

- 1) Pesar 10 g de suelo en un frasco de vidrio o plástico de boca ancha.
- 2) Adicionar 20 ml. de agua destilada al frasco conteniendo el suelo.
- 3) Con una varilla de vidrio, agitar manualmente la mezcla de suelo: agua a intervalos de 5 minutos, durante 30 minutos.
- 4) Dejar reposar durante 15 minutos.
- 5) Calibrar el medidor de pH con las soluciones reguladores pH 4.00 y 7.00 o 7.00 y 10.00 según el suelo, enjuagando con agua destilada los electrodos antes de iniciar las lecturas de las muestras.
- 6) Agite nuevamente la suspensión e introduzca el electrodo en la suspensión.
- 7) Registre el pH al momento en que la lectura se haya estabilizado.



Figuras 21 (a) y (b) Foto de la metodología empleada para la medición del PH de la muestra de suelo problema.

Medición de humedad.

Se utilizó como referencia el método utilizado en la NOM-021, ya que en el laboratorio de ingeniería química se contaba con la termo balanza para la medición de humedad en la muestra.

Material:

- Termo balanza con charolas de aluminio.
- Espátula.
- Vidrio de reloj.

Procedimiento:

- 1) Pesar 1 g de muestra problema en la charola de aluminio a peso constante.
- 2) Cerrar la tapa de la termo balanza.
- 3) Presionar el botón de encendido.
- 4) Esperar alrededor de 5 minutos hasta que el equipo termine de realizar la medición y muestre el resultado.

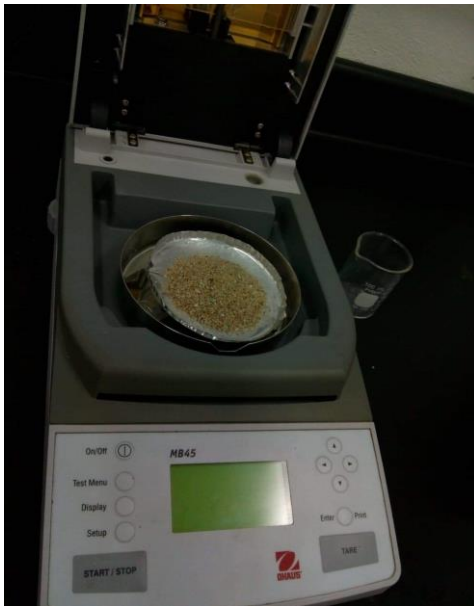


Figura 22 (a) y (b) Fotos de la Medición en la termobalanza.

Determinación de densidad real

Método utilizado en la NOM-021-RECNAT-2000

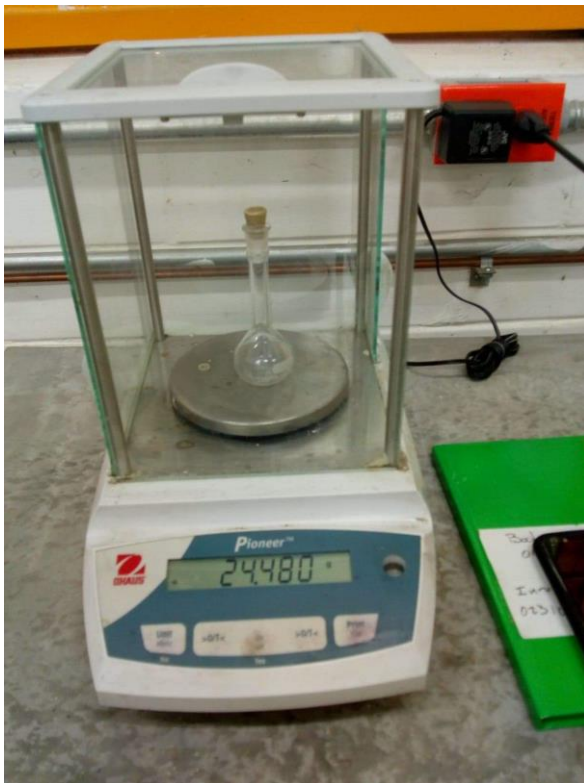
Material:

- ✓ Picnómetros o matraces aforados de 25ml.
- ✓ Desecador de vacío.
- ✓ Bomba de vacío.
- ✓ Balanza analítica.
- ✓ Suelo seco.
- ✓ Agua destilada y hervida(fría).
- ✓ Embudo de plástico.
- ✓ Termómetros.

