



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TECNOLOGÍAS PARA LA REHABILITACIÓN DE UN SITIO  
CONTAMINADO CON 1,2-DICLOROETANO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**ANA LUCERO ISIDRO GUADALUPE**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: José Agustín García Reynoso**

**VOCAL:**                   **Profesor: Gema Luz Andraca Ayala**

**SECRETARIO:**       **Profesor: Luis Antonio García Villanueva**

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor: Sergio Adrián García González**

**2° SUPLENTE:**       **Profesor: Alejandra Mendoza Campos**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Luis Antonio García Villanueva** \_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

**Ana Lucero Isidro Guadalupe** \_\_\_\_\_

**CONTENIDO TEMÁTICO**

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.1    Objetivo general .....	13
1.2    Objetivos particulares .....	13
1.3    Alcances y limitaciones .....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1    Generalidades del suelo.....	14
2.1.1    Definición de suelo .....	14
2.1.2    Perfil del suelo: horizontes .....	15
2.2    Formación del suelo .....	16
2.2.1    Procesos de formación del suelo .....	17
2.2.2    Factores formadores del suelo.....	18
2.3    Propiedades fisicoquímicas del suelo .....	30
2.3.1    Color .....	30
2.3.2    Porosidad .....	31
2.3.3    Densidad .....	32
2.3.4    Textura .....	33
2.3.5    Capacidad de intercambio iónico .....	40
2.3.6    pH del suelo.....	43
2.3.7    Nutrientes del suelo.....	49
2.4    Hidrogeología: Agua subterránea .....	51
2.4.1    Distribución vertical del agua subterránea .....	51
2.4.1    Formaciones geológicas de acuerdo a su capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.....	53
CAPÍTULO 3. LEGISLACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS EN MÉXICO.....	56
3.1    Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	58
3.2    Tratados Internacionales .....	59
3.3    Leyes .....	59
3.4    Reglamentos .....	62

---

3.5	Normas Oficiales Mexicanas (NOM) .....	64
3.6	Normas Mexicanas (NMX) .....	67
CAPÍTULO 4. CONTAMINACIÓN DE SUELOS .....		71
4.1	Suelos contaminados en México.....	71
4.2	Fuentes de contaminación .....	74
CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: SITIO CONTAMINADO CON 1,2-DICLOROETANO.....		78
5.1	Caso de estudio.....	78
5.2	Características del sitio contaminado.....	79
5.2.1	Clima regional.....	79
5.2.2	Estratigrafía del sitio .....	79
5.2.3	Hidrología del sitio .....	80
5.2.4	Distribución del 1,2-DCA en el subsuelo.....	81
5.2.5	Distribución del contaminante en el agua subterránea .....	81
5.3	Características del contaminante .....	81
5.3.1	Propiedades físicas y químicas del 1,2-Dicloroetano .....	81
5.3.2	Efectos sobre la salud .....	83
5.3.3	Contaminación por 1,2-Dicloroetano.....	83
5.4	Comportamiento del contaminante en el sitio .....	84
CAPÍTULO 6. TECNOLOGÍAS PARA LA REHABILITACIÓN PARA DE UN SITIO CONTAMINADO CON 1,2-DICLOROETANO .....		91
6.1	Matriz para la selección de tecnologías de tratamiento publicada por la FRTR.....	91
6.2	Tecnologías de restauración para tratar la contaminación por 1,2-dicloroetano en el suelo.....	96
6.1.1	Bioventeo.....	100
6.1.2	Biorremediación mejorada .....	101
6.1.3	Biopilas .....	103
6.1.4	Enjuague de suelos .....	106
6.1.5	Extracción de vapores del suelo .....	109
6.1.6	Desorción térmica.....	111

---

6.3	Tecnologías de rehabilitación para tratar la contaminación por 1,2-dicloroetano en agua subterránea .....	114
6.2.1	Separación por aire (Air Stripping) .....	114
6.2.2	Riego por aspersión .....	116
6.2.3	Biorreactores .....	118
6.2.4	Barreras físicas.....	121
6.2.5	Barreras reactivas permeables (BPR).....	124
CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN .....		128
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....		133
ANEXOS.....		135
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		139

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. (a) Representación gráfica de horizontes en el suelo. (b) Horizontes del suelo en la naturaleza.</i>	16
<i>Figura 2.2. Procesos formadores del suelo.</i>	17
<i>Figura 2.3. Actividad de los microorganismos en función de la temperatura del suelo.</i>	25
<i>Figura 2.4. Formación del suelo a través del tiempo.</i>	29
<i>Figura 2.5. Triángulo textural.</i>	39
<i>Figura 2.6. Intercambio iónico en el suelo.</i>	40
<i>Figura 2.7. Disponibilidad de elementos químicos en el suelo en función del pH.</i>	47
<i>Figura 2.8. (a) Zonas del subsuelo acorde a la distribución del agua subterránea. (b) Detalle de la zona no saturada del subsuelo.</i>	52
<i>Figura 2.9. Acuíferos presentes en la naturaleza.</i>	54
<i>Figura 3.1. Jerarquía del Sistema Jurídico Mexicano</i>	58
<i>Figura 4.1. Pasivos ambientales en la República Mexicana.</i>	72
<i>Figura 4.2. Sitios contaminados prioritarios en la República Mexicana.</i>	74
<i>Figura 5.1. Estratigrafía del sitio contaminado.</i>	80
<i>Figura 5.2. Estructura del 1,2-Dicloroetano.</i>	82
<i>Figura 5.3. (a) y (b) Dispersión longitudinal, (c) Dispersión transversal.</i>	85
<i>Figura 5.4. Pluma de contaminación generada por el 1,2-Dicloroetano.</i>	89
<i>Figura 6.1. Bioventeo.</i>	100
<i>Figura 6.2. Biorremediación mejorada.</i>	102
<i>Figura 6.3. Biopilas.</i>	105
<i>Figura 6.4. Enjuague de suelos.</i>	106
<i>Figura 6.5. Extracción de vapores del suelo</i>	109
<i>Figura 6.6. Desorción térmica.</i>	113
<i>Figura 6.7. Separación por aire (Air Stripping).</i>	115
<i>Figura 6.8. Riego por aspersion.</i>	117
<i>Figura 6.9. Biorreactor.</i>	119
<i>Figura 6.10. (a) Barrera de trinchera circunferencial, (b) Barrera por perforación dirigida, (c) Barrera con inserción de paneles, (d) Barrera con geomembrana.</i>	122
<i>Figura 6.11. Barrera permeable reactiva (a) disposición continua (b) disposición embudo-compuerta.</i>	125

**ÍNDICE DE TABLAS**

<i>Tabla 2.1.</i> Procesos formadores del suelo.....	17
<i>Tabla 2.2.</i> Clasificación de las rocas de acuerdo a su origen.....	20
<i>Tabla 2.3.</i> Composición de las rocas .....	20
<i>Tabla 2.4.</i> Principales minerales del suelo.....	21
<i>Tabla 2.5.</i> Tipos de suelo en función del porcentaje de porosidad.....	32
<i>Tabla 2.6.</i> Clasificación de partículas del suelo con diámetro menor a 2.00 mm según la USDA...	34
<i>Tabla 2.7.</i> Clasificación de las arcillas .....	35
<i>Tabla 2.8.</i> Clasificación de las arcillas silicatadas cristalinas acorde a su estructura cristalina .....	36
<i>Tabla 2.9.</i> Características representativas de los principales grupos de las arcillas cristalinas silicatadas.....	37
<i>Tabla 2.10.</i> Capacidad de Intercambio catiónico en los coloides del suelo .....	42
<i>Tabla 2.11.</i> Clasificación del suelo acorde al rango de pH que presenta.....	44
<i>Tabla 2.12.</i> Funciones y fuentes de nutrientes del suelo.....	49
<i>Tabla 2.13.</i> Permeabilidad de las rocas acorde a su conductividad hidráulica .....	54
<i>Tabla 3.1.</i> Organograma de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.....	56
<i>Tabla 4.1.</i> Compuestos orgánicos volátiles halogenados principalmente encontrados en los sitios contaminados. ....	77
<i>Tabla 5.1.</i> Propiedades físicas y químicas del 1,2-Dicloroetano .....	82
<i>Tabla 6.1.</i> Matriz para la selección de tecnologías de rehabilitación (adapatada).....	93
<i>Tabla 6.2.</i> Factores que evalua la FRTR para la selección de tecnologías de rehabilitación .....	94
<i>Tabla 6.3.</i> Tecnologías efectivas para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles .....	95
<i>Tabla 6.4.</i> Tecnologías de restauración más aptas para el tratamiento de COV .....	96
<i>Tabla 6.5.</i> Factores del suelo que influyen en la biorremediación.....	98

## ACRÓNIMOS

**1,2-DCA:** 1,2-Dicloroetano

**ARC:** Agencia de Residuos de Cataluña

**ASTDR:** Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, por sus siglas en inglés

**BPCs:** Bifenilos Policlorados

**BPR:** Barrera Permeable Reactiva

**BTEX:** Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno

**CAM:** Corporación Ambiental de México S. A.

**CAMIMEX:** Cámara Minera de México

**CENAPRED:** Centro Nacional de Prevención de Desastres

**cg/em:** Cromatografía de gases/espectrometría de masas

**CIA:** Capacidad de Intercambio Aniónico

**CIC:** Capacidad de Intercambio Catiónico

**CONAGUA:** Comisión Nacional del Agua

**COSV:** Compuestos Orgánicos Semi-volátiles

**COTEMARNAT:** Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales

**COV:** Compuestos orgánicos volátiles

**DGGIMAR:** Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas

**DHHS:** Departamento de Salud y Servicios Humanos, por sus siglas en inglés

**DNAPL:** Líquido en fase no acuosa más denso que el agua, por sus siglas en inglés

**DOF:** Diario Oficial de la Federación

**EMGRISA:** Empresa para la Gestión de Residuos Industriales S. A.

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés

**FRTR:** Mesa Redonda Federal de Tecnologías para Rehabilitación, por sus siglas en inglés

**hap:** Hidrocarburos aromáticos policíclicos

**INEGI:** Instituto Nacional de Estadística y Geografía

**k:** Conductividad hidráulica

**LAN:** Ley de Aguas Nacionales

**LGEEPA:** Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

**LGPGIR:** Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

**NAPL:** Fase líquida no acuosa

**NAVFAC:** Comando de Ingeniería de Instalaciones Navales, por sus siglas en inglés

**NMX:** Normas Mexicanas

**NOM:** Normas Oficiales Mexicanas

**PEAD:** Polietileno de Alta Densidad

**PECT:** Productos de Extracción de Constituyentes Tóxicos

**PEMEX:** Petróleos Mexicanos

**ppb:** Partes por billón

**ppm:** Partes por millón

**PROFEPA:** Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

**PVC:** Policloruro de vinilo

**RACEFN:** Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

**SCJN:** Suprema Corte de Justicia de la Nación

**SEMARNAT:** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

**SGM:** Sistema Geológico Mexicano

**SISCO:** Sistema Informático de Sitios Contaminados

**SSDS:** Personal de la División de Levantamientos del Suelo, por sus siglas en inglés

**SVE:** Extracción de vapores del suelo, por sus siglas en inglés

**UCLM:** Universidad de Castilla - La Mancha

**UNAD:** Universidad Nacional Abierta y a Distancia de Colombia

**USDA:** Departamento de Agricultura de Estados Unidos, por sus siglas en inglés

**uv-vis:** Ultravioleta visible

## **CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas en concentraciones que superan el poder de amortiguación natural del mismo y que modifican negativamente sus propiedades. Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas exógenas, aunque también se puede producir de forma natural o endógena cuando los procesos de meteorización liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos. (Ortiz, 2009)

Respecto a la contaminación por actividades humanas, entre los principales contaminantes se encuentran los compuestos orgánicos, los cuales por su producción y uso masivo son los más frecuentemente encontrados en el suelo y agua. (Ortiz, 2009)

La producción de compuestos orgánicos sintéticos se incrementó drásticamente desde los inicios del siglo XX, debido al crecimiento de la industria productora de nuevos materiales que han modificado de forma radical la forma de vida de las personas; sin embargo, este aspecto positivo del progreso ha originado también aspectos negativos. El incremento en la producción y uso de compuestos orgánicos sintéticos (plaguicidas, lubricantes, disolventes, gasolinas, etc.) también ha multiplicado el número de incidentes en los que estas sustancias orgánicas han llegado a la atmósfera, hidrosfera, suelos y sedimentos, provocando episodios contaminantes. (Mercado, 2006)

Los productos del petróleo constituyen una de las fuentes más importantes de contaminación de hidrocarburos que se difunden en el aire, las aguas superficiales y subterráneas y los suelos. Otras fuentes de contaminantes orgánicos son las prácticas agrícolas, el control de plagas en bosques y praderas, las actividades industriales, comerciales y pesqueras, etc. (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial, 2005)

Entre los compuestos orgánicos se encuentran los llamados compuestos orgánicos volátiles (COV), como el benceno, tolueno, xilenos, diclorometano, tricloroetano etc., los cuales generalmente se encuentran en la atmósfera pero también en el suelo debido a infiltraciones en el mismo a causa de derrames de sustancias que conllevan este componente. (CENAPRED, 1994)

La presencia de COV en el ambiente se debe a diversas actividades, tales como: (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2008)

- Síntesis química: como intermediarios para la obtención de plásticos, adhesivos, pinturas, colorantes, pigmentos, tintas, barnices, lacas, resinas, fibras, hules, etc.
- Formulación de adelgazadores o “thinners”.
- Desengrasado y limpieza de metales.
- Extracción de aceites, grasas y materiales medicinales a partir de plantas (industria farmacéutica).
- Limpieza en seco en tintorerías.
- Limpieza de micropartes en la industria electrónica.
- En laboratorios como estándares analíticos, reactivos, disolventes, etc.
- Formulación de plaguicidas.

La producción industrial de estos compuestos ha sido muy amplia al paso de los años por las diversas aplicaciones que se les puede dar. Tomando como ejemplo al benceno, cancerígeno comprobado y productor de anemia aplásica y leucemia en el hombre, en 1982 se calculó una producción anual de 14 millones de toneladas. (Mercado, 2006)

Por parte del tetracloroetileno (percloroetileno) que es un disolvente ampliamente utilizado en la limpieza en seco y la limpieza de metales y el cual se ha comprobado es cancerígeno para los animales; se estimó una producción en Europa de 350 mil toneladas anuales en 1979 y en Estados Unidos de 265 mil toneladas. Hacia 1987

se pensó que las emisiones anuales de este contaminante a la atmósfera, a nivel mundial, pudieron haber sido de 8000 mil toneladas. (Mercado, 2006)

De acuerdo a la información proporcionada por la Organización Europea de Compañías Petroleras para la Protección Ambiental y de la Salud, en un informe publicado en 1986, la principal fuente antropogénica de COV en Europa Occidental durante 1983 fue el uso de disolventes de todo tipo, con un total de 4,020,000 toneladas que representaron el 40.8% del total de la emisiones antropogénicas en esa región. (Mercado, 2006)

Respecto a México, el consumo de disolventes orgánicos alcanzó 478,922 toneladas en 1989, entre los cuales los más utilizados fueron los ésteres, éteres y cetonas como acetato de butilo, éter isopropílico y acetona. (Mercado, 2006).

La fuente de contaminación por COV se debe principalmente al mal manejo de las sustancias. Así, se tienen las siguientes causas: (Ministerio de Agricultura y Pesca, 2008)

- Almacenamiento incorrecto de productos y/o residuos en actividades industriales
- Vertidos de residuos incontrolados
- Escombros industriales
- Bidones enterrados
- Accidentes en el transporte de mercancías
- Fugas en tanques u operaciones deficientes

Debido al tema antes expuesto, se propone el siguiente trabajo de tesis, el cual aborda el tema de la contaminación del suelo por compuestos orgánicos volátiles, en específico, 1,2-dicloroetano. Así, se plantean los siguientes objetivos.

### **1.1 Objetivo general**

Identificar las tecnologías de rehabilitación de un suelo contaminado con 1,2-dicloroetano considerando las condiciones del sitio afectado y características del contaminante.

### **1.2 Objetivos particulares**

- Investigar sobre las técnicas de rehabilitación de sitios contaminados en medios impresos y electrónicos considerando los últimos seis años.
- Investigar propiedades, usos, aplicaciones y toxicología de 1,2-dicloroetano.
- Investigar sobre las características físico-químicas de las diferentes texturas del suelo.

### **1.3 Alcances y limitaciones**

- Se considerarán las zonas vadosa y saturada para la selección de las tecnologías de rehabilitación.
- Se considerará un caso de estudio a nivel académico

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades del suelo

#### 2.1.1 Definición de suelo

En este apartado se abordará el tema del suelo como medio en el que se presenta la contaminación, estudiando así, las características más importantes que permitirán entender la interacción de éste con el contaminante.

La definición de suelo varía de acuerdo a la disciplina que utilice este término. La Geología, define al suelo como la acumulación de material meteorizado suelto que cubre gran parte de la superficie terrestre y que puede oscilar desde una fracción de centímetro hasta varios metros de profundidad. (Dávila, 2011; RACEFN , 2010)

Respecto a su composición, en él se pueden encontrar los tres estados físicos de la materia: sólido, líquido y gas. (Juárez & Rico, 2005; Bautista, 1999)

- Fase sólida: Esta fase a su vez está comprendida por una parte orgánica y otra inorgánica. La fase orgánica se conforma por restos de vegetales y animales, microorganismos como hongos y bacterias y organismos del suelo como lombrices, insectos, larvas, raíces, etc. (Ortega, 2012). Por su parte, la fase inorgánica comprende principalmente minerales procedentes de la meteorización de las rocas como piedras, gravas, arenas, limos, arcillas; sales de calcio, magnesio, sodio y potasio esencialmente. (Bautista, 1999)
- Fase líquida: Corresponde al agua contenida en el suelo y se compone principalmente de agua con iones y gases en disolución. Es crucial para el desarrollo de los microorganismos y plantas, ya que absorben sus nutrientes a través de ella. Su importancia radica en que en esta fase se presentan los flujos de materia y energía entre las capas u horizontes (Bautista, 1999) y cómo se explicará más adelante, la migración del contaminante en el suelo.

- **Fase gas:** En ésta se encuentran componentes como O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub> entre otros, los cuales intervienen directamente en el desarrollo de ciertos microorganismos que se encargarán de desintegrar la materia orgánica presente en el suelo. Así, la presencia de altas concentraciones de O<sub>2</sub> fomentará el desarrollo de microorganismos aerobios mientras que su ausencia promoverá microorganismos anaerobios (Bautista, 1999). Esto toma gran importancia cuando se evalúan las tecnologías de rehabilitación a implementar en los sitios contaminados, sobre todo en la biorremediación.

La presencia de estas tres fases en el suelo jugará un papel importante cuando se estudie el comportamiento del contaminante en el suelo.

### **2.1.2 Perfil del suelo: horizontes**

El suelo presenta regiones diferenciadas de acuerdo a los distintos materiales, composición química, características físicas, contenido de materia orgánica, etc., presentes en él. A estas regiones se les denomina horizontes y a continuación se describen, desde el más superficial hasta el más profundo. (Pozo et.al, 2014)

- *Horizonte O:* Es la parte superior del suelo y contiene materia orgánica casi sin descomposición como la hojarasca.
- *Horizonte A/Área de lavado:* Esta región presenta generalmente color oscuro por abundancia de materia orgánica descompuesta o humus, arena y limo, fomentando así el paso del agua hacia abajo y creando una especie de lavado del suelo, eliminando principalmente calcio (Ca) y hierro (Fe).
- *Horizonte B/Zona de eluviación o acumulación:* Esta capa se conforma del material lavado de las capas superiores del suelo, por lo que presenta mayor fracción mineral y poca materia orgánica. Contiene arcilla y sales minerales de color más claro que el horizonte A, como calcio (Ca), hierro (Fe), aluminio (Al), sodio (Na) y magnesio (Mg).

- *Horizonte C:* En esta área se localiza roca madre en proceso de meteorización, presenta fragmentos granulosos, arena, algo de limo y muy poca arcilla
- *Horizonte D:* Esta franja se conforma de la roca madre original.

Es importante precisar que un suelo en particular puede o no contener todos los horizontes antes descritos dependiendo de los agentes edafológicos presentes en el lugar y tiempo. (Pozo et.al, 2014)

La *Figura 2.1(a)* representa los horizontes de forma esquemática y la *Figura 2.1 (b)*, un ejemplo de los horizontes en la naturaleza.



*Figura 2.1. (a)* Representación gráfica de horizontes en el suelo. Fuente: (Blanco & Garro, 2002). *(b)* Horizontes del suelo en la naturaleza. Fuente: (Rocha, 2015)

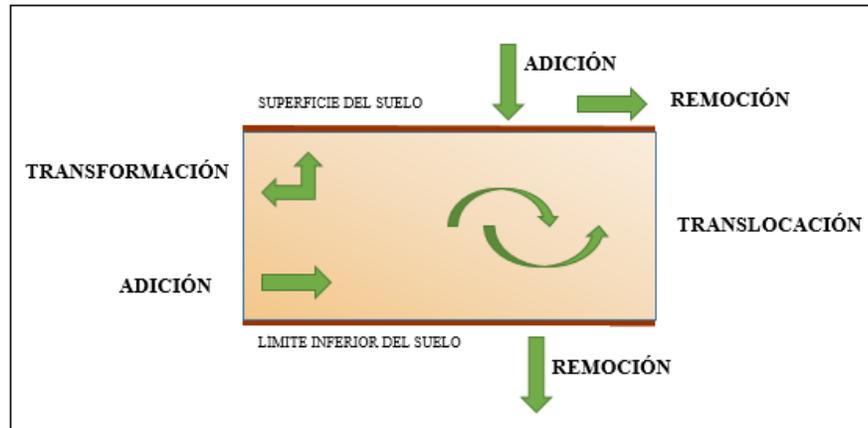
Resulta trascendente conocer las características de los horizontes debido a que el contaminante no se comportará de la misma manera en cualquiera de ellos.

## 2.2 Formación del suelo

Las características y propiedades de un suelo dependen en gran medida del proceso por el cual se formó, además de los factores a los que estuvo o está expuesto. Debido a esto, resulta significativo conocer tales procesos y factores de formación. (Jaramillo, 2002)

### 2.2.1 Procesos de formación del suelo

Los procesos elementales formadores del suelo de acuerdo con el efecto que se produce en él, son: Adición, Remoción, Transformación y Translocación. (Hernández et.al, 2006; Bautista, 1999; Jaramillo, 2002). Éstos se pueden observar de forma gráfica en la *Figura 2.2*.



*Figura 2.2.* Procesos formadores del suelo. Fuente: (Jaramillo, 2002)

La *Tabla 2.1* describe estos procesos formadores y ejemplos de ellos.