Procedimiento:

- 1) Pesar un matraz o picnómetro limpio y perfectamente seco.
- 2) Colocar en el interior del picnómetro 5 g de suelo usando un embudo de plástico.
- 3) Anotar el peso del matraz con suelo, manteniendo el matraz completamente limpio (evitar humedad y/o grasa en las manos).
- 4) Adicionar agua destilada hervida recientemente y fría hasta la mitad del volumen de matraz; girar éste entre los dedos con mucha suavidad y colocarlo en el desecador de vacío.
- 5) Hacer vacío durante 15 minutos para eliminar todo el aire retenido en el suelo. La succión de la bomba deberá aumentarse paulatinamente para evitar pérdidas de material por formación de espuma.
- 6) Dejar reposar dentro del desecador por 30 minutos aproximadamente y eliminar el vacío del desecador paulatinamente, sacar el matraz y llenar hasta aforo con agua destilada hervida y fría, secar perfectamente el exterior y pesar en la balanza analítica.
- 7) Tomar la temperatura de la suspensión.

- 8) Vaciar el matraz, enjuagarlo perfectamente y llenarlo hasta aforo con agua destilada, hervida y fría.
- 9) Pesar el matraz con agua y tomar la temperatura, anotarla



Figuras 23 (a) y (b) medición de la masa de suelo para el cálculo de la densidad real.

Medición de conductividad eléctrica

La medición de conductividad eléctrica se realiza por medio de un conductímetro sobre una muestra de agua o extracto de suelo.

Reactivos:

- ✓ Agua destilada o des ionizada
- ✓ Disoluciones de 100 ml cada una, para calibrar conductímetro de cloruro de potasio (KCl) 0.1N y 0.01 N

Material:

- Muestra de suelo seco y molido en un mortero
- Balanza analítica
- Vasos de precipitado de 250 ml y 100ml
- Bureta
- Espátula
- Papel filtro
- Embudo buchner
- Pipeta de 10 ml
- Matraz kitazato
- Bomba de vacío
- Probeta
- Conductímetro

Procedimiento:

A. Preparación de la pasta de saturación.

- 1) Pesar 40 g de suelo seco y colocarlo en un recipiente de plástico, si el suelo es arenoso o areno-migajoso pesar 600 g.
- 2) Agregar agua destilada con la bureta y mezclar con la espátula hasta saturación.
- 3) Golpear el recipiente con cuidado sobre la mesa de trabajo para asentar el suelo.

4) La pasta estará lista cuando se observe un brillo en su superficie (formación de un espejo), esto no sucede en el caso de suelos con alto contenido de arcilla.

5) Anotar el volumen de agua gastado (ml).

6) Dejar reposar la pasta durante una hora y comprobar a criterio su saturación.

7) Tapar el recipiente y dejarlo reposar por tres horas, excepto suelos arcillosos que deben dejarse reposar 24 horas.

B. Obtención del extracto del suelo.

1) Colocar papel filtro sobre el embudo, humedecerlo con agua destilada, dejando drenar el exceso con la bomba de vacío.

2) Mezclar nuevamente la pasta y colocarla en el embudo y aplicar vacío.

3) Obtener un extracto de aproximadamente 50 ml.

C. Determinación de la conductividad eléctrica.

1) Calibrar el conductímetro. Antes de usar el medidor de conductividad debe calibrarse con una solución estándar. Para esto se requiere de dos soluciones de KCl, 0.1 N y 0.01 N, con cada una se ajusta el equipo a la conductividad indicada en la tabla 9.

Tabla 11 Datos de Conductividad

Solución estándar de KCl	Conductividad eléctrica a 25 °C
0.1 N	12.9 dS/m
0.001 N	1.412 dS / m

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.

Cuando no se sabe la conductividad de la muestra se recomienda calibrar primero con una de las dos soluciones y tomar la lectura de la muestra, después volver a calibrar con la segunda solución y tomar nuevamente la lectura. Para calibrar finalmente el equipo, se debe elegir la solución con la que se aproxime más la conductividad de la muestra.

2) Leer la conductividad eléctrica.

3) Si es necesario, hacer corrección consultando la tabla de factores de corrección para diferentes temperaturas (Tabla 12), se multiplica el resultado de conductividad eléctrica por el valor correspondiente.

Tabla 12 Temperaturas y el factor de corrección			
Temperatura (°C)	Factor de corrección	Temperatura (°C)	Factor de corrección
8	1.499	22	1.067
10	1.421	23	1.044
12	1.350	24	1.021
14	1.284	25	1.000
16	1.224	26	0.979
18	1.168	28	0.941
19	1.142	30	0.906
20	1.128	32	0.873
21	1.092	34	0.843

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000.



Figura 24. Medición de la conductividad de la muestra problema

Medición de materia orgánica

Método de la NOM-021-RECNAT-2000.