*Tabla 2.1.* Procesos formadores del suelo

Proceso de formación	Subproceso
<p><b>Adición</b> Proceso en el que se incorpora materia al suelo.</p>	<p><b>Littering:</b> Acumulación de materiales orgánicos en la superficie del suelo, principalmente vegetales y hojarasca.</p> <p><b>Cumulización:</b> Adición de partículas minerales a la superficie del suelo sin importar el agente que las haya transportado. Como ejemplo se tienen los piroclastos provenientes de la actividad volcánica.</p>
<p><b>Remoción</b> Proceso en el que se extrae definitivamente cualquier componente del suelo.</p>	<p><b>Erosión:</b> Proceso en el que mecanismos de transporte degradan físicamente el suelo y se llevan el material erosionado, perdiéndose parte del perfil.</p> <p><b>Lixiviación / Eluviación:</b> También denominado lavado, se refiere a la eliminación de materiales del suelo en solución debido generalmente a lluvia excedente que mueve hacia abajo los componentes del suelo, principalmente cationes calcio, sodio, magnesio y potasio.</p>

## Continuación...

<p><b>Transformación</b> (Meteorización o intemperismo) Proceso en el que se presentan cambios de composición y forma de los elementos originales del suelo.</p>	<p><b>Transformación física</b> <b>Descompresión:</b> Sucede cuando las rocas que se originan en la profundidad (sometidas a grandes presiones), al encontrarse en la superficie sufren una descompresión que hace incrementar su volumen, generando fracturas en el terreno.</p> <p><b>Transformación química</b> <b>Gleización o gleyzación:</b> Hace referencia a la transformación de óxidos de hierro a compuestos ferrosos debido a la presencia de condiciones reductoras (exceso de agua y deficiencia de oxígeno) en el medio.</p> <p><b>Transformación biológica</b> <b>Melanización / Humificación:</b> Se refiere a la transformación de los materiales orgánicos de los horizontes superficiales en humus por medio del metabolismo de los microorganismos. Este proceso es el principal responsable de la presencia de materia orgánica en el suelo.</p>
<p><b>Translocación</b> Proceso en el que se desarrollan movimientos ascendentes y descendentes de materiales a lo largo del perfil del suelo.</p>	<p><b>Salinización:</b> Proceso de enriquecimiento del suelo con sales más solubles que el yeso, tales como cloruros y sulfatos de sodio y magnesio.</p> <p><b>Argiluviación:</b> Proceso de movilización en suspensión de arcillas por medio del agua, como medio de transporte. Se requieren periodos húmedos para que el agua, con las arcillas en suspensión, se infiltre en los macroporos y periodos secos para que se sequen dejando las arcillas en sus paredes.</p>

Fuente: (Badía, 2011; Gardi, et.al., 2014; Pozo, et.al, 2014; Hernández, et.al., 2006)

La formación del suelo no es un proceso sencillo, intervienen muchos factores para su desarrollo, lo que hace que cada porción de terreno sea distinta y por lo tanto, presente diversas características.

Una vez descritos los procesos de formación, se presentan los agentes formadores del suelo.

### 2.2.2 Factores formadores del suelo

El desarrollo del suelo es función de la acción del clima y organismos asociados sobre un material parental, bajo el control de un relieve durante un determinado periodo de tiempo. A los factores antes mencionados, se les denominan agentes formadores del suelo. (Jaramillo, 2002; Bautista, 1999)

De esta manera, Jenny (1941, citado por Jaramillo, 2002) en su obra *Factors of Soil Formation* estableció el siguiente modelo:

$$S = f (C, MP, O, R, t)$$

Donde:        S: Desarrollo del suelo  
                  C: Clima  
                  MP: Material Parental  
                  O: Organismos  
                  R: Relieve  
                  t: Tiempo

El cual, determina que la formación y características del suelo es función de cada uno de los factores antes mencionados y que la variación de alguno de ellos bastará para que se constituya un suelo distinto. (Jaramillo, 2002)

A continuación se describe más a detalle el cómo influyen cada uno de estos factores en la formación del suelo.

#### **2.2.2.1 Factores formadores del suelo: Material Parental**

Se le denomina material parental a la roca sobre la cual se forma el suelo. Ésta puede tratarse de una roca consolidada, un depósito no consolidado e incluso un suelo pre-existente. Este material constituye la materia prima sobre la cual actúan los demás factores formadores y de ahí su trascendencia. (Badía, 2011; Gardi et.al, 2014)

El origen de las rocas es variado y de acuerdo a éste, se pueden clasificar como ígneas, sedimentarias y metamórficas. La *Tabla 2.2* muestra la descripción de estos grupos y la *Tabla 2.3* algunas de las rocas más comunes de acuerdo a la misma clasificación. (Gardi et.al, 2014)

Tabla 2.2. Clasificación de las rocas de acuerdo a su origen

Tipo de roca	Descripción
<b>Ígneas</b>	Son el origen de las demás rocas y se forman por la solidificación del magma cuando éste asciende a la superficie terrestre. Las condiciones bajo las cuales se produce su enfriamiento determinan la textura de la roca, o sea, el tipo, el tamaño, la forma, el arreglo espacial y el grado de cristalinidad de sus componentes. Respecto a su composición química, ésta dependerá del material original del magma.
<b>Sedimentarias</b>	Estas rocas se forman por litificación de sedimentos no consolidados que pueden ser producto de la acumulación de fragmentos de rocas preexistentes erosionadas o de la precipitación de compuestos químicos y/o de restos orgánicos.
<b>Metamórficas</b>	Estas rocas se originan a partir de rocas preexistentes cuando son sometidas a altas presiones y/o temperaturas, así como a la acción de fluidos químicamente activos, produciéndose cambios químicos y/o estructurales en los minerales de las rocas originales; estos cambios producen un reordenamiento y/o segregación de los minerales en las rocas.

Fuente: (Jaramillo, 2002; Pozo et. al, 2014; Javiera, 2010)

Tabla 2.3. Composición de las rocas

Nombre de la roca	Composición
<b>Ígneas</b>	
<b>Riolita</b>	Roca rica en sílice (SiO <sub>2</sub> ), compuesta principalmente por fenocristales de cuarzo y feldespato alcalino, a menudo con cantidades menores de plagioclasa y biotita, contenidos en una matriz vítrea o microcristalina.
<b>Obsidiana</b>	Llamada también vidrio volcánico. Compuesta de silicatos aluminicos y alrededor del 70% de óxidos de silicio SiO <sub>2</sub> .
<b>Pumita (piedra pómez)</b>	Contiene feldespato potásico, cuarzo y plagioclasa. Forma una pasta de grano fino a vítrea en las que cristales de biotita forman fenocristales.
<b>Andesita</b>	Contiene abundantes fenocristales de plagioclasa, anfíbol, biotita o piroxenos.
<b>Basalto</b>	Compuesta fundamentalmente por plagioclasa cálcica y piroxeno, pueden contener cantidades menores tanto de cuarzo como de olivino o feldespato.
<b>Granito</b>	Constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y mica.
<b>Gabro</b>	Compuesta esencialmente de plagioclasa cálcica, clinopiroxeno y/o ortopiroxeno, y óxidos de Fe. Además, tanto el olivino magnésico como el cuarzo (en baja proporción) pueden estar presentes.
<b>Sedimentarias</b>	
<b>Arenisca</b>	Se compone de cuarzo y feldespato.
<b>Brecha</b>	No están constituidas por simples minerales, sino por fragmentos de rocas de distinta naturaleza.

## Continuación...

<b>Yeso</b>	Compuesto esencialmente por sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), puede contener pequeñas cantidades de minerales de la arcilla, óxidos, cloruros, sílice y carbonatos.
<b>Dolomita</b>	Compuesto de carbonato de calcio y magnesio $[\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2]$ .
<b>Caliza</b>	Se compone principalmente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y constituye aproximadamente el 10% de todas las rocas sedimentarias. Frecuentemente presenta trazas de carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) y otros carbonatos.
<b>Turba</b>	Material orgánico, de color pardo oscuro y rico en carbono.
<b>Lignito</b>	Se forma cuando se comprime la turba, presenta entre un 60 a 75% de carbono y menor contenido de agua que la turba. Es un combustible de mediana calidad, fácil de quemar por su alto contenido en volátiles, pero con poder calorífico relativamente bajo.
<b>Metamórficas</b>	
<b>Cuarcita</b>	En composición, la mayoría de las cuarcitas llegan a ser más de 90 % de cuarzo y algunas incluso 99 %, lo restante puede ser feldespato entre otros.
<b>Anfibolita</b>	Compuesta en su mayor parte de minerales anfíboles.
<b>Mármol</b>	Formada a partir de rocas calizas. Su componente básico es el carbonato de calcio, cuyo contenido supera el 90 %, los demás componentes son considerados como "impurezas".
<b>Esquisito</b>	Contiene más de 50% de minerales planos y alargados, a menudo finamente intercalado con cuarzo y feldespato. Presenta preponderancia de minerales laminares tales como mica, clorita, hornablenda, grafito y otros.

Fuente: (CAMIMEX, 2012; Gardi, et.al, 2014; Badía, 2011; Mena, 2009)

De la *Tabla 2.3*, se observa que los principales componentes inorgánicos del material parental son los minerales, dada su influencia en las propiedades del suelo, sobre todo como fuente de nutrientes, en la *Tabla 2.4* se encuentra la constitución de los principales minerales susceptibles a encontrarse. (Pozo et. al, 2014)

*Tabla 2.4.* Principales minerales del suelo

<b>Cuarzo</b> ( $\text{SiO}_2$ )	<b>Anfíboles</b> (Hornblenda) ( $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ )
<b>Ortoclasa</b> ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )	<b>Piroxenos</b> (Augita) ( $(\text{Ca,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$ )
<b>Oligoclasa</b> ( $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$ )	<b>Albita</b> ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )
<b>Plagioclasa</b> ( $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$ )	<b>Olivino</b> ( $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$ )
<b>Moscovita</b> ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ )	<b>Magnetita</b> ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )
<b>Biotita</b> ( $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH, F})_2$ )	<b>Apatito</b> ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F, Cl, OH})$ )

Fuente: (Casanova, 2005)

La importancia del material parental como agente formador del suelo se debe a que con la disgregación y/o fraccionamiento de las rocas se crea el material terroso constituyente del terreno, heredando la roca original parte de sus propiedades, como textura, color, composición mineralógica, granulometría, permeabilidad, etc. Así, el material parental puede constituir por sí mismo, una fuente natural de contaminación por la acumulación de minerales que se liberan en el proceso de degradación o bien, una reserva de nutrientes que impacten en la flora y fauna del terreno. (Mejía 1991, citado por Jaramillo, 2002; Badía, 2011; Gardi et.al, 2014)

#### **2.2.2.2 Factores formadores del suelo: Organismos**

La presencia de microorganismos influye notablemente en la calidad del suelo, debido a que éstos participan en las transformaciones y translocaciones que se llevan a cabo en él. (Gardi et.al, 2014)

Los organismos de mayor importancia en el desarrollo del suelo son: (Casanova, 2005)

- **Macrofauna:** Compuesta por hormigas, lombrices de tierra, entre otros.
- **Microfauna:** Constituida por protozoarios y raíces de plantas principalmente.
- **Flora:** Conformada por especies como bacterias, algas y hongos.

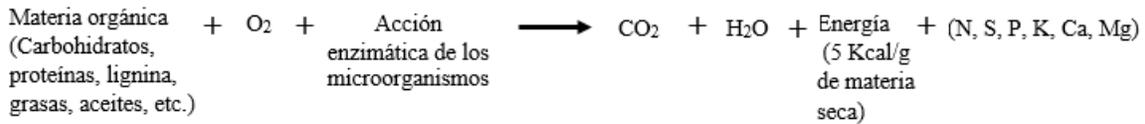
La macrofauna colabora de distintas maneras en la formación del suelo, por ejemplo, las lombrices al ser sapróvoras (se alimentan de restos orgánicos), degradan la materia orgánica e incorporan nutrientes al medio. Por otra parte, organismos como lombrices y hormigas transportan materiales desde el interior del suelo hacia la superficie o viceversa, participando en los fenómenos de translocación. (Jaramillo, 2002)

Aunque la participación de la macrofauna es importante, la mayor descomposición de los materiales orgánicos en el suelo la realiza la microflora, especialmente las bacterias. (Casanova, 2005)

Las bacterias son los microorganismos presentes en mayor medida en el suelo, la mayoría son heterótrofas y responsables del aporte de nutrientes al mismo,

provenientes de la materia orgánica que descomponen. Los elementos principales que incorporan al terreno, por medio de su metabolismo, son: carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros, con lo que el suelo se ve ampliamente enriquecido. (Hernández et.al, 2006; Bautista, 1999).

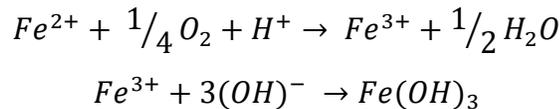
Esta reacción de descomposición de la materia orgánica se puede representar de la siguiente forma: (Casanova, 2005)



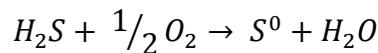
Las bacterias también intervienen en la transformación y migración de otras sustancias, a continuación algunos ejemplos de ello: (Hernández et.al., 2006)

Brock & Madigan (1991 citado por Jaramillo, 2002) explican que existe un género de bacteria litotrófica (obtiene energía de la oxidación de compuestos inorgánicos) llamada *Thiobacillus*, que puede intervenir en reacciones como las siguientes:

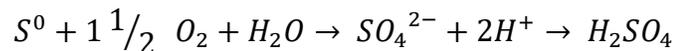
- ✓ Oxidar  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$ , en medio ácido:



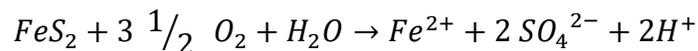
- ✓ Oxidar ácido sulfhídrico



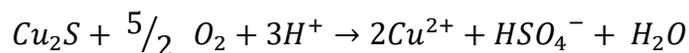
- ✓ Oxidar azufre elemental



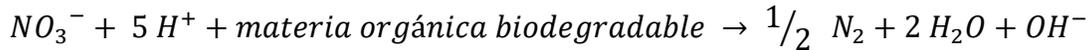
- ✓ Oxidar pirita ( $\text{FeS}_2$ )



- ✓ Oxidar cobre



- ✓ **Desnitrificación:** Transformando nitratos ( $NO_3^-$ ) o nitritos ( $NO_2^-$ ) a nitrógeno molecular ( $N_2$ ) o a óxido de nitrógeno ( $NO_x$ ), los cuales se pierden del suelo por volatilización. La reacción se representa de la siguiente forma: (Munévar, 1991, citado por Jaramillo, 2002)



Otros efectos importantes de la acción biológica son el favorecimiento de la disgregación física de la roca madre, principalmente bajo las raíces de los vegetales, y la meteorización química a través de los ácidos húmicos procedentes de la descomposición de los restos orgánicos. (Hernández et.al, 2006)

Todas las transformaciones antes mencionadas producen cambios nutricionales y mineralógicos en el terreno, estos cambios condicionan su evolución y el tipo de organismos mayores que se pueden establecer en él, por lo que resulta importante conocer la presencia de los microorganismos pobladores del terreno y consecuentemente, los compuestos potenciales a encontrar en él. (Hernández et.al., 2006)

### 2.2.2.3 Factores formadores del suelo: Clima

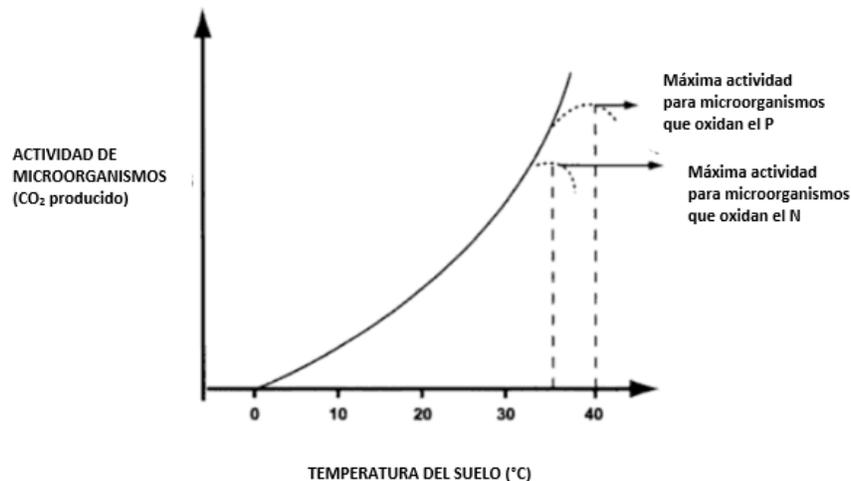
Este concepto se define como el estado medio de la atmósfera, o bien como el promedio de los estados del tiempo en un área determinada. Los fenómenos meteorológicos que lo determinan y lo hacen único en las distintas regiones, son: temperatura, presión atmosférica, viento, precipitación y humedad. (Errazuriz et.al, 1998)

Dentro los factores de formación del suelo, el clima es el más importante ya que determina el tipo de meteorización que sufre la roca y los seres vivos que la colonizarán. Así, resulta normal que diferentes tipos de rocas formen similares suelos bajo las mismas condiciones climáticas. (Hernández et.al, 2006)

Respecto a los elementos del clima, se ha encontrado que los que causan mayor impacto en el terreno son la temperatura y precipitación, por lo que se describe el efecto que producen. (Badía, 2011)

La influencia de la temperatura en el suelo se observa principalmente en los siguientes fenómenos que transcurren en él: velocidad de las reacciones químicas, actividad biológica de los microorganismos, presencia y descomposición de la materia orgánica y desintegración de la roca, todo interaccionando a la vez. (Casanova, 2005)

Casanova (2005) muestra en la *Figura 2.3*, la relación de la temperatura del suelo con el de la actividad microbiana, se sabe que por cada aumento de 10°C se promueve la actividad biológica de los microorganismos y la reacción de descomposición de la materia orgánica se acelera al doble. (Bautista, 1999; Hernández et.al, 2006).



*Figura 2.3.* Actividad de los microorganismos en función de la temperatura del suelo. Fuente Thompson & Troeh, 1978 citado por (Casanova, 2005)

Aunado a lo anterior, en suelos fríos se acumula materia orgánica, formando horizontes superficiales espesos, de colores oscuros y bajo grado de descomposición. A medida que aumenta la temperatura, en el piso cálido se incrementan los procesos de descomposición y mineralización. (Jaramillo, 2002).

Durante una humedad constante, el contenido de arcillas crece con la temperatura. Por esto en las regiones tropicales los suelos son más evolucionados y por lo general más arcillosos que los de las regiones templadas. (Hernández et.al, 2006)

Por otra parte, la precipitación es la principal responsable de la presencia de agua en el suelo, la cual desempeña diversas funciones que contribuyen a determinar las características del suelo, según su función se tiene: (Bautista, 1999)

Agente movilizador: El movimiento del agua por los poros, ya sea por capilaridad, evaporación o por gravedad arrastra nutrientes y contaminantes. De igual forma, a mayor precipitación, mayor cantidad de nitrógeno y arcillas. (Bautista, 1999).

Por otra parte, condiciones de humedad y sequía alternantes favorecen procesos de translocación, pero una humedad permanente sin saturación, propicia procesos de transformaciones y pérdidas. (Jaramillo, 2002)

Agente reactivo: El agua que penetra en las fisuras de las rocas e interrelaciona con los sedimentos, provoca reacciones químicas de hidrólisis y carbonatación que da lugar a transformaciones mineralógicas. (Hernández et.al, 2006).

Agente de nutrición: Permite y fomenta el crecimiento de plantas y organismos que aportan materia orgánica al suelo. (Gardi et.al, 2014)

Agente de meteorización: En regiones glaciares con un frío extremo, la ausencia de agua líquida impide la acción de procesos de meteorización química. Si además, la superficie de la litosfera está cubierta por grandes espesores de hielo glaciar, tampoco se desarrolla la meteorización física. En zonas frías menos extremas, con ciclos hielo/deshielo, es donde la meteorización física alcanza su máximo desarrollo, produciéndose fragmentación de las rocas por congelamiento del agua que se introduce en ellas. Las regiones desérticas, con escasa presencia de agua y actividad biológica, tampoco son adecuadas para la meteorización química. (Pozo et.al, 2014)

Concluyendo, a altas temperaturas y altas precipitaciones, se produce una mayor meteorización de la roca. (Hernández et.al, 2006).

#### **2.2.2.4 Factores formadores del suelo: Relieve**

El relieve se refiere a las múltiples formas que presenta la superficie terrestre debido a factores erosivos, sedimentarios y tectónicos. Los relieves se refieren tanto a

geoformas emersas (continentales) como a las sumersas (fondos marinos y lacustres). (RACEFN , 2010).

Los elementos del relieve, más significativos en la formación del suelo son: el grado de inclinación y longitud de la superficie, orientación respecto al sol y posición geográfica de la misma. Estos elementos influyen en los procesos que se llevan a cabo en el terreno y que por lo tanto, determinan sus características; a continuación se describen tales procesos en los que influyen. (Badía, 2011)

Transporte de materiales: Por acción de la gravedad, en el relieve se produce el transporte de todo tipo de materiales que se trasladan pendiente abajo. Dependiendo de su posición en el paisaje, el suelo se ve sometido a la acción de la erosión o por el contrario, la acumulación. (Jaramillo, 2002).

En zonas altas, el suelo está sometido a una intensa erosión, por lo que su superficie es muy delgada; para zonas de media ladera, el terreno está sometido a un continuo transporte de materiales sólidos y soluciones, presentando moderados espesores; para la parte baja de los declives, se produce una deposición de los materiales arrastrados (compuestos solubles y partículas sólidas), formando suelos que continuamente aumentan su grosor con texturas muy finas. (Jaramillo, 2002)

Respecto al transporte del agua, en relieves convexos, el agua de precipitación circula desde la superficie hacia las zonas más bajas creando un área de aridez local; para formas con relieve cóncavo, se presenta un excedente de agua, produciéndose la eliminación de la misma a través de su infiltración en el suelo o mediante su evaporación. (Jaramillo, 2002)

Por otra parte, el transporte de agua al subsuelo a través de los niveles freáticos está condicionada a la posición del suelo en el relieve. Por ejemplo, en los suelos del valle, el nivel freático se encuentra mucho más cerca de la superficie que en otros paisajes, lo que impide que la lixiviación sea tan intensa como en las áreas vecinas y por lo tanto, tales suelos, conserven por más tiempo sus nutrientes. (Casanova, 2005)

Microclima: El relieve también modifica las características del clima edáfico al influir en la temperatura y humedad del suelo. Así, la inclinación del terreno impacta en la intensidad calorífica de las radiaciones recibidas y cantidad de agua que penetra al suelo; la orientación regula el tiempo de incidencia de las radiaciones solares y la altitud influye en los elementos climáticos generales, contribuyendo estos factores a determinar el desarrollo de la vegetación y actividad microbiana del suelo. Así, se sabe que los suelos en umbría presentan mayor espesor y contenido en materia orgánica que los suelos en solana. (Gardi et.al, 2014; Badía, 2011)

#### **2.2.2.5 Factores formadores del suelo: Tiempo**

El intervalo de tiempo en el que están presentes los factores formadores y procesos formadores del suelo, determina el grado de desarrollo del mismo. Es así, como a medida que transcurre el tiempo se dice que los suelos son más evolucionados y por lo tanto, poseen características más complejas. (Bautista, 1999)

Se les denomina suelos jóvenes e inmaduros a aquellos que han desarrollado pocas propiedades y presentan horizontes escasamente diferenciados. A medida que van evolucionando, sus características se desarrollan más rápidamente; originando suelos más profundos y con horizontes más distinguibles unos de otros. (Badía, 2011) Sin embargo, hay que precisar que los suelos más antiguos no corresponden necesariamente a un gran desarrollo del perfil, esto sucede únicamente si los demás factores de formación del suelo han permanecido constantes. (Gardi et.al, 2014; Jaramillo, 2002)

En la *Figura 2.4* se muestra el desarrollo teórico de un suelo bajo condiciones de humedad a lo largo del tiempo. Primeramente, el material inalterado de la roca madre está expuesto a los procesos de meteorización; posteriormente la acumulación y descomposición de la materia orgánica lleva al desarrollo de un horizonte A; mucho más tarde, los procesos de formación del suelo dan lugar a la formación de un horizonte B con acumulación de materia orgánica, arcilla, hierro o aluminio (a menudo derivados del horizonte A) y tiempo después en condiciones de humedad, el horizonte superficial sufrirá un proceso de lavado (lixiviación) mediante

el cual, parte del horizonte superficial se transformará en un horizonte eluvial. (Gardi et.al, 2014)

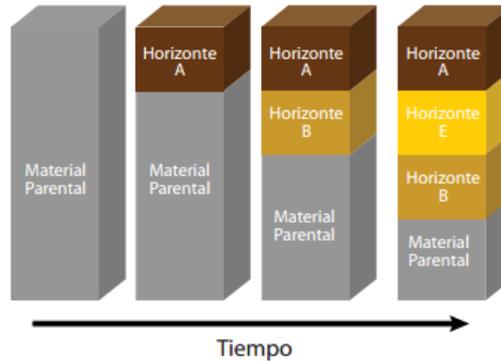


Figura 2.4. Formación del suelo a través del tiempo. Fuente: (Gardi et.al, 2014)

Algunas propiedades del suelo alcanzan rápidamente el equilibrio, entendiéndose como sólo algunos cientos de años, por ejemplo, el contenido de materia orgánica y lavado de los carbonatos. Sin embargo, hay otras propiedades con un desarrollo mucho más lento, requiriendo el orden de muchas decenas de miles de años, como la translocación de la arcilla. En consecuencia, los distintos horizontes que componen los suelos necesitan de tiempos muy distintos para su formación. (Jaramillo, 2002)

Se ha encontrado que la velocidad de formación del suelo va desde 1mm/año hasta 0,001mm/año siendo más rápido en climas cálidos y húmedos, donde la actividad de los organismos es más intensa y la vegetación más exuberante. (Gardi et.al, 2014)

A lo largo del tiempo los suelos alcanzan un estado de equilibrio, en el cual, la tasa de formación es igual a la tasa de destrucción. Este estado es conocido como suelo maduro, un suelo estable que actúa como soporte de un ecosistema. Es importante sobresaltar que dependiendo del tipo de suelo y presencia de factores formadores, el equilibrio se puede alcanzar a una edad cualquiera. (Gardi et.al, 2014)

## 2.3 Propiedades fisicoquímicas del suelo

### 2.3.1 Color

La naturaleza del color del suelo es una consecuencia de la longitud de onda de la luz visible reflejada por el mismo. Así, el contenido de humedad es importante para la definición del color, ya que suelos húmedos reflejan aproximadamente la mitad de la luz que los secos. En la práctica, es común la descripción del color en términos de seco, húmedo y mojado. (Casanova, 2005; Jaramillo, 2002)

Esta propiedad se puede evaluar como una medida indirecta de otras de las propiedades del suelo, tales como minerales presentes en él, secuencias del perfil, origen del material parental, grado de evolución, presencia de materia orgánica, estado de drenaje y presencia de sales. (FAO, 2016; Hernández et.al, 2006)

En los siguientes párrafos se detallan algunas de las propiedades que se pueden estimar en función del color del terreno.

**Color oscuro, negro, gris:** Esta coloración generalmente se le atribuye a sustancias húmicas y a veces al color de la roca formadora. Normalmente, el material orgánico al ser mineralizado, es finamente dividido y cubre las partículas de suelo de tal forma que 5% de la materia orgánica es capaz de darle un color bastante oscuro al horizonte superficial. (Casanova, 2005)

**Color blancuzco:** Colores blancos o claros son indicadores de un alto contenido de carbonato de calcio y otras sales, característico de suelos con poca evolución o meteorización. Generalmente se presenta en los horizontes eluviales a consecuencia del lavado de las arenas. (Casanova, 2005)

**Color pardo amarillento:** Éste indica la presencia de óxido de hierro ligeramente hidratado para formar la goethita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ). (Hernández et.al, 2006)

**Color rojo:** Este color pone en evidencia la presencia de óxidos férricos tipo hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Se presenta principalmente en zonas cálidas con estaciones de intensa y larga sequía y está asociado a suelos altamente evolucionados y meteorizados. (Casanova, 2005)

**Color gris verdoso/azulado:** Esta coloración pone de manifiesto la existencia de compuestos de hierro en forma reducida (óxido ferroso, FeO), señalando la aeración insuficiente del suelo. Característica típica de suelos saturados con agua, indicando mal drenaje y baja productividad. (Hernández et.al, 2006)

**Suelos con manchas:** Se presenta en suelos con alternancia de procesos de oxidación y reducción, indicando varios estados de oxidación del hierro presente. (Casanova, 2005; Hernández et.al, 2006)

Referente a los lugares donde se presentan las tonalidades antes mencionadas, se tiene que en suelos de regiones áridas los colores son claros, debido principalmente a los minerales presentes, ya que las condiciones climáticas no permiten cantidades significativas de materia orgánica y óxidos de hierro. (Hernández et.al, 2006)

Por otro lado, muchos suelos de áreas tropicales tienen colores rojizos debido a la alta precipitación y temperatura, la cual, acelera la meteorización produciendo una alta tasa de descomposición de materia orgánica y un aumento en el contenido de óxidos de hierro. (Casanova, 2005)

### **2.3.2 Porosidad**

Esta propiedad se refiere al porcentaje de volumen de espacios o poros que existen en la fase sólida del suelo. Estos son de gran importancia debido a las distintas sustancias que circulan a través de ellos, tales como nutrientes, aire, gases, etc., los cuales son significantes para el desarrollo o deterioración del suelo. (FAO, 2016)

En general, el volumen del suelo está constituido por 50% de materiales sólidos, de los cuales 45% corresponden a minerales y 5% a materia orgánica; el 50% restante lo constituye el espacio poroso (FAO, 2016)

Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos y microporos. Los primeros no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad, y por lo tanto son los responsables del drenaje y la aireación del terreno, constituyendo además, el principal espacio en el que se desarrollan las raíces. Los segundos, son los que

retienen agua por fuerzas capilares, y hacen que esté disponible para el aprovechamiento de las plantas. (Rucks et.al, 2004; Bautista, 1999)

Con relación a la distribución de poros, Baver et.al (1973, citado por Jaramillo 2002) consideran como ideal, aquella en la cual, macro y microporos se encuentran en igual proporción y agrega que, cuando la macroporosidad es menor del 10%, se restringe la proliferación de raíces.

Así, se tiene que terrenos arenosos son ricos en macroporos, permitiendo un rápido pasaje de agua, mientras que los suelos arcillosos son ricos en microporos y pueden manifestar una escasa aeración pero elevada capacidad de retención de agua. (Yajara, 2014)

Dependiendo del porcentaje de porosidad, se pueden definir los siguientes tipos de suelo en la *Tabla 2.5*. (Yajara, 2014)

*Tabla 2.5.* Tipos de suelo en función del porcentaje de porosidad

Tipo de suelo	% Porosidad
Ligero	30 – 45
Medio	45 - 55
Pesado	50 - 65
Turboso	75 - 90

Fuente: (Yajara, 2014)

### 2.3.3 Densidad

La densidad es una propiedad física de las sustancias que indica la razón que existe entre su masa y el volumen que ocupa en el espacio. El suelo por ser un cuerpo poroso y estar constituido por tres fases, presenta dos condiciones de densidad: densidad real y densidad aparente. (FAO, 2016)

La densidad real, es la razón entre la masa de suelo seco y el volumen de los sólidos del suelo. De ésta forma, no se tiene en cuenta el volumen que ocupan los espacios porosos ni tampoco la humedad que tiene el suelo. (Rucks, 2004)

Este tipo de densidad va a depender de las densidades individuales de los minerales componentes y de la materia orgánica, (principalmente de los minerales al constituir

el mayor porcentaje de la parte sólida del suelo). Así, como ejemplo, el cuarzo tiene una densidad real de  $2.6 \text{ g/cm}^3$ , la arcilla montmorillonita de  $2.4 \text{ g/cm}^3$ , la calcita de  $2.8 \text{ g/cm}^3$  y la hematita de  $4.9 \text{ g/cm}^3$  (Jaramillo, 2002)

Teóricamente, se asume una densidad real adecuada para suelos minerales de  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , cuya composición mineralógica es equivalente a silicatos con presencia de cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, montmorillonita y caolinita. En suelos cuya mineralogía está dominada por óxidos de hierro se presentará una densidad real muy por encima del valor promedio antes mencionado, mientras que valores por debajo del promedio pueden indicar alto contenido de materia orgánica y/o de aluminosilicatos no cristalinos. (Jaramillo, 2002)

Respecto a la densidad aparente, es la razón entre la masa del suelo seco y el volumen total del suelo, es decir, el volumen de sólidos más el volumen de espacios porosos, por lo que toma en cuenta el arreglo estructural del suelo. (FAO, 2016)

La importancia de esta densidad se debe a que con su valor se pueden hacer estimaciones acerca de características del suelo como: grado de compactación, contenido de espacios porosos (en conjunto con su densidad real), acumulación de carbonatos en el perfil, etc. (Rucks, 2004)

Debido a la facilidad con la cual se puede medir esta propiedad, se ha utilizado como parámetro para estimar el grado de deterioro del suelo, teniendo en cuenta que a medida que aumenta su valor, se está produciendo una degradación de la estructura del mismo, bien sea por compactación o por pérdida de materia orgánica. (Rucks, 2004)

#### **2.3.4 Textura**

La textura de un suelo se determina por las cantidades (medidas como porcentajes en peso) de partículas minerales inorgánicas que lo constituyen; clasificadas según su diámetro en: arena, limo y arcilla. (Buckman & Brady, 1966)

La clasificación más aceptada para estas partículas proviene del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y se muestra en la *Tabla 2.6.* (Rucks et.al, 2004)

*Tabla 2.6.* Clasificación de partículas del suelo con diámetro menor a 2.00 mm según la USDA

<b>Fracción del suelo</b>	<b>Diámetros límites (mm)</b>
Arena muy gruesa	2.00 - 1.00
Arena gruesa	1.00 - 0.50
Arena media	0.50 - 0.25
Arena fina	0.25 - 0.10
Arena muy fina	0.10 - 0.05
Limos	0.05 - 0.002
Arcilla	Menor a 0.002

Fuente: (Rucks et.al, 2004)

La importancia de determinar la textura del suelo se debe a que ésta indica el tamaño de la superficie sobre la cual ocurren las reacciones, además de otras propiedades como aireación, movimiento del agua, retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes, etc. (Buckman & Brady, 1966; Jaramillo, 2002)

De acuerdo con la *Tabla 2.6*, las partículas de arena son comparativamente de tamaño grande, exponiendo una superficie pequeña comparada con un peso igual al de partículas de arcilla o de limo. Debido a esto, su actividad física y química es menor. Estas partículas también presentan influencia en el tamaño de los poros entre partículas, aumentándolo y por lo tanto, facilitando el movimiento del aire y del agua de drenaje. Los minerales que se presentan mayoritariamente en esta fracción son el cuarzo y feldspatos. (Buckman & Brady, 1966; Yajara, 2014)

Por otro lado, las partículas de limo se sienten suaves, semejantes a un polvo y tienen poca tendencia a reunirse o a adherirse a otras partículas, presentan una velocidad de intemperización más rápida y una liberación de nutrientes solubles

mayor que el de la arena y poseen gran capacidad de retención de agua para el crecimiento vegetal. (Buckman & Brady, 1966)

Respecto a la fracción arcilla, ésta tiene la capacidad de retener agua contra la fuerza de gravedad y por lo tanto, siempre posee condiciones de humedad, impactando así, en la poca capacidad de drenaje de aire y agua. (Yajara, 2014)

Las partículas de arcilla son fundamentales para determinar las características del suelo, debido a que junto con la materia orgánica, poseen propiedades coloidales (área superficial grande, carga eléctrica, etc.), siendo responsables de la mayoría de las reacciones que se efectúan en el suelo. Dada su significancia, se procede a describir más de ellas. (Valencia, 2009)

Las partículas de arcilla, también conocidas como minerales secundarios, se han formado a partir de minerales constituyentes de las rocas, los cuales mediante cambios en el tiempo, se han transformado en minerales más pequeños y más reactivos desde el punto de vista químico. Principalmente están constituidas por silicatos ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) y óxidos de hierro ( $\text{Fe}_x\text{O}_x$ ). (Jaramillo, 2002)

Respecto a su clasificación, se dividen en arcillas silicatadas cristalinas, arcillas silicatadas no cristalinas o amorfas y no silicatadas, presentando una breve descripción en la *Tabla 2.7*. (Valencia, 2009)

*Tabla 2.7. Clasificación de las arcillas*

Tipo de arcilla	Descripción
<b>Silicatada cristalina</b>	Poseen una ordenación definida y repetida de átomos con enlaces iónicos. Con base en su estructura, se dividen en cuatro grupos principales: 1)Caolinita, 2)Montmorillonita, 3)Illita y 4)Vermiculita y Clorita (desarrollados en las <i>Tablas 2.8</i> y <i>2.9</i> ).
<b>Silicatada no cristalina o amorfa</b>	No presentan ningún grado de ordenamiento en su estructura. Los principales miembros que las caracterizan son: Alófano ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), Hissingerita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) e Imogolita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ).  Generalmente son mezclas de silicio y aluminio que no han formado cristales bien orientados y son principalmente encontrados en suelos formados por cenizas volcánicas. Entre sus propiedades significativas, presentan alta capacidad de intercambio catiónico.

## Continuación...

<b>No silicatadas (sesquióxidos de hierro y aluminio)</b>	<p>Constituidas por sesquióxidos de hierro y aluminio los cuales son mezclas de hidróxidos de hierro y aluminio, representados como <math>Al_2O_3 \cdot xH_2O</math> y <math>Fe_2O_3 \cdot xH_2O</math>. Estos compuestos pueden ser amorfos o cristalinos.</p> <p>Este tipo de arcillas no se expenden, no son pegajosas ni se comportan como las arcillas silíceas. Suelos con un 30 a 40% de sesquióxidos pueden adsorber agua como las arenas finas. El alto porcentaje de hidróxido de hierro y aluminio originan una enorme superficie para la adsorción de fósforo, formando fosfatos insolubles.</p>
---	--

Fuente: (Valencia, 2009; Casanova, 2005; Jaramillo, 2002)

Las arcillas silicatadas cristalinas se dividen en cuatro grupos de acuerdo a su estructura cristalina, la *Tabla 2.8* muestra tal clasificación y la *Tabla 2.9* las características que aportan cada grupo al suelo.

*Tabla 2.8.* Clasificación de las arcillas silicatadas cristalinas acorde a su estructura cristalina

<b>Caolinita o de las Kanditas (1:1)</b>	<b>Montmorillonita o de las Esmectitas (2:1)</b>	<b>Illita o de las Micas hidratadas (2:1)</b>	<b>Vermiculita y Clorita (2:2)</b>
Caolinita	Montmorillonita	Moscovita	Clorita
Dickrita	Beidellita	Seladonita	Vermiculita
Auxita	Nontronita	Biotita	Sepiolita
Haloisita	Hectorita	Filita	Atapulgita
Metahaloisita	Saponita	Glauconita	
		Serospatita	

Fuente: (Valencia, 2009)

Tabla 2.9. Características representativas de los principales grupos de las arcillas cristalinas silicatadas

Arcilla en función del grupo cristalino	Características representativas														
<p><b>Caolinita</b> <math>Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8</math></p> <p><b>Representación general del cristal:</b></p> <table border="1" data-bbox="272 569 721 898"> <tr> <td>O=Si++++O-</td> <td>Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td>O=Al+++OH</td> <td>Capa Octaédrica</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">H H H H</td> </tr> <tr> <td>O=Si++++O-</td> <td>Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td>O=Al+++OH</td> <td>Capa Octaédrica</td> </tr> </table>	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	H H H H		O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	<p>Mineral 1:1, formado por placas planas que consisten en una lámina de tetraedro de silicio con fórmula <math>Si_2O_3</math> y una lámina de octaedros de aluminio con fórmula <math>Al_2O_3(OH)_4</math>.</p> <p>En suelos intemperizados es la más común, presentan alto grado de estabilidad, poca capacidad de contracción y expansión, poca cohesividad, baja capacidad de retención de agua, baja capacidad de intercambio de cationes, baja capacidad de fijación de potasio y amonio, alta capacidad de fijación de fosfato.</p>				
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
H H H H															
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
<p><b>Montmorillonita</b> <math>Na_x(Al_{2-x}Mg_x)Si_4O_{10}(OH)_2</math></p> <p><b>Representación general del cristal:</b></p> <table border="1" data-bbox="261 1192 683 1587"> <tr> <td>O=Si++++O-</td> <td>Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td>O=Al+++OH</td> <td>Capa Octaédrica</td> </tr> <tr> <td>O=Si++++O-</td> <td>Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> </td> </tr> <tr> <td>O=Si++++O-</td> <td>Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td>O=Al+++OH</td> <td>Capa Octaédrica</td> </tr> <tr> <td>O=Si++++O-</td> <td>Capa Tetraédrica</td> </tr> </table>	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica			O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	<p>Formada por la alteración de vidrio volcánico. Se presenta en zonas áridas y semiáridas.</p> <p>Es un mineral tipo 2:1, cada placa consiste en dos láminas tetraédricas de silicio y una de alúmina. Presenta bajo grado de estabilidad, alta capacidad de expansión, alta cohesividad, alta capacidad de retención de agua, capacidad de fijación de potasio y amonio, alta capacidad de intercambio de cationes, su alta CIC se explica porque las sustituciones de aluminio por magnesio o hierro y de silicio por aluminio ocurre en láminas, liberando enlaces de valencias dentro del cristal así como en las aristas.</p>
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														

Continuación...

<p><b>Illita</b>  <math>Al_2 (Si_3Al)O_{10}(OH)_2</math>  <b>Representación general del cristal:</b></p> <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Al+++OH</td> <td style="padding: 2px;">Capa Octaédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin-left: 40px;">K    K    K</p> <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Al+++OH</td> <td style="padding: 2px;">Capa Octaédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> </tbody> </table>	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	<p>Es un mineral tipo 2:1, cada placa consiste en dos láminas tetraédricas de silicio y una de alúmina, iones potasio forman puentes entre las placas en lugar de iones OH<sup>-</sup>, evitando así su expansión cuando se moja.</p> <p>Es un mineral no abundante en suelos. Fija nitrógeno en forma de amonio aunque no es aprovechable por las plantas hasta que el mineral está descompuesto por la meteorización. Presenta baja capacidad de contracción, mediana capacidad de retención de agua, mediana capacidad de intercambio de cationes, alta capacidad de fijación de potasio, amonio y fosfato.</p>		
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
<p><b>Vermiculita</b>  <math>[Mg(H_2O)_6 ]_n [(Mg,Fe)_3Si_{4-n}Al_n]O_{10}(OH)_2</math></p> <p><b>Clorita</b>  <math>(Mg,Al,Fe)_{12} ((Si,Al)_8O_{20})(OH)_{16}</math></p> <p><b>Representación general del cristal:</b></p> <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Al+++OH</td> <td style="padding: 2px;">Capa Octaédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-left: 40px; margin-top: 10px;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Al+++OH</td> <td style="padding: 2px;">Capa Octaédrica</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-left: 40px; margin-top: 10px;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Al+++OH</td> <td style="padding: 2px;">Capa Octaédrica</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">O=Si++++O-</td> <td style="padding: 2px;">Capa Tetraédrica</td> </tr> </tbody> </table>	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	O=Al+++OH	Capa Octaédrica	O=Si++++O-	Capa Tetraédrica	<p>La vermiculita es similar a la Illita pero tiene capas más débilmente unidas por magnesio hidratado en vez de iones potasio. Su capacidad de intercambio es alta y puede fijar humus.</p> <p>A la clorita se le considera un mineral tetramórfico (4 capas, 2 tetraédricas y 2 octaédricas). Se presenta con más frecuencia en rocas sedimentarias. Su composición elemental es variable, pudiendo presentar elementos tóxicos como cromo y níquel. Una capa de clorita tiene dos tetraedros de silicio y un octaedro de aluminio y uno de magnesio. Común en muchos suelos.</p> <p>Baja capacidad de contracción y expansión, mediana capacidad de retención de agua, mediana capacidad de fijación de fosfato, baja capacidad de fijación de humus.</p>
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														
O=Al+++OH	Capa Octaédrica														
O=Si++++O-	Capa Tetraédrica														

Fuente: (Valencia, 2009)

De la *Tabla 2.9*, se observa que dependiendo de las partículas de arcilla que constituyan el suelo, serán sus propiedades, aportando cada grupo características distintas, de ahí su importancia, sobre todo en el proceso de intercambio iónico. (Valencia, 2009)

### 2.3.4.1 Clasificación de suelo con base en la textura

Las diferentes cantidades en las que se presentan las fracciones del suelo han sido agrupadas en doce clases texturales. Se trata de incluir en cada clase aquellos suelos que, aunque presentan diferentes cantidades de arena, limo y arcilla, las presentan en proporciones tales que su comportamiento físico, químico y mecánico no difiere apreciablemente entre ellos. (Jaramillo, 2002)

Los rangos de variación de las clases texturales se representan en el triángulo textural (*Figura 2.5*), establecido por la SSDS (División de Levantamientos del Suelo, por sus siglas en inglés). Para determinar la clase que le corresponde a un suelo dado, se ubican los porcentajes de arena, limo y arcilla en el respectivo eje del triángulo, se proyecta en él dicho valor, siguiendo la dirección indicada por la flecha, hasta que las tres líneas se intercepten determinando un punto; la clase en la cual queda comprendida dicha intersección es la clase textural del suelo analizado; así por ejemplo, a un suelo que presente 40% de arena, 30% de limo y 30% de arcilla, le corresponde la clase textural franco arcillosa. (Rucks et.al, 2004)