Reactivos:

- ✓ Dicromato de potasio 0.166 M o 1N.- Disolver 48.82 g de $K_2Cr_2O_7$ en agua destilada aforar a 1000 ml en un matraz volumétrico.
- ✓ Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4).
- ✓ Ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4).
- ✓ Indicador de difenilamina. Disolver 0.5 g de difenilamina en 20 ml de agua y añadir 100 ml de ácido sulfúrico concentrado.
- ✓ Sulfato ferroso 1.0 M (aproximadamente). Disolver 278 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ en agua a la que previamente se le añadieron 80 ml de H_2SO_4 concentrado, enfriar y diluir a un litro. Esta solución debe ser valorada con $K_2Cr_2O_7$ 1 N antes de realizar la determinación.

Material:

- Matraces Erlenmeyer de 500 ml.
- Bureta para $K_2Cr_2O_7$ (50 ml).
- Bureta para $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (50 ml).
- Pipeta volumétrica (10 ml).

Probeta de vidrio (25 ml).

Procedimiento:

- 1) Pesar 0.5 g de suelo seco y pasado por un tamiz de 0.5 mm y colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 500 ml. Procesar un blanco con reactivos por triplicado.
- 2) Adicionar exactamente 10 ml de dicromato de potasio 1 N girando el matraz cuidadosamente para que entre en contacto con todo el suelo.
- 3) Agregar cuidadosamente con una bureta 20 ml de H_2SO_4 concentrado a la suspensión, girar nuevamente el matraz y agitar de esa forma durante un minuto.

- 4) Dejar reposar durante 30 minutos sobre una lámina de asbesto o sobre una mesa de madera, evitando las mesas de acero o cemento.
- 5) Añadir 200 ml de agua destilada.
- 6) Añadir 5 ml de H_3PO_4 concentrado.
- 7) Adicionar de 5 a 10 gotas del indicador de difenilamina.
- 8) Titular con la disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta un punto final verde claro.

Anexo B

Memoria de cálculo

Densidad real

$$\text{Densidad real } (\rho_s) = \frac{\text{Peso de las partículas del suelo } (ps)}{\text{Volumen de las partículas del suelo } (vs)}$$

Dónde:

$$ps = (\text{peso del matraz con el suelo}) - (\text{peso del matraz})$$

$$vs = \frac{\text{Peso del matraz con agua} - \text{Peso del matraz seco}}{\text{Densidad del agua } (\rho_w)} - \frac{\text{pesos de la suspensión agua y suelo} - \text{peso del matraz con suelo}}{\rho_w}$$

Ejemplo:

Peso de matraz aforado de 25 ml seco: 24.80 g

Peso del matraz con suelo: 29.40g

Peso del matraz con agua a (32 °C): 47.59g

Peso de la suspensión: 50.24g

Densidad del agua a 32°C: 0.99503 g/cm³

$$ps = 29.40 \text{ g} - 24.80 \text{ g} = 4.6 \text{ g}$$

$$vs = \frac{47.59 \text{ gr} - 24.80 \text{ gr}}{0.99503 \text{ g/cm}^3} - \frac{50.24 \text{ g} - 29.40 \text{ g}}{0.99503 \text{ g/cm}^3} = 1.95 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad real } (\rho_s) = \frac{6.98 \text{ g}}{23.38 \text{ cm}^3} = 2.35 \text{ g/cm}^3$$

Conductividad eléctrica

Preparación de disoluciones de 100 ml de KCl 0.1 N y 0.01 N

Peso molecular del potasio K = 39.09 g/mol

Peso molecular del cloro Cl = 35.45 g/mol

de equivalencia del KCl = 1

Peso equivalente del KCl = (39.09 g/mol + 35.45 g/mol)/1 = 74.54 g/eq

$$(100 \text{ ml dis}) \left(\frac{74.54 \text{ g}}{1 \text{ eq}} \right) \left(\frac{0.1 \text{ eq}}{1000 \text{ ml dis}} \right) = 0.7454 \text{ g}$$

Para la disolución de 100 ml a 0.01 N

$$(100 \text{ ml dis}) \left(\frac{74.54 \text{ g}}{1 \text{ eq}} \right) \left(\frac{0.01 \text{ eq}}{1000 \text{ ml dis}} \right) = 0.07454 \text{ g}$$

Conversión de milisiemens/m a decisiemens/m

$$1 \text{ milisiemens} = 0.01 \text{ decisiemens}$$

Ejemplo:

$$\left(995 \frac{\text{mS}}{\text{m}} \right) \left(\frac{0.01 \text{ decisiemens}}{1 \text{ siemens}} \right) = 9.95 \frac{\text{dS}}{\text{m}}$$

Cantidad de materia orgánica

Preparación de disolución 1 Lt de dicromato de potasio 0.166 M $K_2Cr_2O_7$:

Peso molecular del dicromato de potasio: 294.185 g/mol.

$$(1000 \text{ ml de disolución}) \left(\frac{0.166 \text{ moles de } K_2Cr_2O_7}{1000 \text{ ml de disolución}} \right) \left(\frac{294.185 \text{ g de } K_2Cr_2O_7}{1 \text{ mol de } K_2Cr_2O_7} \right) \\ = 48.83 \text{ gr de } K_2Cr_2O_7$$

Preparación de disolución 1 Lt de sulfato ferroso 1 M $FeSO_4$:

Se utilizo sulfato ferroso heptahidratado: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

Peso molecular del sulfato ferroso: 151.908 g /mol.