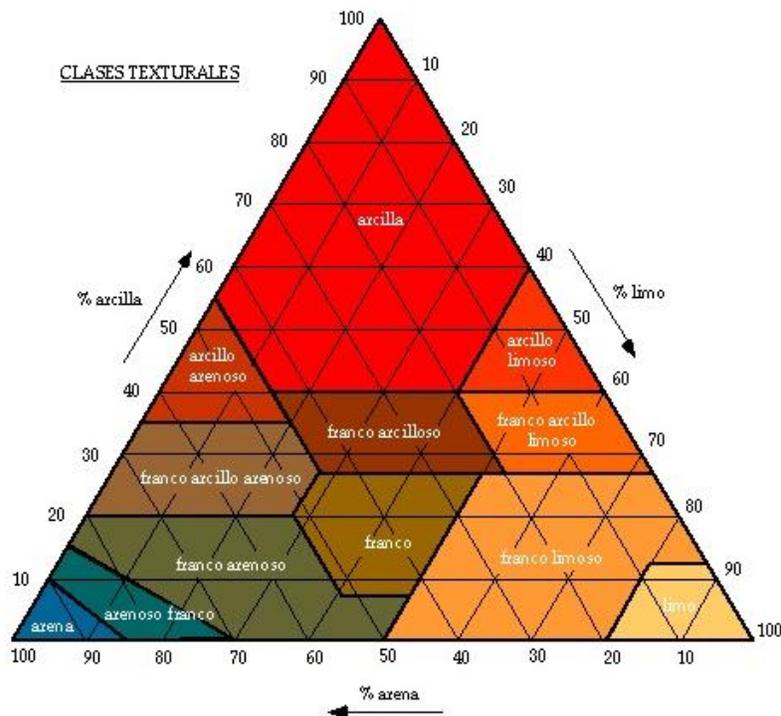
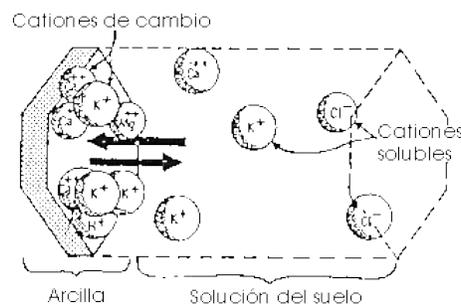


Figura 2.5. Triángulo textural. Fuente: (Rucks et.al, 2004)

El término utilizado para definir una clase textural implica la fracción dominante en la textura; así, en un suelo arcillo limoso, la fracción dominante es la arcilla, ya que es la fracción que encabeza el nombre de la clase textural; el suelo franco es aquel cuyas fracciones están en una proporción tal que ninguna de ellas domina las propiedades del suelo; esta clase textural es la que presenta un mejor equilibrio entre las fracciones. (Yajara, 2014)

### 2.3.5 Capacidad de intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso reversible y estequiométrico, mediante el cual la fase sólida retira y retiene algunos iones de la disolución presente en el suelo, al mismo tiempo que le entrega cantidades equivalentes de otros para establecer un nuevo equilibrio entre las dos fases. La *Figura 2.6* esquematiza este proceso. (Dorronsoro B , Carlos, 2016)



*Figura 2.6.* Intercambio iónico en el suelo. Fuente: (Dorronsoro B , Carlos, 2016)

La retención de iones en la fase sólida se da tanto con cationes como con aniones y se lleva a cabo debido a la presencia de cargas electrostáticas en los coloides del suelo y en los iones presentes en la solución del mismo, los cuales quedan atraídos en los sitios de carga contraria para neutralizarse y establecer el equilibrio de cargas. A este tipo de atracción electrostática se le denomina adsorción. (Dorronsoro B , Carlos, 2016)

A excepción de las arenas puras, todos los suelos contienen partículas coloidales, las cuales presentan las siguientes características: (Valencia, 2009)

- Carga eléctrica
- Tamaño de partícula muy pequeño (dimensiones de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$  mm)
- Área superficial grande
- Adsorben partículas
- Flocculan
- Absorben humedad

En el suelo se pueden distinguir dos tipos de coloides: orgánicos (materia orgánica humificada) e inorgánicos (minerales, principalmente arcillas), siendo los inorgánicos los más abundantes, a continuación se presentan algunas de sus particularidades. (Valencia, 2009)

*Coloides inorgánicos:*

- Actúan como sustancias amortiguadoras
- Adsorben metabolitos tóxicos
- Inmovilizan cationes inorgánicos
- Adsorben elementos nutritivos, tanto positivos como negativos
- Constituyen el cemento de los agregados más o menos gruesos
- Confieren al suelo su estructura

*Coloides orgánicos:*

- Almacenamiento de nutrimentos orgánicos (tanto positivos como negativos)
- Adsorben sustancias lipofílicas

La importancia del intercambio iónico se debe a que gracias a él, partículas solubles pueden quedar adheridas a los coloides del suelo y así evitar que se laven con el agua de lluvia o riego, esto es especialmente importante para los nutrientes de las plantas como nitratos, amonio, fósforo, potasio y calcio; por otra parte, iones tóxicos (Cu, Pb, Ni, Cd, Co, y V) también pueden ser adsorbidos y resultar perjudiciales, aunque también es posible la neutralización de toxinas, ya que las raíces de las plantas por ciertos mecanismos las excretan y posteriormente el suelo las adsorbe y destruye por oxidación. (Casanova, 2005; Valencia, 2009)

La capacidad de intercambio iónico también interviene en el pH del suelo, ya que dependiendo de los iones presentes, será el valor de pH de la solución del mismo. Por ejemplo, una arcilla sódica es generalmente alcalina y una arcilla hidrogenada, ácida. (Valencia, 2009)

El intercambio iónico incluye al intercambio catiónico y aniónico, sin embargo, la capacidad de cambio que se considera más relevante, es la de cationes, por la mayor presencia de ellos en la composición material parental. (Valencia, 2009)

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es la medida de la capacidad que posee un suelo para adsorber cationes, por lo que es equivalente a la carga negativa del mismo. (Dorronsoro B , Carlos, 2016; FAO, 2016)

Los cationes más importantes en los procesos de intercambio catiónico por las cantidades que participan, son:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  y  $\text{Na}^{+}$ , conocidas como las bases del suelo, el catión  $\text{NH}_4^{+}$  también es importante, pero este sólo se presenta en suelos ácidos. El  $\text{Al}^{3+}$  también juega un papel muy importante, constituyendo junto con el  $\text{H}^{+}$ , la acidez intercambiable del suelo. (Jaramillo, 2002)

El nivel de CIC indica la habilidad de los suelos para retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes para la planta, pH, entre otros. De esta manera, un suelo con baja CIC muestra baja habilidad para retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica. (Jaramillo, 2002)

La CIC del suelo se expresa en  $\text{cmol/Kg}$  de suelo o en  $\text{meq/100g}$  de suelo y depende de la cantidad y tipo de coloides que posee. La *Tabla 2.10* muestra algunos valores de CIC que se pueden encontrar dependiendo del material coloidal. (Jaramillo, 2002; FAO, 2016)

*Tabla 2.10.* Capacidad de Intercambio catiónico en los coloides del suelo

Coloide	Rango de CIC ( $\text{cmol/Kg}$ de material)
Vermiculita (Mineral formado por silicatos de Fe o Mg)	100 - 150
Montmorillonita (Arcilla, hidroxisilicato de Mg y Al)	80 - 120
Ilita (Arcilla, del grupo de los filosilicatos $(\text{Si}_2\text{O}_5^{2-})_n$ )	20 - 40
Clorita (Arcilla, del grupo de los filosilicatos $(\text{Si}_2\text{O}_5^{2-})_n$ )	10 - 50
Alofano (Arcilla, del grupo de los hidroaluminosilicatos, Si-O-Al)	10 - 150

**Continuación...**

Coloide orgánico	100 - 300
Caolinita (Arcilla, del grupo de los silicatos)	3 - 15
Haloisita (Arcilla, del grupo de los silicatos)	5 - 10
Sesquióxidos de Hierro y Aluminio amorfos (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3 - 10

Fuente: (Jaramillo, 2002)

La Capacidad de Intercambio Aniónico (CIA) se define como la capacidad que posee un suelo para adsorber aniones intercambiables, por lo que es equivalente a la carga positiva del mismo. Sánchez (1981, citado por Jaramillo, 2002) menciona que esta capacidad es significativa sobre todo en suelos con alto contenido de sesquióxidos de hierro y aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ya que por su estructura, son los compuestos más propensos a sufrir este intercambio a ciertos valores de pH.

Los aniones más comunes son: nutrientes como cloruro (Cl<sup>-</sup>), bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), dihidrógeno fosfato (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>), hidróxido (OH<sup>-</sup>), fluoruro (F<sup>-</sup>), dihidrógeno borato (H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y molibdato (MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), metales pesados como dicromato (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) y algunos plaguicidas; estos dos últimos con influencia directa en la contaminación de suelos. (Valencia, 2009; Casanova, 2005)

**2.3.6 pH del suelo**

El pH es una variable química que de forma cuantitativa indica las condiciones de acidez o alcalinidad de una sustancia, en este caso del suelo. Su importancia radica en que dependiendo de su valor, se desarrollan diferentes mecanismos y reacciones, como son: el intercambio iónico, solubilización y precipitación, fenómenos de adsorción, complejación, entre otros. Debido a esto, resulta significativo conocer la acidez o alcalinidad del suelo, la *Tabla 2.11* muestra su clasificación de acuerdo al valor de pH. (Ibáñez, 2006; Casanova, 2005)

Tabla 2.11. Clasificación del suelo acorde al rango de pH que presenta

Tipo de suelo	Rango de pH
Fuertemente alcalino	Mayor a 9
Moderadamente alcalino	8 a 9
Ligeramente alcalino	7 a 8
Neutro	6.5 a 7
Ligeramente ácido	6 a 6.5
Moderadamente ácido	5 a 6
Fuertemente ácido	Menor a 5

Fuente: (Casanova, 2005)

### 2.3.6.1 Acidez del suelo

En los suelos ácidos se pueden distinguir dos tipos de acidez: la activa o real y la potencial. (Casanova, 2005)

La acidez activa se refiere a la concentración de iones hidrógeno en la solución del suelo y es la que se obtiene al medir su pH; mientras que la potencial, es la susceptible a desarrollar y corresponde a la suma de hidrógeno ( $H^+$ ) y aluminio ( $Al^{3+}$ ) intercambiables retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas (acidez intercambiable) y al hidrógeno en enlace covalente retenido en la superficie de las arcillas de carga variable (acidez no intercambiable). (Bernier & Alfaro, 2006)

La acidez del suelo se genera por distintas causas que a continuación se describen.

#### a) Lixiviación

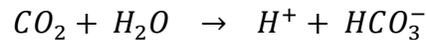
Proceso en el que una alta precipitación y/o riego generan un constante paso de agua a través del terreno y desarrollan un lavado de cationes básicos ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ) a través de los poros del mismo, especialmente los que se encuentran menos fuertemente ligados a la arcilla (y materia orgánica), es decir el sodio ( $Na^+$ ) y potasio ( $K^+$ ), dando lugar a la permanencia de cationes de mayor fuerza iónica como el aluminio ( $Al^{3+}$ ) e hidrógeno ( $H^+$ ), tanto en los sitios de intercambio como en la solución del suelo. (Bernier & Alfaro, 2006; Casanova, 2005)

### **b) Formación de complejos hidroxialumínicos (Al(OH)<sub>3</sub>)**

Dentro de las reacciones del suelo, se encuentra la formación de estos complejos, el proceso comienza por la liberación de iones Al<sup>3+</sup> por parte de las arcillas, como resultado del intercambio catiónico, posteriormente sufren una hidrólisis durante la cual se liberan iones H<sup>+</sup> que contribuyen a la acidificación del suelo y finalmente se forman tales complejos. (Bernier & Alfaro, 2006; Casanova, 2005)

### **c) Descomposición de la materia orgánica**

Durante la etapa de descomposición de la materia orgánica, uno de los productos principales es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el cual, puede transformarse fácilmente en bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), liberando cationes H<sup>+</sup> que acidifican el suelo. La reacción se representa de la siguiente forma: (Bernier & Alfaro, 2006)



### **d) Uso de fertilizantes nitrogenados de reacción ácida**

La absorción de nitrógeno por parte de las plantas se da en forma de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) y amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), procedentes de fertilizantes como sulfato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) y urea CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>. (Bernier & Alfaro, 2006)

Dado que la absorción de nitrógeno es preferentemente en forma de nitratos, el amonio sufre un proceso de nitrificación de forma natural a través de microorganismos, la cual libera H<sup>+</sup> al medio y por lo tanto, contribuye a la acidez del suelo. La reacción se escribe a continuación: (Bernier & Alfaro, 2006)



### **e) Remoción de nutrientes por los cultivos**

Los cultivos también contribuyen a la acidez del suelo, ya que mediante el intercambio catiónico, absorben cationes básicos (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>), liberando hidrógeno (H<sup>+</sup>) al medio para mantener el equilibrio en su interior, incrementando así, la cantidad de iones ácidos en el terreno. Sin embargo, las raíces pueden liberar H<sup>+</sup> u OH<sup>-</sup> a fin de mantener la neutralidad eléctrica de su superficie durante la

absorción de los iones de los nutrientes, sirviendo como fuente ácida o básica. (Bernier & Alfaro, 2006; Casanova, 2005)

#### **f) Lluvia ácida**

La lluvia ácida contiene ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), entre otros, proveniente de los óxidos de nitrógeno, azufre y carbono presentes como contaminantes en la atmósfera que en contacto con el agua generan los ácidos antes mencionados. El pH con el que llega esta lluvia ácida al suelo es alrededor de 5.6, contribuyendo a la modificación de la acidez del terreno. (Cano, 2014)

#### **2.3.6.2 Alcalinidad del suelo**

La alcalinidad ocurre con menor frecuencia en los suelos y por ello no constituye un gran problema comparado con la acidez. Se presenta principalmente en regiones áridas o semiáridas (donde no ocurre un lavado de bases) y depende en gran medida de los materiales parentales locales, vegetación e hidrología. (Casanova, 2005)

Los valores altos de pH se deben generalmente a la presencia natural de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ). Estos pueden ser igualmente aportados por la contaminación de polvos provenientes de industrias del cemento y por el agua de riego. (Ibáñez, 2006)

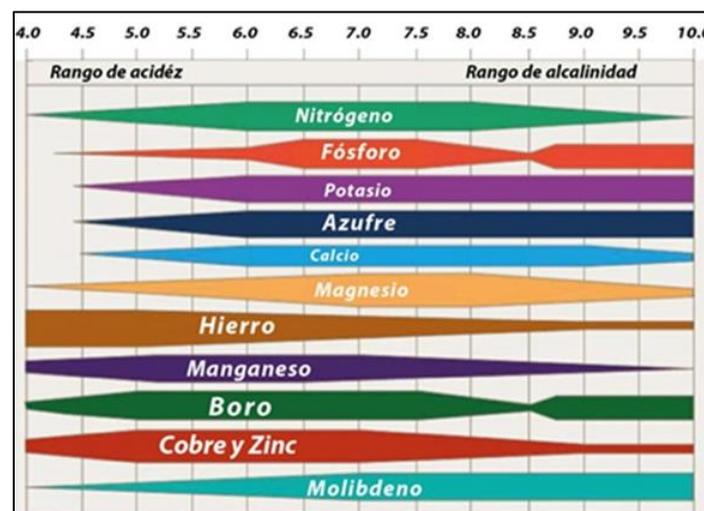
La salinidad conforma una de las causas de alcalinidad en el suelo y puede constituir un problema cuando las sales se concentran, son estables y no se lavan, ya que pueden destruir la estructura del suelo causando la expansión de las arcillas y la dispersión de las partículas finas que obstruyen los poros del suelo a través de los cuales circulan agua y oxígeno, además, por sus características se pueden encontrar tanto en la fase sólida como en la líquida, presentando gran movilidad en el suelo. Respecto a las plantas, cuando crecen en suelos salinos, su crecimiento se reduce, las hojas de los tallos no se expanden y presentan dificultad para absorber agua; con la acumulación de sales, las hojas se mueren y eventualmente toda la planta muere. (FAO, 2016)

Algunas causas de la salinidad se deben a un drenaje inadecuado y presencia de una capa freática alta favoreciendo el ascenso de sales desde las partes más profundas (FAO, 2016)

### 2.3.6.3 Efectos del pH en el suelo

El valor de pH del suelo impacta directamente en los elementos químicos presentes en él: de acuerdo a su valor, se define la presencia o escasez del elemento, al igual que su comportamiento como nutriente o elemento tóxico hacia la planta. Por otra parte, también influye en la estructura del suelo y en la proliferación de microorganismos, los cuales actúan mejor bajo ciertas condiciones de pH. (Bernier & Alfaro, 2006; Casanova, 2005)

La *Figura 2.7* exhibe un esquema con los principales elementos constituyentes del suelo en función del valor de pH. (FAO, 2016)



*Figura 2.7.* Disponibilidad de elementos químicos en el suelo en función del pH.  
Fuente: (FAO, 2016)

Así, se tiene que el principal efecto de un pH muy alto o muy bajo es que algunos nutrientes pueden estar disponibles en forma excesiva y ser tóxicos mientras que la disponibilidad de otros puede disminuir y aparecer como deficiencias en el cultivo. (Cano, 2014)

De la *Figura 2.7*, se observa que la acidez disminuye la disponibilidad de nutrientes como calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), fósforo ( $\text{P}^{5+}$ ) y molibdeno ( $\text{Mo}^{6+}$ ), mientras favorece la solubilización de elementos tóxicos para las plantas como el aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ), que aunque se encuentren en bajas concentraciones, son tóxicos para la mayoría de los cultivos. (FAO, 2016)

El pH del suelo también afecta a los microorganismos que habitan en él, al igual que las reacciones que desempeñan, determinando así la disponibilidad de ciertos nutrientes. Por ejemplo, cuando el suelo es ácido (pH 4.5 a 5.5) la descomposición de la materia orgánica hacia la producción de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) se acelera debido a la acción de bacterias amonificantes. Por otro lado, el proceso de nitrificación (conversión de nitrógeno amoniacal a nitrógeno nítrico) es óptimo a pH entre 6.5 y 7.6. (Bernier & Alfaro, 2006)

En conjunto, la acidez representada por la poca disponibilidad de nutrientes y potencial toxicidad es la razón de la baja productividad y mala calidad de las cosechas de los suelos ácidos. En general, se prefiere un pH del rango de 5.5 a 6.5, debido a que en éste crecen satisfactoriamente la mayoría de los cultivos. (Ibáñez, 2006)

Por otra parte, se habla mucho acerca del poder de amortiguamiento o buffer del suelo, es decir la capacidad que presenta el terreno a cambiar su pH de forma significativa en condiciones ácidas o básicas. Esta capacidad de amortiguamiento está directamente relacionada con el tipo de mineral que conforma el suelo, la textura de él y la cantidad y tipo de materia orgánica. (Jaramillo, 2002)

Los minerales que ayudan a amortiguar los cambios de pH son variados y dependen del valor de pH del suelo. A pH alto, los óxidos de calcio, magnesio y potasio, junto con los carbonatos son los que actúan, mientras que a un pH ácido, los óxidos de aluminio e hidróxidos de hierro son los agentes de amortiguamiento. A niveles intermedios de pH, la materia orgánica del suelo, las reacciones minerales de intemperie y las reacciones de intercambio ayudan a amortiguar el suelo. (Jaramillo, 2002)

En general, los suelos de arcilla tienen una capacidad de amortiguar más alta que los suelos arenosos y una tendencia a contener materia orgánica más alta para aumentar la capacidad de amortiguación. (Jaramillo, 2002)

### 2.3.7 Nutrientes del suelo

Existen 16 elementos esenciales para las plantas, 3 de ellos son suministrados mayoritariamente por el aire y agua (C, H, O) constituyendo el 95% de la planta; los 13 elementos restantes son aportados por el suelo y se pueden clasificar como macronutrientes y micronutrientes dependiendo de la cantidad que las plantas necesitan absorber. A continuación se presenta su descripción. (Cano, 2014)

**Macronutrientes:** Son necesarios en cantidades abundantes para asegurar el crecimiento y supervivencia de las plantas. Su presencia en el suelo no es suficiente, ya que además deberán estar en forma asimilable. Los macronutrientes del suelo son nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). (Cano, 2014)

**Micronutrientes:** Estos elementos se requieren en pequeñas cantidades; su insuficiencia da lugar a una desnutrición y su exceso a una toxicidad. Son propensos a representar un problema en suelos arenosos, suelos orgánicos y en suelos muy alcalinos. Tal grupo está conformado por hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), molibdeno (Mo), cobre (Cu), zinc (Zn) y cloro (Cl). (Cano, 2014)

La *Tabla 2.12* hace un resumen acerca de algunas de las funciones que desempeñan algunos de los nutrientes antes mencionados y las fuentes de ellos.

*Tabla 2.12.* Funciones y fuentes de nutrientes del suelo

Nutriente	Funciones	Fuentes
<b>Nitrógeno (N)</b>	Favorece el crecimiento vegetativo. Da el color verde a las hojas.	El N se encuentra en distintas formas en el suelo, aunque es absorbido por las plantas y microorganismos como nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) o amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ).

## Continuación...

<b>Fósforo (P)</b>	Después del N, es el macronutriente que limita el rendimiento de los cultivos, además interviene en numerosos procesos biogeoquímicos a nivel celular, también contribuye a desarrollar más rápidamente las raíces y mejora la resistencia a las altas temperaturas.	De forma orgánica se encuentra del 50 al 60% en el humus del suelo y alrededor del 40 al 50% de forma inorgánica en minerales primarios. Este fósforo mineral se encuentra adsorbido en las arcillas y en solución, que es el que pueden aprovechar las plantas en forma de $\text{HPO}_4^{2-}$ (fosfato monoácido) y $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$ (fosfato diácido).
<b>Potasio (K)</b>	Importante en la activación enzimática, fotosíntesis, síntesis de proteínas y carbohidratos y en la calidad de los frutos.	Los minerales arcillosos son la principal fuente de K en el suelo, aunque su presencia también se debe a la mineralización de residuos orgánicos y adición de fertilizantes al suelo. Se encuentra como catión intercambiable en la solución del suelo.
<b>Azufre (S)</b>	Constituyente de enzimas, actúa en el ciclo de hidratos de carbono y lípidos, interviene en mecanismos de óxido-reducción de las células, actúa en la formación de clorofila, ayuda en el desarrollo del sistema radicular y bacterias que asimilan el nitrógeno atmosférico.	Se encuentra en la roca madre (basalto), azufre cristalino, gas natural y agua de ríos. Es absorbido por las plantas como sulfato en forma aniónica ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Su carencia se debe a que no se encuentra en forma asimilable, además de que su presencia se limita el pH del suelo, el contenido de materia orgánica y la salinidad del mismo.
<b>Calcio (Ca)</b>	Estimula el desarrollo de las raíces y hojas, forma compuestos en las paredes celulares, ayuda a reducir nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en las plantas, ayuda a activar sistemas de enzimas y neutralizar ácidos orgánicos en la planta.	Procedente principalmente del material parental (calcita, dolomita, yeso) meteorizado. Suelos áridos presentan niveles altos de Ca y suelos arcillosos contienen más Ca que los suelos arenosos. Debido a que el Ca existe como catión su presencia está en función del intercambio catiónico. Generalmente es el catión dominante en el suelo.
<b>Magnesio (Mg)</b>	Participa en el proceso de fotosíntesis, componente básico de la clorofila, su deficiencia limita la producción de los cultivos.	Proviene de minerales como biotita, hornablenda, dolomita y clorita. Está sujeto a intercambio catiónico. Se encuentra en la solución del suelo y se absorbe en las superficies de las arcillas y materia orgánica.

Fuente: (Cano, 2014; Smart Fertilizer Management, 2016)

Estos son los principales elementos que constituyen al suelo y el cómo influyen en su desarrollo, por lo que es importante que estén disponibles en la matriz porosa para su absorción. (FAO, 2016)

## 2.4 Hidrogeología: Agua subterránea

El agua subterránea es la que se aloja y circula en el subsuelo, su principal fuente de abastecimiento proviene de la lluvia mediante el proceso de infiltración, además de otras fuentes de recarga como ríos, arroyos, lagos y lagunas adyacentes. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)

La dirección del flujo del agua es determinada por el potencial hidráulico en los diferentes puntos del subsuelo y fluye desde regiones de mayor a menor energía potencial. En su trayectoria, el agua pasa a través de diversos obstáculos geológicos, dando como resultado bajas velocidades y tiempos de residencia muy largos, que aunado a las características geológicas del subsuelo (tales como porosidad y permeabilidad), pueden generar grandes depósitos de agua llamados acuíferos. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)

### 2.4.1 Distribución vertical del agua subterránea

Dependiendo de la región que ocupa el agua subterránea en el subsuelo, se pueden distinguir tres zonas, de la más somera a la más profunda: Zona no saturada, nivel freático y zona saturada, las cuales se pueden observar en la *Figura 2.8* y que a continuación se describen. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)

**Zona no saturada:** También conocida como zona vadosa o de aireación. Se localiza entre la superficie del terreno y el nivel freático; en ella, los poros y/o fisuras están ocupados por agua y aire. Esta zona se esquematiza en la *Figura 2.8 (b)*. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008). En ella se pueden distinguir otras tres zonas:

- **Zona de evapotranspiración:** Tiene espesor variable y se extiende hasta donde llegan las raíces de las plantas, en ella los procesos físicos, químicos y biológicos son intensos y variados. La existencia de abundante materia

orgánica (horizonte A del suelo) y la fuerte actividad biológica vegetal y de microorganismos, que genera una alta producción de  $\text{CO}_2$ , hacen que esta franja edáfica actúe como un filtro natural a los contaminantes. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)

- **Zona intermedia:** Está comprendida en la parte inferior por el límite del ascenso capilar del agua y en la parte superior por el límite de alcance de las raíces de las plantas. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)
- **Zona o franja capilar:** De abajo hacia arriba, se extiende desde la superficie freática hasta el límite del ascenso capilar del agua. Su espesor depende principalmente de la distribución del tamaño de los poros y de la homogeneidad del terreno. La saturación de los huecos es heterogénea y temporal dependiendo del ascenso del nivel freático. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)

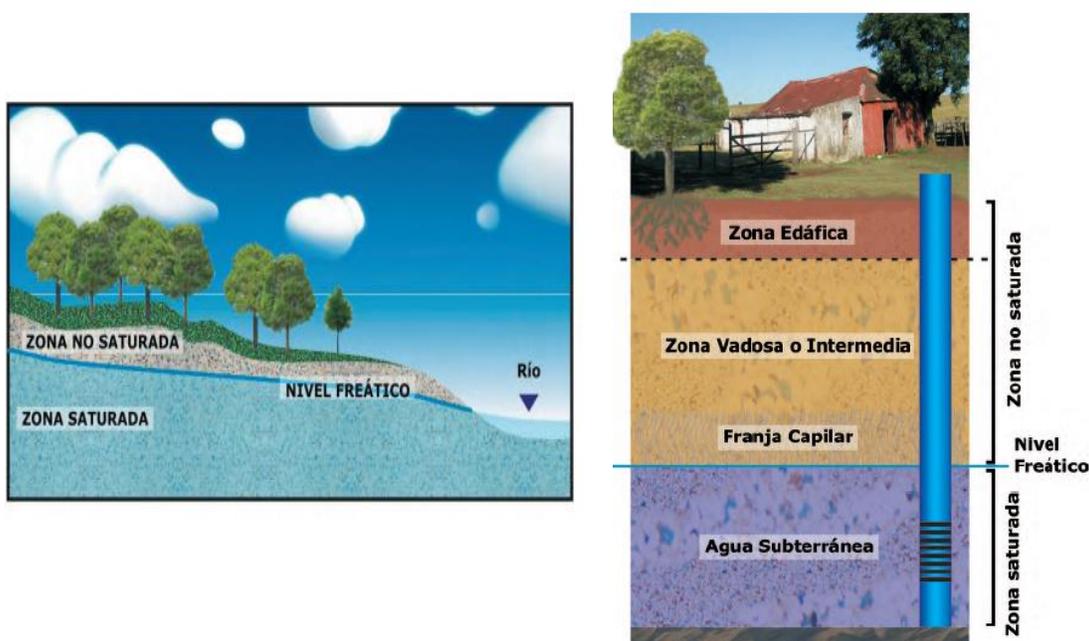


Figura 2.8. (a) Zonas del subsuelo acorde a la distribución del agua subterránea. (b) Detalle de la zona no saturada del subsuelo.  
Fuente (Collazo & Montaña, 2012)

**Nivel freático:** Es la superficie que separa la zona no saturada y la saturada y que por lo tanto corresponde al nivel que alcanza el agua naturalmente en el subsuelo. Estrictamente, es la elevación de la superficie del agua en relación con una superficie de referencia que suele ser el nivel medio del océano. Una característica importante a resaltar es que en la superficie freática, la presión del agua es igual a la presión atmosférica y ésta aumenta en función de la profundidad dentro de la zona saturada. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)

**Zona saturada o freática:** Se sitúa debajo del nivel freático; en ella se encuentra como tal, el agua subterránea, saturando completamente los poros y/o fisuras del terreno. (Collazo & Montaña, 2012; Fuentes, 2008)

#### **2.4.1 Formaciones geológicas de acuerdo a su capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.**

La presencia de agua subterránea y su trayectoria en el terreno es función de las formaciones geológicas presentes durante su trayecto, las cuales favorecerán o dificultarán su paso. De acuerdo a su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua se pueden distinguir las siguientes. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

**Acuífugos:** Este tipo de formación geológica no es capaz de almacenar ni transmitir agua subterránea debido a su baja permeabilidad y porosidad. Generalmente constituido por granitos. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

**Acuícludo:** Formación geológica que contiene agua, pero por su baja permeabilidad no la transmite en condiciones normales, por lo que no es posible extraer agua de él. Generalmente están constituidos por arcillas. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

**Acuitardos:** Es una formación geológica susceptible de almacenar agua en grandes cantidades, presenta elevada porosidad y es semipermeable, transmitiendo el agua muy lentamente y resultando difícil su extracción con obras de captación. Sin embargo, son importantes para la recarga de acuíferos

subyacentes, debido a la posible filtración vertical o drenaje. Generalmente constituido por limos y limos arenosos. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

**Acuíferos:** Son formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir el agua subterránea a través de ella, pudiendo extraerse en cantidades significativas mediante obras de captación (pozos). Generalmente constituido por arenas, gravas y macizos cristalinos fracturados. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

Conociendo el valor de la conductividad hidráulica, se puede deducir el tipo de formación geológica presente en el subsuelo, ya que por la *Tabla 2.13* se conoce la permeabilidad de la roca y con ello, el tipo de formación geológica. (Custodio & Llamas, 1976)

*Tabla 2.13.* Permeabilidad de las rocas acorde a su conductividad hidráulica

Conductividad hidráulica, k (cm/s)	Permeabilidad
$k > 10$	Muy permeable
$10 > k > 10^{-4}$	Permeable
$10^{-4} > k > 10^{-7}$	Poco permeable
$k < 10^{-7}$	Impermeable

Fuente: (Custodio & Llamas, 1976)

Como se infiere, las formaciones geológicas de mayor interés son los acuíferos, puesto que de ellos se puede extraer agua. Acorde a la estructura del acuífero, se pueden clasificar en libres, confinados y semiconfinados, representados en la *Figura 2.9* y que más adelante se describen. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)



*Figura 2.9.* Acuíferos presentes en la naturaleza.

Fuente: (Collazo & Montaña, 2012)

**Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** Su límite inferior es impermeable y su límite superior es una superficie libre o nivel freático (está en contacto con el aire de la zona no saturada) y por lo tanto a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuífero es directa y se realiza por infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada o por infiltración de ríos o lagos. Son los más afectados en caso de sequía, ya que el nivel freático oscila con los cambios climáticos. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

**Acuíferos confinados, cautivos o a presión:** Su principal característica es que se encuentran limitados en su parte superior por una formación geológica de baja a muy baja permeabilidad, por lo que su recarga es lateral. La presión hidrostática en el nivel del techo del acuífero es superior a la atmosférica y en su límite superior el agua se encuentra a una presión superior. Si se perfora un pozo a través de la formación confinante superior hasta alcanzar el acuífero, el agua del mismo ascenderá hasta equilibrar la presión atmosférica. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

**Acuíferos semiconfinados o semicautivos:** Son mucho más frecuentes en la naturaleza que los cautivos. En estos, el techo, el piso o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad que si bien dificultan, no impiden la circulación vertical del agua. Para que ello suceda, además de la permeabilidad deben existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y otro superior o inferior. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de unidades de bajas permeabilidades denominadas semiconfinantes, filtrantes o acuitardos. (Padilla F. , 2009; Collazo & Montaña, 2012)

Con esto se finaliza el tema de agua subterránea, la cual es importante estudiar debido a que es una fuente de transporte del contaminante en toda la extensión del suelo y conociendo sus características y movimiento es cómo se propondrán estrategias para mitigar la contaminación presente.

**CAPÍTULO 3. LEGISLACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS EN MÉXICO**  
**Sector ambiental federal**

En México, la dependencia del gobierno federal encargada de impulsar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales, al igual que de los bienes y servicios ambientales, es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. (DOF B, 2003)

De esta forma, el sector ambiental federal lo conforma la SEMARNAT junto con sus Subsecretarías, Órganos Desconcentrados y Órganos Descentralizados (*Tabla 3.1*), que en conjunto trabajan en cuatro aspectos fundamentales: (SEMARNAT, 2015)

- *Conservación y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y su biodiversidad*
- *Prevención y control de la contaminación*
- *Gestión integral de los recursos hídricos*
- *Combate al cambio climático*

*Tabla 3.1.* Organograma de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

<b>Subsecretarías</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental</li> <li>• Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental</li> <li>• Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental</li> </ul>
<b>Órganos desconcentrados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Delegaciones Federales</li> <li>• Coordinaciones Regionales</li> <li>• Comisión Nacional del Agua</li> <li>• Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático</li> <li>• Procuraduría Federal de Protección al Ambiente</li> <li>• Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas</li> </ul>
<b>Organismos descentralizados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comisión Nacional Forestal</li> <li>• Instituto Mexicano de Tecnología del agua</li> </ul>

Fuente: (DOF B, 2003)

Algunas de las actividades que desarrolla la SEMARNAT para el cumplimiento de sus objetivos son: la implementación de los Programas de Gestión de la Calidad del Aire, la instrumentación del Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, impulso al establecimiento de estrategias estatales y municipales de gestión de residuos, el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, la remediación de sitios contaminados, el manejo integral y seguro de las sustancias químicas y materiales peligrosos, además de vigilar el estricto cumplimiento de la legislación ambiental mediante la realización de acciones de inspección, vigilancia y auditoría ambiental. (SEMARNAT, 2015)

### **Clasificación del sistema normativo**

Con la finalidad de sistematizar y hacer más evidentes los alcances de las normas jurídicas, éstas se han clasificado, entre otras formas, conforme a: 1) su jerarquía, 2) ámbito material de validez y 3) ámbito espacial de validez, explicando a qué se refiere cada grupo en los siguientes párrafos. (SCJN, 2006)

- **Jerarquía:** En esta clasificación se establecen normas jurídicas superiores e inferiores, determinando así, cual norma rige en caso de alguna contradicción. Esta clasificación también permite conocer el sustento que tiene una norma, pues estará basada en alguna superior.
- **Ámbito material de validez:** En este grupo se identifica la materia que se pretende regular: derecho público, derecho privado, derecho social, etc.
- **Ámbito espacial de validez:** Este ámbito se basa en el territorio donde las normas son aplicables, correspondiendo una disposición Federal regir a todas las entidades de la República y una disposición local a cada entidad federativa, finalmente las disposiciones municipales corresponden al municipio dónde fueron creadas.

Para explicar la legislación ambiental aplicable a suelos contaminados se escoge describirla desde el enfoque de su jerarquía. Observando la *Figura 3.1* se tiene que la máxima ley corresponde a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, siguiendo en orden descendente con los Tratados Internacionales,

Leyes, Reglamentos, Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX) (SCJN, 2006)



Figura 3.1. Jerarquía del Sistema Jurídico Mexicano.  
Fuente: (PEMEX Exploración y Producción, 2010)

### 3.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

Entre las diferentes disposiciones presentes en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, las que se presentan en los siguientes párrafos son de alguna manera, las involucradas para que el gobierno actúe en contra de la contaminación. En los distintos artículos sólo se menciona lo que compete a la materia ambiental.

**Artículo 4º.** En este artículo se menciona el derecho de las personas a la protección de su salud, un medio ambiente sano y acceso, disposición y saneamiento del agua.

**Artículo 25º.** Hace referencia a garantizar un desarrollo nacional con actividades económicas integrales y sustentables, apoyando empresas del sector social y privado bajo criterios de equidad social, productividad y sustentabilidad.

**Artículo 27º.** Señala que la nación tiene derecho a regular el aprovechamiento de los elementos naturales con objeto de cuidar su conservación. Además, de dictar medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos con el fin de preservar y restaurar el equilibrio ecológico.

**Artículo 73º.** Señala la facultad del Congreso para contribuir a la expedición de leyes en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

### **3.2 Tratados Internacionales**

Por lo encontrado en la página de la Suprema Corte de Justicia de la Nación (2016), de los 30 tratados internacionales en materia de Medio Ambiente, los representativos en cuanto a contaminación por sustancias químicas se refiere, son los siguientes:

- Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación.
- Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes.
- Convenio de Róterdam para la Aplicación del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional.
- Convenio Internacional para prevenir la Contaminación por los Buques, 1973.
- Convenio Internacional Relativo a la Intervención en Alta Mar en Casos de Accidentes que cause una Contaminación por Hidrocarburos.
- Protocolo relativo a la Intervención en Alta Mar en Casos de Contaminación por Sustancias Distintas de los Hidrocarburos.
- Convenio Internacional sobre Cooperación, Preparación y Lucha contra la Contaminación por Hidrocarburos.
- Convenio sobre la Prevención de la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y otras Materias.

### **3.3 Leyes**

Las leyes las emite el Poder Legislativo a fin de regular la conducta humana y las aplicables en cuanto al sector ambiental, son las siguientes: (SEMARNAT, 2015)

- *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.*
- *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.*
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
- Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos.
- *Ley de Aguas Nacionales.*
- Ley Federal de Responsabilidad Ambiental.

Por considerarse las leyes de mayor relevancia en cuanto a contaminación se refiere, se describen las leyes que aparecen en cursiva.

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

Esta ley se conforma por siete Títulos: **1º** Disposiciones generales, **2º** Distribución de competencias y Coordinación, **3º** Clasificación de los residuos, **4º** Instrumentos de la Política de Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, **5º** Manejo integral de residuos peligrosos, **6º** De la Prevención y manejo Integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, **7º** Medidas de control y de seguridad, infracciones y sanciones. (DOF A, 2003)

En el Título Primero se señala la existencia de disposiciones para 1) garantizar el derecho de las personas a un ambiente sano, 2) propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, residuos sólidos urbanos y de manejo especial 3) *prevenir la contaminación de sitios contaminados con estos residuos y llevar a cabo su remediación.* (DOF A, 2003)

Por lo anterior, se observa que ya aparece el concepto de *sitio contaminado y remediación* como tema de interés en la legislación. En este mismo Título se encuentran definiciones importantes al formar parte del vocabulario referente a la contaminación de suelos:

**Caracterización de sitios contaminados:** Es la determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes presentes en el sitio para estimar su magnitud y tipo de riesgos que conlleva dicha contaminación. (DOF A, 2003)

**Gestión integral de residuos:** Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región. (DOF A, 2003)

**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. (DOF A, 2003)

**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 actividades 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. (DOF A, 2003)

Por otra parte, en el Título Quinto, Capítulo V se encuentra el tema de responsabilidad acerca de la contaminación y remediación de sitios, señalando que los responsables de la contaminación de un sitio, así como de los daños a la salud como consecuencia de ésta, están obligados a reparar el daño causado. (DOF A, 2003)

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

La LGEEPA se conforma por los siguientes Títulos: **1º** Disposiciones generales, **2º** Biodiversidad, **3º** Aprovechamiento Sustentable de los Elementos naturales, **4º** Protección al ambiente, **5º** Participación social e Información Ambiental, **6º** Medidas de control y de seguridad y sanciones. (DOF, 2016)

El Título Primero hace referencia a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, señalando que sus disposiciones tienen como fin un desarrollo sustentable. En este título también se señala la definición de Equilibrio ecológico, el cual se refiere a las relaciones de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente y que hacen posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos. (DOF, 2016)

En el Título Cuarto, Capítulo IV el tema es la Prevención y control de la contaminación del suelo. (DOF, 2016)

### **Ley de Aguas Nacionales (LAN)**

La LAN está constituida por 10 Títulos: **1º** Disposiciones preliminares, **2º** Administración del agua, **3º** Política y programación hídricas, **4º** Derechos de explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, **5º** Zonas reglamentadas, de veda o de reserva, **6º** Usos del agua, **7º** Prevención y control de la contaminación del agua, **8º** Inversión en infraestructura hidráulica, **9º** Bienes Nacionales a cargo de la Comisión Nacional del Agua, **10º** Medidas de apremio, seguridad, infracciones, sanciones y recursos. (DOF A, 2014)

En el Título primero se señala que la LAN tiene como objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable, incluyendo aguas superficiales y del subsuelo. (DOF A, 2014)

La definición importante que se encontró en cuanto a restauración del suelo fue la de *Acuífero*, el cual se indica como una formación geológica por la que circula o se almacena agua del subsuelo que puede ser extraída para su explotación, uso o aprovechamiento. (DOF A, 2014)

### **3.4 Reglamentos**

Los reglamentos aplicables y de apoyo en cuanto a contaminación se refiere son los siguientes: (SEMARNAT, 2015)

- *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales
- Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Reglamento Interior de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos.

Respecto al reglamento de la LGPGIR, éste se compone de siete Títulos: **1º** Disposiciones preliminares, **2º** Planes de manejo, **3º** Residuos provenientes de la industria minero metalúrgica, **4º** Residuos Peligrosos, **5º** Importación y exportación de residuos peligrosos, **6º** *Remediación de sitios contaminados*, **7º** Medidas de control y de seguridad, infracciones y sanciones transitorias. (DOF B, 2014)

Como se observa en el párrafo anterior, en el reglamento de la LGPGIR, Título Sexto aparece el tema de la remediación de sitios contaminados, estableciendo la obligación de ejecutar programas de remediación cuando se contamine un sitio derivado de una emergencia o exista un pasivo ambiental, también se enfoca en los temas de estudios de caracterización, propuestas de remediación y procedimientos de remediación. (DOF B, 2014)

### **3.5 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)**

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las Dependencias de la Administración Pública Federal, que establecen reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación; así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación. (SEMARNAT, 2015)

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) expide las NOM del Sector Ambiental con el fin de establecer las características y especificaciones, criterios y procedimientos, que permitan proteger y promover el mejoramiento del medio ambiente y los ecosistemas, así como la preservación de los recursos naturales. (SEMARNAT, 2015)

Para facilitar su consulta, las NOM vigentes del Sector Ambiental se clasificaron en las siguientes materias: Agua, Contaminación por Ruido, Emisiones de Fuentes Fijas, Emisiones de Fuentes Móviles, Impacto Ambiental, Lodos y Biosólidos, Medición de Concentraciones, Metodologías, Protección de Flora y Fauna, Residuos y Suelos. Presentando a continuación las referentes a Residuos y Suelos. (SEMARNAT, 2015)

#### **Residuos**

**NOM-133-SEMARNAT-2015** Protección ambiental - Bifenilos Policlorados (BPCs) - Especificaciones de manejo.

**NOM-161-SEMARNAT-2011** Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo, el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

**NOM-159-SEMARNAT-2011** Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.

**NOM-157-SEMARNAT-2009** Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros

**NOM-052-SEMARNAT-2005** Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

**NOM-055-SEMARNAT-2003** Que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados

**NOM-145-SEMARNAT-2003** Confinamiento de residuos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables

**NOM-083-SEMARNAT-2003** Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

**NOM-098-SEMARNAT-2002** Protección ambiental - Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**NOM-141-SEMARNAT-2003** Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.

**NOM-133-SEMARNAT-2000** Protección ambiental-Bifenilos policlorados (BPCs) - Especificaciones de manejo.

**NOM-058-SEMARNAT-1993** Que establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

**NOM-057-SEMARNAT-1993** Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.

**NOM-056-SEMARNAT-1993** Que establece los requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.

**NOM-054-SEMARNAT-1993** Que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993.

**NOM-053-SEMARNAT-1993** Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

### **Suelo**

**NOM-155-SEMARNAT-2007** Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.

**NOM-021-SEMARNAT-2000** Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

**NOM-020-SEMARNAT-2001** Que establece los procedimientos y lineamientos que se deberán observar para la rehabilitación, mejoramiento y conservación de los terrenos forestales de pastoreo.

**NOM-023-SEMARNAT-2001** Que establece las especificaciones técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelos.

**NOM-062-SEMARNAT-1994** Que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos sobre la biodiversidad que se ocasionen por el cambio de uso del suelo de terrenos forestales a agropecuarios.