Peso molecular de 7 moléculas de agua: 126 g/mol.

$$(1000 \text{ ml de disolución}) \left(\frac{1 \text{ moles de } FeSO_4 \cdot 7H_2O}{1000 \text{ ml de disolución}} \right) \left(\frac{207.908 \text{ } FeSO_4 \cdot 7H_2O}{1 \text{ moles de } FeSO_4 \cdot 7H_2O} \right) \\ = 207.907 \text{ g de } FeSO_4 \cdot 7H_2O$$

Cálculos de la prueba:

$$\% \text{ de } C \text{ organico} = \left(\frac{B - T}{g} \right) (N)(0.39) mcf$$

Dónde:

B=volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

T= volumen de sulfato ferroso para valorar la muestra (ml).

N= normalidad del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras.

g= peso de la muestra empleada.

mcf=factor de corrección de humedad

Donde el factor 0.39 resulta de multiplicar: $\left(\frac{12}{4000}\right)\left(\frac{1}{0.77}\right)(100) = 0.39$

Donde 12/4000 es el peso equivalente del C, y 1/77 es un factor debido a la suposición que en el método solo se oxida el 77% del C, y 100 es la conversión del porcentaje.

Ejemplo:

$$\% \text{ de } C \text{ organico} = \left(\frac{5.1 \text{ ml} - 2.95 \text{ ml}}{0.589 \text{ g}}\right) (1)(0.39) \text{ mcf} = 1.42 \% \text{ de } C \text{ organico}$$

ANEXO C

Muestreo

Se recibió una muestra problema de suelo, recolectada de acuerdo con la “**NMX-132-SCFI-2016**” 9 (para la identificación de metales y metaloides y manejo de la muestra) proveniente de un jale minero ubicado en San Joaquín Querétaro.

Se realizó un muestreo exploratorio de acuerdo a la norma tiene como objetivo: Obtener las muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y en su caso, la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical.

Procedimiento: El muestreo exploratorio se realiza en dos fases. En la primera, se toman muestras de suelo superficial y en la segunda, se toman muestras en perfiles de suelo (muestreo vertical).

a) Muestreo superficial:

- ❖ Tipo de muestra: simple, en cada punto de muestreo.
- ❖ Número mínimo de puntos de muestreo: se utilizaron 6 puntos de muestreo de acuerdo a la tabla representada en la norma.
- ❖ Profundidad de muestreo: se utilizó 3 cm a partir de la superficie.
- ❖ Distribución de los puntos de muestreo: Para la distribución de los puntos de muestreo se utilizó un muestreo aleatorio simple ya que el diseño de muestreo más simple y fundamental se basa en la probabilidad. Se usa una tabla de números aleatorios para localizar las muestras. El muestreo aleatorio simple de n muestras se define como muestras seleccionadas al azar de una población de muestras, de manera que otras n muestras de la misma población tienen la misma oportunidad de ser elegidas, ya que este método fue fácil de implementar, donde $n= 6$ muestras simples de acuerdo la tabla de la NMX.

b) Muestreo vertical.

De acuerdo a la NMX-021-RECNAT-2000:

El muestreo vertical se realiza a través de pozos que permitan describir el perfil del suelo y obtener muestras a la profundidad proyectada. En áreas urbanas se llevará a cabo en los casos en que se considere necesario de manera justificada. Para valorar la migración vertical de o mecánico, que obtenga un núcleo que permita ver y muestrear el perfil del suelo. Los requerimientos para el muestreo vertical son: –
Tipo de muestra: simple, para cada intervalo y punto de muestreo.

- ❖ Número mínimo de pozos contaminantes se pueden utilizar excavaciones que permitan el acceso de la persona que toma la muestra, o se pueden utilizar perforaciones para el hincado de un muestreador, manual: 1 en función del área de estudio: 0.15 ha
- ❖ Profundidad de los pozos: está determinada por la profundidad a la que se obtengan valores iguales o menores a las concentraciones de referencia establecidas en las normas oficiales mexicanas aplicables, por la existencia de roca firme o material consolidado o por la aparición de la zona de saturación de agua.
- ❖ Intervalos de muestreo: se deben identificar los diferentes horizontes que forman el suelo en función de su aspecto físico (color, textura, grado de compactación, entre otros). Para horizontes con espesor menor a 30 cm, debe tomarse una muestra en canal vertical abarcando todo el espesor de este.
- ❖ Distribución de los pozos: muestreo aleatorio simple.