**NOM-060-SEMARNAT-1994** Que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua por el aprovechamiento forestal.

### **Elaboración conjunta con otras Secretarías**

**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.

**NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004** 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.

### **3.6 Normas Mexicanas (NMX)**

Las Normas Mexicanas (NMX) son regulaciones técnicas de aplicación voluntaria expedidas por la Secretaría de Economía, las cuales se prevén para un uso común y repetido de reglas, especificaciones, atributos, métodos de prueba, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación; así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado. (SEMARNAT, 2015)

Conforme a la clasificación emitida por la Secretaría de Economía, las NMX elaboradas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y por la Comisión Nacional del Agua, y aprobadas por el Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales (COTEMARNAT), corresponden al Sector de “Protección Ambiental” y su letra de identificación es “AA”. (SEMARNAT, 2015)

Para facilitar su consulta, las NMX vigentes del Sector Ambiental fueron clasificadas por materia dentro de las siguientes categorías: Agua, Atmósfera, Fomento y Calidad Ambiental, Potabilización de Agua, Protección de Flora y Fauna, Residuos,

Ruido y Suelo. Presentándose a continuación las referentes a Residuos y Suelo. (SEMARNAT, 2015)

### **Residuos**

**NMX-AA-103-SCFI-2006** Residuos – Determinación de compuestos orgánicos volátiles por cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas en productos de extracción de constituyentes tóxicos (PECT) – Método de prueba.

**NMX-AA-037-SCFI-2006** Residuos líquidos - Determinación de inflamabilidad en copa cerrada – Método de prueba.

**NMX-AA-027-SCFI-2006** Residuos líquidos - Determinación de pH – Método de prueba.

**NMX-AA-013-SCFI-2006** Residuos sólidos - Determinación de pH – Método de prueba.

**NMX-R-019-SCFI-2011** Sistema armonizado de clasificación y comunicación de peligros de los productos químicos.

**NMX-AA-001-SCFI-2008** Residuos líquidos y/o soluciones acuosas - Corrosividad al acero al carbón.

**NMX-AA-020-SCFI-2008** Residuos - Determinación de compuestos orgánicos semivolátiles en producto de extracción de constituyentes tóxicos (PECT).

**NMX-AA-118-SCFI-2001** Registro de emisiones y transferencia de contaminantes, lista de sustancias e informe.

**NMX-AA-032-1976** Determinación de fósforo total en desechos sólidos (método fosfovanadomolibdato).

**NMX-AA-031-1976** Determinación de azufre en desechos sólidos.

### **Suelo**

**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.

**NMX-AA-132-SCFI-2006** Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.

**NMX-AA-091-1987** Calidad del suelo – Terminología.

**NMX-AA-080-1986** Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica.

**NMX-AA-068-1986** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica.

**NMX-AA-61-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos Sólidos municipales – Determinación de la generación.

**NMX-AA-094-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de fósforo total.

**NMX-AA-067-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de la relación carbono / nitrógeno.

**NMX-AA-052-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis.

**NMX-AA-033-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de Poder Calorífico Superior.

**NMX-AA-021-1984** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de materia orgánica.

**NMX-AA-022-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Selección y cuantificación de subproductos.

**NMX-AA-019-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Peso volumétrico "IN SITU". Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

**NMX-AA-015-1985** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

**NMX-AA-025-1984** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos - Determinación del pH - Método potenciométrico.

**NMX-AA-024-1984** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de nitrógeno total.

**NMX-AA-018-1984** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de cenizas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

**NMX-AA-016-1984** Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de humedad. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

Con este apartado de Normas Mexicanas se finaliza el tema de legislación aplicable a contaminación del suelo, siendo importante porque tanto la contaminación como rehabilitación del mismo, son temas de competencia ya sea federal, estatal o local y deberán estar sujetas a las disposiciones marcadas por la ley, informando en todo momento la presencia de contaminación ante la autoridad correspondiente, así como el plan para su rehabilitación; posterior a su aprobación, podrá ser ejecutado. (SCJN, 2006)

## **CAPÍTULO 4. CONTAMINACIÓN DE SUELOS**

### **4.1 Suelos contaminados en México**

Desde varios años atrás, la forma de disponer los residuos no estaba totalmente regulada, por lo que la práctica más común entre las industrias era su almacenamiento en fosas construidas a la intemperie sin ningún mecanismo de contención para su propagación. (CENAPRED, 1994)

Esta forma de disposición no era castigada, pues se pensaba que el material tóxico sería descompuesto por los microorganismos pobladores del sitio. La idea era correcta, sin embargo, no se consideró la capacidad degradadora de estos, así como las características que debe de poseer el suelo para efectuar tal proceso y los suelos no aptos quedaron contaminados. (CENAPRED, 1994)

En México se han encontrado sitios con importantes concentraciones de contaminantes, que incluso, no se degradan de forma natural y que debido a su propagación han afectado otros medios. (CENAPRED, 1994)

Es importante entender que la contaminación del suelo conlleva a la afectación de otros medios pues ésta también se propaga al agua subterránea por procesos de infiltración y al agua superficial por la escorrentía de la lluvia. (CENAPRED, 1994)

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través del Sistema Informático de Sitios Contaminados (SISCO), tiene registro de al menos 635 sitios altamente contaminados, siendo Veracruz la principal entidad afectada, donde en 2013 se contabilizaron 69 zonas, en Querétaro 58, Guanajuato 48, Colima 38, Edo. de México 36 y Michoacán 34, surgiendo así los pasivos ambientales, sitios con liberación de materiales o residuos peligrosos que no fueron remediados a partir de la dispersión de los contaminantes. (DGGIMAR/SEMARNAT, 2014)

En el periodo presidencial anterior, la SEMARNAT inició la restauración de siete pasivos ambientales considerados de mayor riesgo en el país, la *Figura 4.1* muestra la localización de estos. (DGGIMAR/SEMARNAT, 2014)

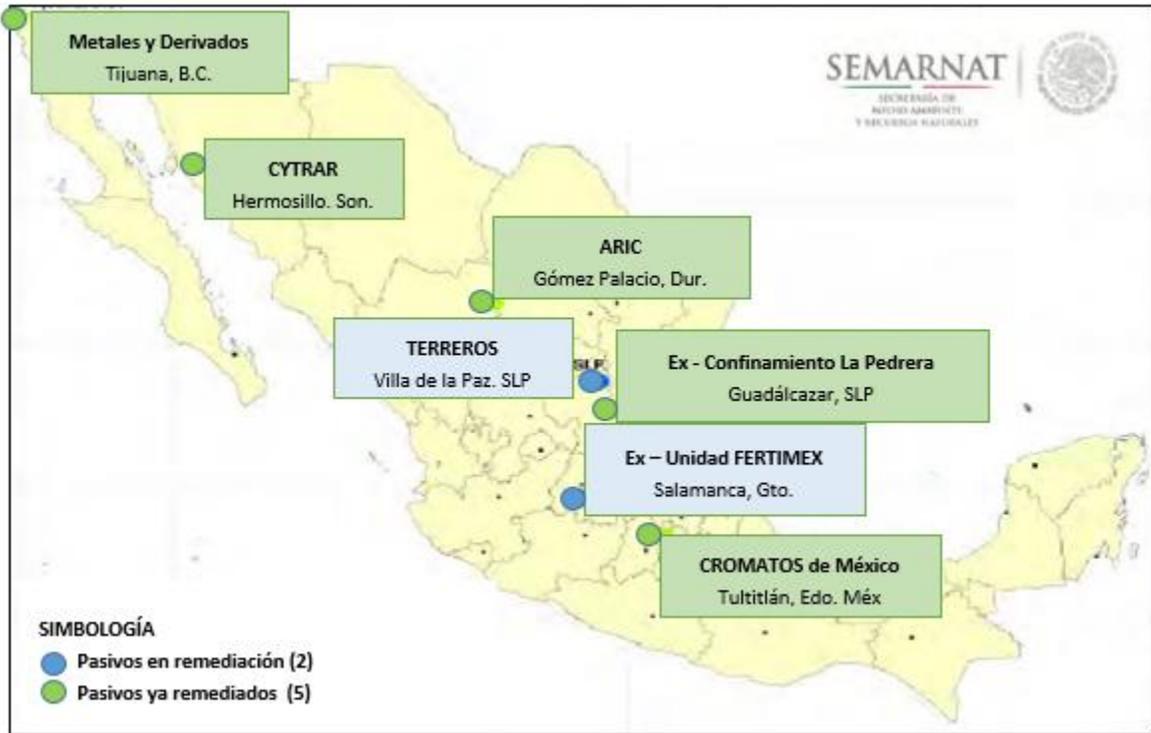


Figura 4.1. Pasivos ambientales en la República Mexicana.  
Fuente: (DGGIMAR/SEMARNAT, 2014)

Cada pasivo presenta distinto tipo de contaminación y causas diferentes de ella, a continuación un poco más acerca de cada uno: (DGGIMAR/SEMARNAT, 2009)

- **Ex - Fábrica “Metales y Derivados”** (Baja California): Esta fábrica se dedicaba al reciclaje de acumuladores (baterías), su contaminación se debe a residuos peligrosos y metales pesados, entre los que destacan: plomo, níquel, cadmio y zinc.
- **Ex – Confinamiento “CYTRAR”** (Sonora): En su operación hubo mal disposición de residuos, metales pesados, solventes, material biológico infeccioso, etc.
- **Asociación Rural de Interés Colectivo, ARIC** (Durango): La operación de una Planta de plaguicidas a cargo de la ARIC intervino en la contaminación de la comarca lagunera con plaguicidas y otros agroquímicos contaminantes.
- **Ex – Confinamiento “La Pedrera”** (San Luis Potosí): Operó como confinamiento provisional con actividades deficientes; entre los residuos que

almacenaba se encuentran lodos de pinturas, resinas polimerizadas, solventes, aceites, lodos de sulfato de calcio, residuos de ácido acético y lodos de salmuera. Entre los COV detectados, se encuentran pentano, hexano, isopropanol, benceno, tolueno, etc., además de metales pesados como arsénico, cromo y cadmio.

- **Ex – Fábrica CROMATOS de México** (Edo. De México): Su producción era de pigmentos y sustancias para curtir pieles a partir de un mineral con cromo, por lo que su contaminación se debe principalmente a cromo hexavalente.
- **TERREROS** (San Luis Potosí): Es una zona con actividades mineras, presenta contaminación por metales pesados como plomo, zinc y cobre, además de residuos propios de la actividad: jales y escorias de fundición.
- **Ex – Unidad FERTIMEX** (Guanajuato): Esta empresa se dedicaba a la producción de fertilizantes, por lo que su contaminación es con residuos de los mismos, insecticidas y desperdicios químicos. Tiempo después se instaló en este predio *Tekchem*, que con un derrame químico también dañó el suelo.

La baja tasa de restauración de los números sitios encontrados se debe a la falta de un responsable que se quiera hacer cargo de ella, pues como es de suponerse no resulta económica la descontaminación, sobre todo si el contaminante ya ha migrado a otras áreas de difícil acceso como los mantos acuíferos. Los problemas legales también son motivo de falta de responsable y por lo tanto, rehabilitación. (DGGIMAR/SEMARNAT, 2009)

En el período de 2011 a 2014 la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) registró más de 1 mil 100 pasivos ambientales, de los cuales informó que la mayoría fueron consecuencia de la industria de hidrocarburos. (DGGIMAR/SEMARNAT, 2014)

Actualmente, se están trabajando en 20 proyectos prioritarios de restauración, estos se muestran en la *Figura 4.2*. Entre los sitios destaca el que ocupó Química Central, empresa fabricante de productos químicos básicos que almacenó residuos peligrosos durante años sin las condiciones de seguridad necesarias y de acuerdo con la PROFEPA, acumuló 340,000 toneladas de desechos tóxicos en el interior de

la empresa, además de 40,000 Mg enterradas a un costado de la vía de ferrocarriles, a 1.5 km de la Planta. (DGGIMAR/SEMARNAT, 2014)



Figura 4.2. Sitios contaminados prioritarios en la República Mexicana.  
Fuente: (DGGIMAR/SEMARNAT, 2009)

Como se observa, el problema de la contaminación de suelos en el país, es grande, tanto por el número de sitios, nivel de contaminación, diversidad de contaminantes y sobre todo por el riesgo a la salud que representa. Por ello, es necesario encontrar técnicas adecuadas que permitan una rehabilitación eficaz y de cierto modo económica que posibilite la restauración de más sitios.

#### 4.2 Fuentes de contaminación

Los contaminantes del suelo provienen de las distintas actividades que se realizan día con día en todas las actividades económicas, sobre todo primarias y secundarias, dónde se hace más evidente el uso de productos químicos, sin embargo, el sector terciario también constituye una fuente de contaminación al ser un generador de residuos. Sin ir más afondo, todas las personas ya sea por las actividades productivas que desempeñan o por los servicios o productos que utilizan

en el día a día, manejan productos químicos y/o generan residuos contaminantes hacia el suelo, agua o aire. (Cortinas, 2002; CENAPRED, 1994)

Entre las actividades primarias que impactan en mayor medida la contaminación del suelo se encuentran: la agricultura con el uso de fertilizantes y plaguicidas; minera, con los lixiviados de los residuos procedentes de las extracciones y por último, la extracción de petróleo, por las liberaciones accidentales durante sus operaciones. (Cortinas, 2002; CENAPRED, 1994)

En el caso de las actividades secundarias, las cuales conllevan la transformación de la materia prima mediante distintos procesos de producción, formulación, almacenamiento, utilización y disposición final de sustancias químicas, éstas constituyen una fuente importante de contaminantes por el tipo y cantidad de productos que manejan, al igual que los desechos que generan. (Cortinas, 2002)

La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente PROFEPA (citado por Cortinas, 2002) clasifica en dos grupos las posibles fuentes de contaminación en sitios:

**Fuentes fijas:** Se refiere a establecimientos industriales, comerciales y de servicios, tiraderos de basura y lugares donde se abandonan clandestinamente residuos peligrosos.

**Fuentes móviles:** Involucra el transporte de materiales o residuos peligrosos tanto en ductos como por carretera.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED (1994) presenta como principales causas de contaminación de sitios, las siguientes:

- Accidentes durante la operación de los procesos industriales que involucran sustancias químicas
- Fugas de materiales peligrosos en tanques, contenedores subterráneos, tuberías y ductos.
- Lixiviación de residuos peligrosos en sitios de almacenamiento y en sitios donde se desarrollan actividades de manejo de residuos peligrosos.
- Derrames accidentales de sustancias químicas por accidentes de transporte.

- Descarga de aguas residuales que no cumplen con la regulación ambiental.
- Disposición inadecuada de residuos peligrosos en terrenos baldíos, bodegas, almacenes, instalaciones industriales y sitios de disposición final.

El CENAPRED (1994), al igual que Cortinas (2002), también lista los principales contaminantes involucrados en la contaminación de los sitios y las actividades que los generan:

- **Hidrocarburos o productos derivados del petróleo:** Están presentes en sitios donde se realizan o realizaron actividades vinculadas a la producción petrolera.
- **Metales** (Pb, Cd, Hg, As): En sitios con procesos mineros, los cuales generan residuos propios de la actividad como jales, escorias de fundición, polvos y cenizas.
- **Plaguicidas:** Acumulados en el suelo por actividades agrícolas o de producción de tal producto.
- **Hidrocarburos halogenados:** En sitios industriales en los que se manejaron solventes y desengrasantes.

Dentro de los hidrocarburos halogenados se encuentran los llamados compuestos orgánicos volátiles (COV), estos son utilizados en diferentes industrias, como la de barnices, pinturas, calzado, siderúrgica, de madera, cosmética, farmacéutica y de limpieza en seco, entre otras; todas ellas emplean estos compuestos como barniz, disolvente, pegamento y en el caso de la industria cosmética como dispersante, por lo que su frecuencia de aparición en sitios contaminados es importante. (Mercado, 2006)

La Mesa Redonda Federal de Tecnologías para Rehabilitación (FRTR, por sus siglas en inglés) lista los principales COV halogenados encontrados en los sitios contaminados, estos se exhiben en la *Tabla 4.1*.

Tabla 4.1. Compuestos orgánicos volátiles halogenados principalmente encontrados en los sitios contaminados.

Compuesto	Compuesto
1,1,1,2-Tetracloroetano	Cloroformo
1,1,1-Tricloroetano	Dibromocloropropano
1,2-Dicloroetano	Fluortriclorometano (Freón 11)
1,2,2-Trifluoroetano (Freón 113)	Pentacloroetano
1,2-Dicloropropano	Monoclorobenceno
1-Cloro-2-propeno	Tetracloruro de carbono
Bromodiclorometano	Cloruro de vinilo

Fuente: (FRTR, 2007)

Como se observa, entre los compuestos listados se encuentra el 1,2-Dicloroetano (1,2-DCA), el cual sirve como materia prima en la producción de cloruro de vinilo (PVC), este último con una elevada manufactura al ser utilizado para elaborar productos plásticos, artículos para el hogar y partes para automóviles. (ASTDR, 2016; ERCROS, 2012)

Otras de las aplicaciones del 1,2-DCA son como solvente, aditivo en la gasolina con plomo para remover el plomo y como disolvente en algunas reacciones específicas de la industria farmacéutica. Históricamente estuvo presente en muchos otros procesos industriales, sin embargo, éstos han sido modificados o reemplazados por aquellos que no requieran del manejo de esta sustancia al ser ésta un contaminante potencial. (ASTDR, 2016; ERCROS, 2012)

Por lo anterior, se toma como caso de estudio la contaminación debida a este producto y los capítulos siguientes se enfocan a encontrar las tecnologías para restauración de sitios contaminados con 1,2-DCA acorde a las características de éste y el sitio.

## **CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: SITIO CONTAMINADO CON 1,2-DICLOROETANO**

### **5.1 Caso de estudio**

El siguiente caso de estudio representa un ejercicio académico de contaminación del suelo por 1,2-dicloroetano con el propósito de discutir la tecnología más adecuada para la restauración del sitio, los detalles se presentan en los siguientes apartados.

Durante las actividades de reconocimiento de un predio en el que se pretendía la construcción de una Planta industrial se hallaron fosas que contenían totes (contenedores cúbicos con capacidad de 1 m<sup>3</sup>) con residuos químicos, los análisis de laboratorio mostraron que éstos eran compuestos orgánicos volátiles y en su mayoría se encontraba el 1,2-dicloroetano (1,2-DCA).

Las investigaciones indican que años atrás se instaló en las cercanías del predio una Planta que manejaba 1,2-DCA en su proceso, por lo que se deduce que la disposición de sus residuos se dio en estas fosas, práctica muy común entre las antiguas industrias.

Durante la primer fase de estudio se encontró una fosa con una longitud aproximada de cinco por cinco metros y una profundidad de cuatro metros, la cual contenía 100 contenedores IBC (equivalente a 100 m<sup>3</sup>) que se presume contenían los residuos químicos, ya que durante las actividades de muestreo no todos los contenedores estaban llenos, además de presentar fisuras indicando derrames durante el tiempo que permanecieron ahí. Adicionalmente, el material de relleno para cubrir la fosa también presentó contaminación por 1,2-DCA, indicando que el contaminante había salido de los totes.

Durante una segunda fase de muestreo se realizaron perforaciones al suelo para conocer la magnitud de la migración del contaminante, en ella se encontró que debido a la cantidad y tiempo transcurrido, el 1,2 DCA había avanzado tanto

horizontal como verticalmente en las áreas aledañas a la fosa, contaminando también al acuífero presente debajo del predio y con ello el agua subterránea.

De esta manera, se aborda este caso para discutir la tecnología más apropiada para disminuir la concentración del contaminante hasta los niveles que marque la autoridad correspondiente. Para ello, como primer etapa se procede a conocer las condiciones bajo las que se encuentra el predio en cuestión.

## **5.2 Características del sitio contaminado**

### **5.2.1 Clima regional**

El predio contaminado se encuentra en el estado de Colima, aquí, el 86% del territorio posee un clima cálido subhúmedo, 12.5% un clima seco y semi-seco y 1.5% un clima templado subhúmedo, este último en las faldas del volcán de Colima debido al descenso de temperatura. También se conoce que la temperatura media anual es alrededor de 25°C con una máxima de 30°C y una mínima de 18°C. (INEGI, 2015)

Respecto a las lluvias, éstas se presentan generalmente durante el verano (junio, julio y agosto) con aproximadamente una precipitación total anual de 900 mm. (INEGI, 2015)

### **5.2.2 Estratigrafía del sitio**

En términos generales, los primeros ocho metros del subsuelo consisten en una mezcla de arcillas y arenas con horizontes intercalados de arcillas arenosas, arcillas, arcillas limosas y arenas limosas. Los suelos presentes se consideran como suelos residuales formados a partir de rocas volcanoclásticas. (SGM, 2009)

Siguiendo con el perfil, de los 8 hacia los 14 metros de profundidad ocurre una unidad de roca basáltica, esta unidad está constituida principalmente por un basalto vesicular con horizontes de basalto fracturado. (SGM, 2009)

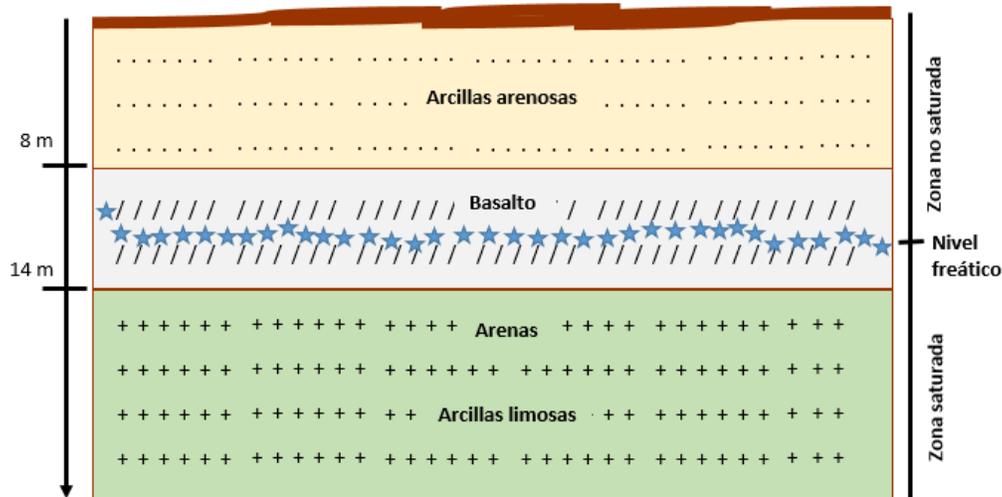
Debajo de la unidad de basaltos, con profundidad mayor a 14 metros, se encontró una secuencia de estratos alternantes de arenas francas y arcillas limosas, estos

suelos también presentan texturas que evidencian un origen volcanoclástico. (SGM, 2009)

La estratigrafía se puede generalizar de la siguiente manera, de la unidad más somera a la más profunda:

- **0 a 8 metros:** Arcillas arenosas y limos de media a baja compactación
- **8 a 14 metros:** Basalto fracturado (más o menos vesicular)
- **> 14 metros:** Arenas y arcillas limosas (de origen volcanoclástico)

Una representación gráfica de la estratigrafía se observa en la *Figura 5.1*.



*Figura 5.1.* Estratigrafía del sitio contaminado. Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3 Hidrología del sitio

Como se ejemplifica en la *Figura 5.1*, el nivel freático del agua subterránea varía entre los 9 y 12 metros debajo de la superficie, dentro de la unidad de basaltos. La presencia de agua subterránea se ve limitada hasta los 17 metros, donde se encuentra la unidad de arenas limosas. Por otra parte, también se encontró que la dirección de flujo del agua subterránea va desde la región Oeste hasta la Este. (SGM, 2009)

Respecto a la conductividad hidráulica ( $k$ ), ésta se estimó entre  $7.6 \times 10^{-4}$  y  $8.3 \times 10^{-4}$  cm/s, representando una permeabilidad baja. Los estudios deducen la presencia de

un acuitardo libre, es decir una formación geológica que puede almacenar gran cantidad de agua pero debido a su baja permeabilidad la transmitirá lentamente. Otra característica de este acuitardo es que se encuentra a presión atmosférica debido a que su superficie se encuentra en contacto directo con el nivel freático y zona no saturada. (SGM, 2009)

#### **5.2.4 Distribución del 1,2-DCA en el subsuelo**

En general, la detección de 1,2-DCA se apreció en la unidad de arcillas y basalto, las concentraciones más altas (9.3 mg/L) fueron encontradas entre los 5 y 12 metros de profundidad. Para niveles más profundos a 18 metros las concentraciones estuvieron por debajo del nivel de detección.

Respecto a la afectación horizontal, el radio con presencia de contaminante resultó de 15 metros alrededor de la fosa sin olvidar que en las siguientes fases de estudio es probable encontrar más fosas de este tipo.

#### **5.2.5 Distribución del contaminante en el agua subterránea**

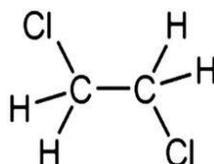
Los diversos puntos de muestreo instalados para el agua subterránea también evidenciaron contaminación por 1,2-DCA en las distintas profundidades del acuitardo y desde la región Oeste a la Este, mostrando una disminución gradual pero no controlada.

### **5.3 Características del contaminante**

#### **5.3.1 Propiedades físicas y químicas del 1,2-Dicloroetano**

El 1,2-Dicloroetano (1,2-DCA) pertenece al grupo denominado Compuestos Orgánicos Volátiles COV, el cual se caracteriza por tener una estructura hidrocarbonada, generalmente menor a 12 átomos de carbono, acompañada de elementos como oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Este tipo de sustancias, se distingue de las demás por convertirse fácilmente en vapor a temperatura y presión ambiente, además de poseer presión de vapor mayor a 1 mmHg y constante de Henry superior a  $10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup>/mol. (Mercado, 2006)

El 1,2-DCA, también llamado dicloruro de etileno, posee, como su nombre lo indica, dos átomos de cloro y dos carbono, estos últimos unidos por un enlace sencillo (ver *Figura 5.2*). Físicamente se encuentra como un líquido incoloro con olor dulce agradable a temperatura ambiente. (ASTDR, 2016; ERCROS, 2012)



*Figura 5.2.* Estructura del 1,2-Dicloroetano. Fuente: (Merck Millipore, 2015)

Las propiedades de este compuesto, se recopilan en la *Tabla 5.1*, con la finalidad de conocer sus características y comportamiento esperado en el ambiente.

*Tabla 5.1.* Propiedades físicas y químicas del 1,2-Dicloroetano

Propiedad	Descripción
<b>Fórmula</b>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>
<b>Peso molecular</b>	98.96 g/mol
<b>Aspecto</b>	Incoloro, líquido
<b>Olor</b>	Sin datos disponibles
<b>pH</b>	Sin datos disponibles
<b>Punto de fusión</b>	-35 °C
<b>Punto de ebullición</b>	84°C a 1.013 hPa
<b>Punto de inflamación</b>	13.0 °C –copa cerrada
<b>Presión de vapor</b>	33.3 hPa (25.0 mmHg) a 0 °C 86.0 hPa (65.0 mmHg) a 20 °C 312 hPa (234 mmHg) a 50 °C
<b>Densidad relativa</b>	1.23 g/ ml
<b>Densidad a 20°C</b>	1.25 g/ml
<b>Solubilidad en agua</b>	8.69 g/L a 20°C –ligeramente soluble
<b>Viscosidad</b>	Sin datos disponibles
<b>Log(K<sub>ow</sub>)</b>	1.5
<b>K<sub>H</sub> (atm·m<sup>3</sup>/mol)</b>	0.00091

Fuente: (SIGMA-ALDRICH, 2015)

### 5.3.2 Efectos sobre la salud

La principal vía de afectación por 1,2-DCA se da por inhalación, esto debido a que emite vapores a temperatura ambiente, sin embargo también puede ser ingerido en fase líquida o absorbido por vía cutánea, afectando membranas mucosas y conjuntivas oculares cuando hay contacto con él. (Mercado, 2006)

Respirar o ingerir altos niveles de 1,2-DCA puede producir daños al sistema nervioso, el hígado, riñones y pulmones. (ASTDR, 2016)

En animales de laboratorio, respirar o ingerir grandes cantidades de 1,2-dicloroetano también ha causado desordenes del sistema nervioso y efectos en el hígado, riñón y el pulmón, los estudios no evidencian afectación en la reproducción. (ASTDR, 2016)

Respecto a los estudios sobre cáncer, el Departamento de Salud y Servicios Humanos DHHS (por sus siglas en inglés) ha determinado que es razonable predecir que el 1,2-DCA produce cáncer. (ASTDR, 2016)

### 5.3.3 Contaminación por 1,2-Dicloroetano

Este compuesto, como contaminante, se ha encontrado en por lo menos 570 de los 1585 sitios de la lista de prioridades nacionales identificados por la Agencia de Protección Ambiental EPA (por sus siglas en inglés) por lo que es catalogado como un contaminante de preocupación, pudiendo estar presente en el aire, agua y suelo: (ASTDR, 2016)

**Aire:** En este medio es donde generalmente se encuentra debido a su volatilidad. El 1,2-DCA se degrada al reaccionar con otros compuestos y la luz solar, sin embargo, puede permanecer en el aire por más de 5 meses antes de ser degradado.

**Agua:** El 1,2-DCA también puede ser liberado a ríos o lagos, en este medio se degrada muy lentamente y la mayor parte se evapora al aire.

**Suelo:** El 1,2-DCA liberando en el suelo presenta dos posibles vías a contaminar, se puede evaporar y/o infiltrar, y de esta manera, pasar al agua subterránea.

#### 5.4 Comportamiento del contaminante en el sitio

En esta sección se describe la interacción del 1,2-dicloroetano con el medio poroso del subsuelo a fin de conocer las zonas impactadas y su comportamiento, sirviendo como base para la selección de la tecnología que pueda removerlo.

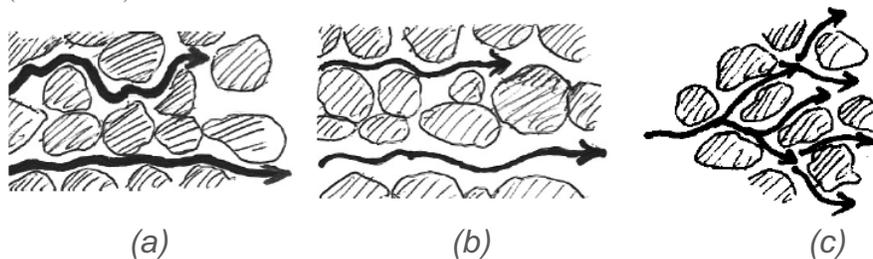
Dado a que el 1,2-Dicloroetano presenta una presión de vapor relativamente alta, con un valor de 65 mmHg (volátil), elevada constante de Henry: 0.00091 (atm\*m<sup>3</sup>/mol), una solubilidad de 8.69 g/L, es una molécula polar (ligeramente soluble en agua) y es clasificado como un líquido en fase no acuosa más denso que el agua, DNAPL (por sus siglas en inglés) con una densidad relativa de 1.25 g/mL es probable encontrarlo en cuatro distintas fases conforme avanza dentro del perfil del terreno. A continuación se describen tales fases y zonas del suelo susceptibles de albergarlas. (Conde, 2010; Velasco & Volke, 2002)

- **Fase gas:** Presente en la zona no saturada aunque también en la región de la franja capilar. Al ser el 1,2 DCA un compuesto volátil, esta fase es muy propensa a estar presente.
- **Fase sólida:** Cuando el contaminante es adsorbido sobre las partículas del suelo en la zona no saturada, franja capilar y saturada.
- **Fase acuosa:** Debido a la solubilidad del 1,2-DCA en el agua, se encuentra presente sobre todo en la zona saturada aunque también en la zona no saturada y franja capilar debido al agua intersticial presente; hay que resaltar que por la elevada constante de Henry del 1,2-DCA, parte del compuesto disuelto tiende a pasar a la fase vapor.
- **Fase inmiscible:** Comúnmente conocida como fase líquida no acuosa (NAPL por sus siglas en inglés), se encuentra principalmente en la zona saturada aunque también como contaminante residual en la zona no saturada y franja capilar.

Los principales mecanismos de movilidad del contaminante en el suelo son tres: difusión, dispersión y advección, describiendo cada uno a continuación. (UNAD Colombia, 2010; Sánchez, 2008; Oyarzún, 2007)

**Difusión molecular:** Mecanismo de transporte mediante el cual un contaminante se mezcla con un fluido para tender a la homogeneización de la concentración. Es un proceso que no depende directamente del movimiento del fluido, sino del movimiento aleatorio y fortuito de las moléculas; la movilidad de los contaminantes va de las zonas de mayor a menor concentración, tanto de la fase vapor como líquida. Su efecto es despreciable en presencia de un gran flujo de agua subterránea.

**Dispersión mecánica:** Este mecanismo de transporte se debe al movimiento del fluido a través de los caminos tortuosos del medio poroso, provocando una mezcla. Se distinguen dos tipos, la longitudinal y la transversal, la primera se produce por líneas de flujo horizontales y la segunda, por la bifurcación de los caminos que encuentra el fluido. Este proceso se esquematiza en la *Figura 5.3*



*Figura 5.3.* (a) y (b) Dispersión longitudinal, (c) Dispersión transversal.

Fuente: (Oyarzún, 2007)

**Dispersión hidrodinámica:** Se refiere a la acción conjunta de la difusión y la dispersión mecánica, dado que los dos fenómenos suceden simultáneamente.

**Advección:** Se debe a la migración del contaminante por movimiento de un fluido que sirve como medio de transporte, ya sea aire o agua; moviéndose a la velocidad promedio del fluido siempre y cuando no se produzca algún proceso de retardo. Generalmente este es el mecanismo de transporte más importante debido a la rapidez con la que sucede en comparación con los demás mecanismos de transporte.

Es importante conocer que además de estos mecanismos, existen procesos secundarios que facilitan o dificultan la movilidad del contaminante debido a la

interacción de éste con el medio geológico, siendo los principales procesos la adsorción, intercambio iónico y biodegradación, los cuales se describen a continuación. (Custodio & Llamas, 1976; Pulido , 2007; Conde, 2010)

**Adsorción:** Proceso por el cual quedan adheridas moléculas del contaminante sobre el terreno (generalmente sobre materia orgánica y minerales arcillosos). Dado que las fuerzas por las que quedan adheridas son débiles, más tarde las partículas del contaminante son de nuevo integradas al fluido para seguir con su trayectoria.

**Intercambio iónico:** Fenómeno en el que un ion proveniente del contaminante desplaza a otro que se encontraba adherido al material arcilloso u orgánico del suelo.

**Reacción:** Durante el paso del contaminante a través del material litológico puede reaccionar con partículas propias del suelo y formar nuevos compuestos, por lo que se consume y la concentración del contaminante es disminuida, sin embargo, debe tomarse en cuenta la toxicidad del nuevo producto.

Dentro de las reacciones propensas a ocurrir se encuentra la atenuación, proceso que se refiere a la degradación natural de los contaminantes debido a la descomposición de las sustancias tóxicas por acción de microorganismos naturales, (levaduras, hongos o bacterias) transformándolas en sustancias menos tóxicas o inocuas, principalmente dióxido de carbono y agua en el caso de la biodegradación aerobia.

Así, una vez conocidas las posibles formas de 1,2-DCA presentes en el terreno y los mecanismos por el cual se transporta en éste, se procede a describir la movilidad del contaminante desde que es derramado o vertido en el suelo hasta que llega a los niveles más profundos e impermeables de la estratigrafía, pasando gradualmente por las zonas no saturada, franja capilar y saturada.

### **Zona no saturada**

Observando la *Figura 5.1*, esta zona se encuentra conformada principalmente por arcillas arenosas, aportando a esta región tanto microporos por parte de las arcillas

como macroporos por parte de la fracción arenosa, permitiendo infiltraciones al subsuelo pero también retención de la fase acuosa en sus microporos. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

En esta zona se hacen evidentes los mecanismos de transporte por difusión molecular de la fase gaseosa y dispersión de la fase acuosa. En primera estancia, el 1,2-DCA líquido es volatilizado conforme avanza dentro del perfil, generando así la fase vapor que posteriormente es difundida entre las porosidades, tanto horizontal como verticalmente; a la par, el líquido remanente migra verticalmente hacia abajo por dispersión, interviniendo factores como la gravedad, capilaridad, humedad y filtraciones de agua proveniente de la lluvia, sin embargo, como ya se había mencionado, también una parte es retenida por efecto de los microporos. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

Durante el paso del contaminante hacia las regiones más profundas también se desarrollan otros fenómenos de importancia como la adsorción, intercambio iónico y biodegradación. La adsorción es muy probable que se efectúe debido a que las arcillas presentes en esta zona son un excelente medio para que el contaminante se adhiera a ellas; respecto al intercambio iónico es propenso a establecerse el catiónico, dada la carga negativa de los iones cloro de la molécula del 1,2-DCA; referente a la biodegradación, se sabe que es poco eficaz para disolventes clorados, sin embargo se ha encontrado que compuestos de este tipo (que contienen hasta 4 átomos de carbono) se degradan bajo condiciones aeróbicas, la cual es más susceptible de suceder en las zonas superficiales debido al oxígeno necesario. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

Conforme el contaminante avanza dentro del perfil, genera una contaminación residual, ya que una parte de su masa queda retenida en la matriz del suelo a causa de las fuerzas capilares propias del medio poroso y la adsorción misma. De esta manera, el contaminante va disminuyendo cada vez más su concentración a lo largo de su trayectoria y puede quedar contenido en la zona saturada, sin embargo, dado que se mencionó que el contaminante llegó hasta el acuífero, se deduce que la

cantidad de 1,2-DCA liberada fue grande al igual que el tiempo transcurrido desde entonces. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

### **Franja capilar**

La franja capilar se encuentra dentro de la unidad de basaltos (ver *Figura 5.1*), aunque propiamente está dentro de la zona no saturada, se considera aparte debido a la frecuente presencia de agua en estado líquido en los poros (por ascenso capilar desde el nivel freático), la cual permite otro tipo de transporte del contaminante. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

Una vez que el 1,2-DCA ha llegado hasta la franja capilar, una parte de él se solubiliza con el agua del medio y se transporta principalmente por dispersión; mientras que el contaminante no solubilizado, debido a sus propiedades de DNAPL, tiende a hundirse, atravesando el nivel freático. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

Durante el trayecto del 1,2-DCA hacia las profundidades del medio litológico, éste es susceptible de seguir experimentando biodegradación, aunque en menor medida debido a la escasez de oxígeno necesario para la transformación. Otro proceso capaz de llevarse a cabo es la volatilización del 1,2-DCA solubilizado, con lo cual los vapores desprendidos pueden ser transportados nuevamente a la zona vadosa y ser degradados en las regiones superficiales. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

### **Zona saturada**

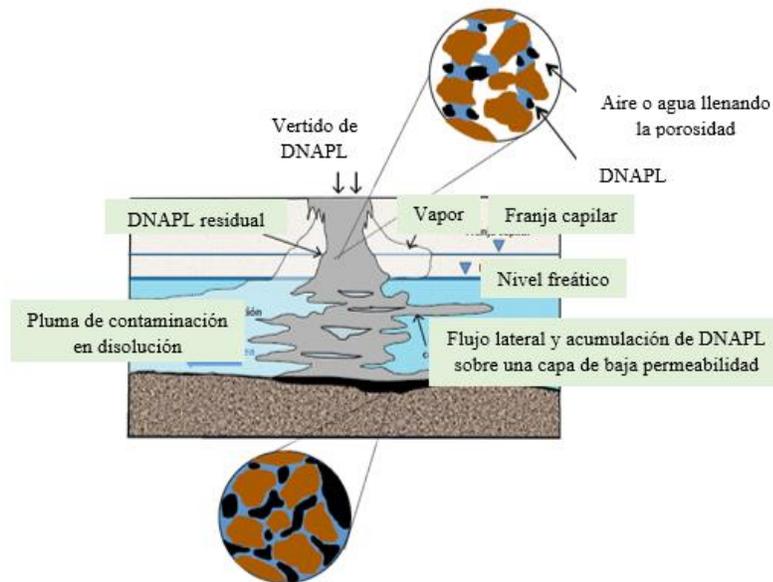
Por la *Figura 5.1*, esta región se encuentra comprendida por las unidades litológicas de basalto, arena y arcillas limosas, en donde el agua subterránea se encuentra fluyendo y saturando por completo los poros y/o fisuras del medio. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

El agua característica de esta zona contribuye a que el principal mecanismo de transporte sea la advección aunque también se lleva a cabo la dispersión. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

Cuando por el transporte vertical, la fase acuosa y la fase inmisible llegan a esta zona, la fase acuosa se moviliza junto con la corriente de agua migrando horizontalmente por advección, mientras que la fase no acuosa (NAPL) se hunde hasta llegar a la capa de arcillas limosas que se comporta como impermeable, una vez que se asienta puede seguirse solubilizando lentamente y ser transportado por el agua subterránea en movimiento o seguir volatilizándose aunque en menor proporción. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

Finalmente, en esta zona también es probable que se desarrollen los procesos de adsorción e intercambio catiónico debido a la presencia de arcillas. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)

La *Figura 5.4*, esquematiza de manera general la pluma de contaminación descrita en los párrafos anteriores, siendo resultado del paso del contaminante a través del medio poroso. (ARC, 2012; Custodio & Llamas, 1976; Conde, 2010)



*Figura 5.4.* Pluma de contaminación generada por el 1,2-Dicloroetano.

Fuente: (ARC, 2012)

En resumen, la pluma de contaminación generada por el 1,2-DCA es dependiente de los mecanismos de transporte desarrollados en las distintas zonas del suelo, siendo más extensa vertical que horizontalmente. La lenta difusión, solubilidad

limitada y baja velocidad del agua subterránea contribuyen a su poca expansión horizontal mientras que su alta densidad favorece su migración vertical hacia abajo.

## **CAPÍTULO 6. TECNOLOGÍAS PARA LA REHABILITACIÓN PARA DE UN SITIO CONTAMINADO CON 1,2-DICLOROETANO**

En este capítulo se presentan las tecnologías de restauración más adecuadas para el tratamiento del sitio contaminado con 1,2-Dicloroetano presentado en el caso de estudio, esto, teniendo en consideración dos factores: 1) Matriz para la selección de tecnologías de tratamiento publicada por la Mesa Redonda Federal de Tecnologías para Rehabilitación (FRTR, por sus siglas en inglés) y 2) condiciones del sitio afectado y características del contaminante.

### **6.1 Matriz para la selección de tecnologías de tratamiento publicada por la FRTR**

Para la selección de tecnologías de rehabilitación de sitios contaminados, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) a través de su Mesa Redonda Federal de Tecnologías para Rehabilitación, facilita la matriz que se muestra en la *Tabla 6.1*, la cual toma en cuenta tipo de contaminante, factores de costos, tiempo de restauración, estatus de desarrollo, confiabilidad y disponibilidad de la tecnología (ver *Tabla 6.2*).

Es importante mencionar que la matriz presentada no es como tal la que se muestra en la página de la FRTR, ya que fue adaptada al idioma español y llenada de forma cuantitativa en lugar de cualitativa, sin modificar el significado de la información contenida, la matriz original se puede encontrar en el anexo I.

Como se puede observar en la *Tabla 6.1*, la matriz de selección de tecnologías diferencia dos medios a rehabilitar: 1) Suelo, sedimento y lodos y 2) Agua subterránea y agua superficial. Dado que en el caso de estudio tanto el suelo como agua subterránea han sido contaminados, se utilizaron ambos apartados para encontrar los procesos susceptibles para rehabilitar el sitio.

En cuanto a los factores que la FRTR toma en cuenta para calificar los procesos de restauración más aptos según el tipo de contaminante, estos se encuentran en la *Tabla 6.2*, teniendo un rango de calificación de 0 a 1, significando 0 un factor debajo del promedio, 0.5, promedio y 1, sobre el promedio; también se encuentran

calificaciones como \*, significando un factor de efectividad altamente dependiente del contaminante, N/A, no aplica e I/D, datos insuficientes. (De igual forma, esta Tabla ha sido adaptada al idioma español y la original se encuentra como anexo I)

*Tabla 6.1.* Matriz para la selección de tecnologías de rehabilitación (adapatada)

Fuente: (FRTR, 2007)

	Estatus de desarrollo	Tren de tratamiento	Costo relativo total & Desempeño						Disponibilidad	COV no halogenados	COV halogenados	Compuestos orgánicos semi-volátiles no halogenados	Compuestos orgánicos semi-volátiles halogenados	Combustibles	Compuestos inorgánicos	Radionucleidos	Explosivos
			Operación & Mantenimiento	Capital	Confiabilidad del sistema y mantenimiento	Costos relativos	Tiempo										
<b>SUELO, SEDIMENTO, CAMA DE ROCAS Y LODOS</b>																	
<b>3.1 Tratamiento Biológico in-situ</b>																	
Bioventeo	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	*	1	0	1	0	*	0
Biorremediación mejorada	1	1	0	0.5	0.5	1	0.5	1	1	1	1	*	1	*	*	1	
Fitorremediación	1	1	1	1	0	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	*	0.5	0.5	0	0	
<b>3.2 Tratamiento Físico/Químico in-situ</b>																	
Oxidación química	1	1	0	0.5	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5	0	0.5	0	*	0	0.5	
Separación electrocinética	1	0	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	1	0.5	0	
Fracturamiento	1	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	
Enjuague de suelos	1	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5	1	0	0	
Extracción de vapores del suelo	1	0	0	0.5	1	1	0.5	1	1	1	0	0	1	0	0	0	
Solidificación/Estabilización	1	1	0.5	0	1	1	1	1	0	0	0.5	0.5	0	1	1	0	
<b>3.3 Tratamiento térmico in-situ</b>																	
Tratamiento térmico	1	0	0	0	1	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
<b>3.4 Tratamiento Biológico Ex-situ (asumiendo excavación)</b>																	
Biopilas	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.5	*	1	*	0	0	
Composteo	1	1	1	1	1	1	0.5	1	0.5	0.5	0.5	*	1	0	0	1	
Labranza	1	1	1	1	1	1	0.5	1	0.5	0.5	1	0.5	1	0	0	*	
Tratamiento biológico fase lodo	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1	1	*	1	*	0	1	
<b>3.5 Tratamiento Físico/Químico Ex-situ (asumiendo excavación)</b>																	
Extracción química	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.5	1	1	0.5	1	0.5	0	
Oxidación/Reducción Química	1	0.5	0.5	0	1	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0	0.5	
Deshalogenación	1	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0	1	0	1	0	0	0	0.5	
Separación	1	0.5	0	0.5	1	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0	0	
Lavado de suelos	1	0	0	0	1	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	
Solidificación/Estabilización	1	1	0.5	0	1	1	1	1	0	0	0.5	0.5	0	1	1	0	
<b>3.6 Tratamiento térmico Ex-situ (asumiendo excavación)</b>																	
Descontaminación con gas caliente	0	1	0	0	1	1	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
Incineración	1	1	0	0	0.5	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	
Combustión al aire libre/Defonación al aire libre	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
Pirolisis	1	1	0	0	0	0	1	1	0.5	0.5	1	1	0.5	0	0	0	
Desorción térmica	1	1	0	0	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	
<b>3.7 Contención</b>																	
Relleno sanitario	1	1	0.5	0	1	1	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	
Relleno sanitario alternativo/mejorado	1	1	0.5	0	1	1	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	
<b>3.8 Otros tratamientos</b>																	
Excavación, Recuperación, Disposición fuera del sitio	1	1	1	1	1	*	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	
<b>AGUA SUBTERRÁNEA, AGUA SUPERFICIAL Y LIXIVIADOS</b>																	
<b>3.9 Tratamiento Biológico in-situ</b>																	
Biorremediación mejorada	1	1	0	0.5	0.5	1	*	1	1	*	1	*	1	*	0	0.5	
Atenuación natural monitoreada	1	1	0	0.5	0.5	1	*	1	1	0.5	0.5	0.5	1	0	0	0	
Fitorremediación	1	1	1	1	0	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	*	0	0	
<b>3.10 Tratamiento físico/químico in-situ</b>																	
Inyección de aire	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0	0	
Biolodos	1	0.5	1	1	0.5	1	0.5	1	0.5	0.5	1	1	1	0.5	0	0	
Oxidación química	1	1	0	0.5	0.5	0.5	1	1	0.5	0.5	0	0.5	0	*	0	0.5	
Pozos direccionales (mejorados)	1	1	0.5	0	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Extracción de dos fases	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
Tratamiento térmico	1	0	0	0	0.5	0.5	1	1	0.5	1	1	1	1	0	0	0	
Fractura hidráulica mejorada	1	0.5	1	1	1	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0.5	
Desorción en pozo	1	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	1	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0	0	0	
Barreras reactivas permeables	1	1	0.5	0	1	0.5	0	1	1	1	1	1	0.5	*	0	1	
<b>3.11 Tratamiento Biológico Ex-situ</b>																	
Bioreactores	1	1	0.5	0	0.5	1	0.5	1	1	1	1	*	1	0	0	1	
Humedales	1	1	0.5	0	*	0.5	*	0	0.5	0.5	0.5	*	0.5	1	0	1	
<b>3.12 Tratamiento Físico/Químico Ex-situ (asumiendo bombeo)</b>																	
Adsorción/Absorción	1	1	0	0.5	0.5	0	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	1	*	0	
Proceso de oxidación avanzada	1	0.5	0	0	0.5	0.5	0	1	1	1	1	1	1	*	*	1	
Extracción/Separación con aire (Air Stripping)	1	0.5	0	0.5	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
Carbón activado granulado/Adsorción con carbón fase líquida	1	0.5	0	0.5	1	0.5	0	1	1	1	1	1	1	*	0	*	
Bombeo de agua subterránea/Bombeo y tratamiento	1	0.5	0	0	1	0	0	1	0.5	0.5	0.5	*	0.5	0.5	0	0.5	
Intercambio iónico	1	0.5	0	0	1	0.5	0	1	0	0	0	0	0	1	0.5	0	
Precipitación/Coagulación/Floculación	1	0.5	0.5	0	1	0.5	0	1	0	0	0	0	0	1	0.5	0	
Separación	1	0.5	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	*	*	0	
Irrigación con aspersores	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	
<b>3.13 Contención</b>																	
Barreras físicas	1	1	0.5	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Inyección en pozo profundo	1	1	1	1	0.5	1	0	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
<b>3.14 Emisiones de aire/Tratamiento del gas efluente</b>																	
Biofiltración	1	N/A	1	1	*	1	1	0	1	*	*	*	1	0	I/D	*	
Dstrucción con alta energía	0	N/A	I/D	I/D	0	0.5	I/D	0.5	1	1	1	1	1	1	0.5	I/D	
Separación por membrana	0	N/A	I/D	I/D	0	0.5	I/D	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5	0	I/D	0.5	
Oxidación	1	N/A	1	1	1	1	I/D	1	1	1	1	1	1	0	I/D	0.5	
Torre de absorción empacada	1	N/A	0.5	0	1	1	I/D	1	0	0	0	0	0	1	I/D	I/D	
Adsorción con carbón	1	N/A	1	1	1	1	I/D	1	1	1	1	1	1	0.5	I/D	1	

*Tabla 6.2.* Factores que evalúa la FRTR para la selección de tecnologías de rehabilitación

Fuente: (FRTR, 2007)

Factores		1 = Sobre el promedio	0.5 = Promedio	0 = Debajo del promedio	Otros
<b>Estatus de desarrollo</b> Estatus de escalamiento de la tecnología		Implementado como parte de la remediación final en múltiples sitios, bien documentados y entendidos	Ha sido implementada a gran escala pero aún necesita mejoras, pruebas	No ha sido implementada completamente pero ha sido probada (prueba piloto, escala laboratorio) y es prometedora	* Nivel de efectividad altamente dependiente del contaminante y su aplicación/diseño  N/A "No aplica"  I/D "Datos insuficientes"
<b>Tren de tratamiento</b> ¿La tecnología es sólo efectiva como parte de tren de tratamiento?		Tecnología autónoma (no compleja en términos de tecnologías de tratamiento, posible adición de una tecnología de "rutina")	Relativamente simple (tren de tratamiento de dos etapas), bien entendido, aplicado	Complejo (uso de muchas tecnologías, genera residuos excesivos, etc.)	
<b>Costo relativo total &amp; Desempeño</b>	<b>Operación &amp; Mantenimiento (O&amp;M)</b> Intensidad de la operación y mantenimiento	Bajo grado de O&M	Grado medio de O&M	Alto grado de O&M	
	<b>Capital</b> Inversión de capital	Bajo grado de inversión de capital	Grado medio de inversión de capital	Alto grado de inversión de capital	
	<b>Mantenimiento/Confiabilidad del sistema</b> Desempeño esperado conforme a la confiabilidad demostrada y mantenimiento relativo a otras tecnologías efectivas	Alta desempeño y bajo mantenimiento	Desempeño medio y mantenimiento promedio	Bajo desempeño y alto mantenimiento	
	<b>Costos relativos</b> Costos de diseño, construcción, operación y mantenimiento del proceso esencial	Costos generales bajos comparado con otras opciones	Costos generales promedio comparado con otras opciones	Costos generales altos comparado con otras opciones	
	<b>Tiempo</b> Tiempo requerido para limpiar el sitio en condiciones estándar usando la tecnología				
	suelo in situ	Menos de 1 año	1 a 3 años	Más de 3 años	
	suelo ex situ	Menos de 0.5 años	0.5 a 1 año	Más de 1 año	
	agua subterránea	Menos de 3 años	3 a 10 años	Más de 10 años	
<b>Disponibilidad</b> Número de proveedores que pueden diseñar, construir y dar mantenimiento a la tecnología		Más de 4 vendedores	2 a 4 vendedores	menor de 2 vendedores	
<b>Contaminante tratado</b> Los contaminantes son clasificados en ocho grupos: - Compuestos orgánicos volátiles no halogenados - Compuestos orgánicos volátiles halogenados - Compuestos orgánicos semi-volátiles no halogenados - Compuestos orgánicos semi-volátiles halogenados - Combustibles - Compuestos inorgánicos - Radionucleidos - Explosivos		Efectividad demostrada en prueba piloto o a gran escala	Efectividad demostrada limitada en prueba piloto o gran escala	No demuestra efectividad en pruebas piloto o gran escala	

Así, una vez identificado al 1,2-dicloroetano como compuesto orgánico volátil, de la *Tabla 6.1* resulta que las tecnologías con efectividad demostrada para este contaminante, son las presentadas en la *Tabla 6.3*; de igual forma, se presenta el puntaje obtenido de cada tratamiento.

*Tabla 6.3. Tecnologías efectivas para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles*

SUELO, SEDIMENTO, CAMA DE ROCAS Y LODOS	Calif.	AGUA SUBTERRÁNEA, AGUA SUPERFICIAL Y LIXIVIADOS	Calif.
<i>3.1 Tratamiento Biológico in-situ</i>		<i>3.9 Tratamiento Biológico in-situ</i>	
Bioventeo	7.5	Biorremediación mejorada	5
Biorremediación mejorada	5.5	<i>3.10 Tratamiento físico/químico in-situ</i>	
<i>3.2 Tratamiento Físico/Químico in-situ</i>		Extracción de dos fases	3.5
Enjuagado de suelos	5	Tratamiento térmico	4
Extracción de vapores del suelo	5	Barreras reactivas permeables	5
<i>3.3 Tratamiento térmico in-situ</i>		<i>3.11 Tratamiento Biológico Ex-situ</i>	
Tratamiento térmico	4.5	Bioreactores	5.5
<i>3.4 Tratamiento Biológico Ex-situ (asumiendo excavación)</i>		<i>3.12 Tratamiento Físico/Químico Ex-situ (asumiendo bombeo)</i>	
Biopilas	7.5	Proceso de oxidación avanzada	3.5
Tratamiento biológico con lodos	3.5	Extracción/Separación con aire (Air Stripping)	5
<i>3.5 Tratamiento Físico/Químico Ex-situ (asumiendo excavación)</i>		Carbón activado granulado/ Adsorción con carbón fase líquida	4.5
Deshalogenación	2.5	Separación	4.5
<i>3.6 Tratamiento térmico Ex-situ (asumiendo excavación)</i>		Irrigación con aspersores	6
Incineración	4.5	<i>3.13 Contención</i>	
Desorción térmica	5	Barreras físicas	5.5

Fuente: (FRTR, 2007)

Una vez conocidas las tecnologías efectivas para remediar el sitio, se discriminaron las de mayor puntuación para estudiarlas y corroborar su efectividad en el sitio caso de estudio (según las características del suelo), presentando las tecnologías finales en la *Tabla 6.4*.

Como se observa en la *Tabla 6.4*, las tecnologías más recomendadas por la FRTR para el tratamiento del suelo son bioventeo, biopilas y biorremediación mejorada; otras técnicas efectivas pero con menor puntuación (menores factores a favor) son el enjuagado de suelos, extracción de vapores y desorción térmica.

Respecto al tratamiento de agua subterránea, los procesos más favorables son (en orden decreciente) la irrigación con aspersores, bioreactores, barreras físicas, desorción, biorremediación mejorada y barreras reactivas permeables.

Tabla 6.4. Tecnologías de restauración más aptas para el tratamiento de COV

	Estatus de desarrollo	Tren de tratamiento	Costo relativo total & Desempeño					Disponibilidad	COV halogenados	Calificación
			Operación & Mantenimiento	Capital	Confiabilidad del sistema y mantenimiento	Costos relativos	Tiempo			
<b>SUELO, SEDIMENTO, CAMA DE ROCAS Y LODOS</b>										
<i>3.1 Tratamiento Biológico in-situ</i>										
Bioventeo	1	1	1	1	1	1	0.5	1	*	7.5
Biorremediación mejorada	1	1	0	0.5	0.5	1	0.5	1	1	5.5
<i>3.4 Tratamiento Biológico Ex-situ (asumiendo excavación)</i>										
Biopilas	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	7.5
<i>3.2 Tratamiento Físico/Químico in-situ</i>										
Enjuagado de suelos	1	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	5
Extracción de vapores del suelo	1	0	0	0.5	1	1	0.5	1	1	5
<i>3.6 Tratamiento térmico Ex-situ (asumiendo excavación)</i>										
Desorción térmica	1	1	0	0	0.5	0.5	1	1	1	5
<b>AGUA SUBTERRÁNEA, AGUA SUPERFICIAL Y LIXIVIADOS</b>										
<i>3.12 Tratamiento Físico/Químico Ex-situ (asumiendo bombeo)</i>										
Extracción/Separación con aire (Air Stripping)	1	0.5	0	0.5	1	1	0	1	1	5
Irrigación con aspersores	1	1	1	1	1	0	0	1	1	6
<i>3.11 Tratamiento Biológico Ex-situ</i>										
Bioreactores	1	1	0.5	0	0.5	1	0.5	1	1	5.5
<i>3.13 Contención</i>										
Barreras físicas	1	1	0.5	0	1	1	0	1	1	5.5
<i>3.9 Tratamiento Biológico in-situ</i>										
Biorremediación mejorada	1	1	0	0.5	0.5	1	*	1	*	5
<i>3.10 Tratamiento físico/químico in-situ</i>										
Barreras reactivas permeables	1	1	0.5	0	1	0.5	0	1	1	5

Fuente: (FRTR, 2007)

A continuación se describen las tecnologías que se encontraron factibles (Tabla 6.4), a fin de conocer los casos en los que se pueden aplicar, al igual que las ventajas y desventajas que ofrecen y así dar una respuesta final de la tecnología a implementar.

## 6.2 Tecnologías de restauración para tratar la contaminación por 1,2-dicloroetano en el suelo

Por la Tabla 6.4, se observa que las tecnologías mejor calificadas para la rehabilitación del sitio son las pertenecientes a la biorremediación, es decir, a los tratamientos que aprovechan el catabolismo de los microorganismos del suelo (autóctonos o inoculados) para transformar los contaminantes a productos inocuos como CO<sub>2</sub> y agua en el caso del metabolismo aeróbico (el anaeróbico es menos frecuente), siendo el objetivo final, la completa mineralización del contaminante.

Una vez degradado éste, los microorganismos ven disminuida su fuente de alimento y mueren sin representar algún residuo de importancia. (Solanas, 2009)

El éxito de cualquier técnica de biorremediación depende de mantener las condiciones necesarias para fomentar el crecimiento de los microorganismos y actividad degradadora, así, se pueden distinguir tres factores clave para su implementación: contaminante, microorganismos y medio. (Solanas, 2009; Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial, 2005)

**Contaminante:** Propiedades como la solubilidad y volatilización del contaminante influyen en la interacción con el material litológico, afectando la biodisponibilidad del sustrato hacia los microorganismos biodegradadores. (Las propiedades del contaminante, al igual que su interacción con el medio ya se discutieron en el capítulo anterior)

**Microorganismos:** Se refiere a la presencia de organismos con rutas metabólicas capaces de degradar los compuestos de interés.

En el caso del 1,2-dicloroetano, en la literatura se encontró que algunas bacterias capaces de degradarlo mediante un metabolismo aerobio son las siguientes: *Pseudomonas sp strain DE2*, *Xantobacter Autotrophicus*, *Ancylobacter Aquaticus AD25*, *AD20* y *AD27*, *Pseudomonas sp Strain DCA1* y *Methylosinus Trichosporium OB-3*, sin embargo, los estudios encontrados indican que el 1,2-DCA es degradado a concentraciones del rango micromolar, debido a la baja afinidad de las bacterias por el contaminante, por lo que para una remoción de 1,2-DCA a niveles inferiores, este mecanismo no es eficiente. (Martínez, 2005; Hage & Sybe, 1999)

**Medio:** Este rubro se refiere a las condiciones bajo las que se encuentra el sitio contaminado, las principales propiedades que influyen y el cómo intervienen, se muestran en la *Tabla 6.5*.

Tabla 6.5. Factores del suelo que influyen en la biorremediación

Factor	Afectación
<b>Temperatura</b>	Generalmente las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos. La biodegradación decrece por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40°C, mientras que se inhibe a temperaturas bajas, una temperatura óptima de crecimiento bacteriano suele estar en torno a los 25°C, la tasa de degradación decrece exponencialmente cuando se baja de esta temperatura. También hay que considerar que a altas temperaturas la solubilidad del oxígeno disminuye.
<b>pH</b>	La actividad microbiana disminuye a valores extremos de pH, a valores moderados la biodegradación es más rápida. El pH influye también en la solubilidad y en consecuencia, en la disponibilidad del contaminante y otros constituyentes del suelo que afectan la actividad biológica. El crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de 6 y 8.
<b>Biodisponibilidad</b>	Para que los microorganismos puedan degradar el contaminante, éste debe estar accesible, su persistencia en el suelo se debe a factores como la sorción o baja solubilidad en el agua.
<b>Nutrientes</b>	Para que el microorganismo pueda crecer, además del sustrato orgánico requiere nutrientes y un aceptor de electrones (O <sub>2</sub> para aerobios). Se ha demostrado que la adición de fuentes de carbono de fácil asimilación (glucosa, ácido orgánicos) puede promover la degradación de contaminantes. La adición de N y P (como fertilizantes) al suelo estimula la biodegradación de hidrocarburos, su carencia puede limitar la actividad microbiana.
<b>Disponibilidad de oxígeno</b>	Los contaminantes orgánicos se pueden biodegradar bajo condiciones aerobias o anaerobias, la gran mayoría es aerobia, por lo que asegurar los niveles necesarios de oxígeno mejorará la velocidad de biodegradación.
<b>Humedad</b>	Los microorganismos requieren de una humedad adecuada para su crecimiento y actividad. El agua sirve como medio de transporte para nutrientes y constituyentes orgánicos hacia la célula microbiana y de productos de desecho hacia fuera de la célula. El nivel óptimo de humedad depende de las propiedades del suelo. En general, un contenido de humedad bajo disminuye la biodegradación, mientras que un exceso inhibe el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo.
<b>Concentración</b>	Una alta concentración de contaminantes puede ser tóxica para los microorganismos y una baja concentración puede limitar su crecimiento al ser su fuente de alimento y energía.

Fuente: (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial, 2005)

Una vez conocidos los factores determinantes para la biodegradación, se procede a enlistar las ventajas y desventajas de este tipo de tratamiento respecto a las demás técnicas (fisicoquímicas y térmicas).

**Ventajas** (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial, 2005; Solanas, 2009; Volke, 2002)

- Origina cambios físicos menores sobre el medio, resultando una técnica de bajo impacto ambiental.
- Los contaminantes son generalmente destruidos.
- Apenas se generan residuos.
- No requiere de equipamientos especializados para su aplicación.
- Se requiere mínimo o ningún tratamiento posterior.
- Son efectivas en cuanto a costos.

**Desventajas** (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial, 2005; Solanas, 2009; Volke, 2002)

- Aplicable sólo para compuestos biodegradables.
- No se puede implementar si el tipo de suelo no favorece el crecimiento bacteriano.
- Su implementación es específica para cada lugar contaminado, tanto en lo referente al tipo de microorganismos empleados como a las técnicas de enriquecimiento nutricional y técnicas de aplicación.
- Difícil predecir la eficiencia del tratamiento, así como el escalamiento de una prueba de laboratorio a escala piloto.
- Un contaminante puede ser degradado a productos intermediarios o finales que pueden ser menos, igual o más tóxicos que el contaminante original.
- El éxito del proceso depende de la capacidad para crear y mantener las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento microbiano.
- Concentraciones muy altas de contaminantes pueden resultar tóxicas e inhibir la biodegradación.

- El tiempo necesario tanto para la adecuación de los microorganismos como para el tratamiento, es largo.
- Presencia de metales pesados pueden inhibir el crecimiento de microorganismos.

Aunque las desventajas parecen muchas, varios estudios han demostrado la efectividad y éxito de estos tratamientos, por lo que a continuación se describen las tecnologías que usan como base la biorremediación.

### 6.1.1 Bioventeo

Es un tratamiento biológico *in situ*, es decir, se lleva a cabo en el sitio contaminado (sin excavación). En este tratamiento, el objetivo es estimular la biodegradación natural de un compuesto biodegradable en condiciones aerobias a través del suministro de oxígeno con pozos de inyección de aire operando a bajas velocidades de flujo, a fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores. El esquema de este tratamiento se muestra en la *Figura 6.1* (Lenoir & Tornari, 2004)

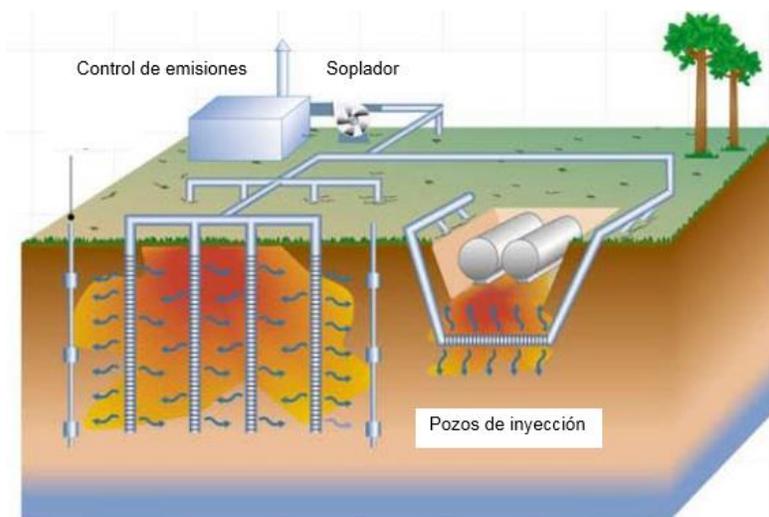


Figura 6.1. Bioventeo. Fuente: (Rueda, 2015)

Las complicaciones de esta tecnología son alcanzar y mantener todas las condiciones expresadas en la *Tabla 6.5*, lo cual se vuelve difícil al ser el suelo un sistema abierto, sin embargo la mayor dificultad se encuentra en conseguir el flujo

de aire que permita la existencia de los microorganismos biodegradadores, por lo que conocer la permeabilidad del suelo se vuelve fundamental; para los suelos altamente arcillosos, estratificados o demasiado heterogéneos suele no ser eficiente. (Lenoir & Tornari, 2004)

**Consideraciones** (Lenoir & Tornari, 2004)

- Trayectorias de flujo preferenciales disminuyen la efectividad del proceso al no airear toda la zona impactada. El sistema no debe usarse para arcillas, altamente estratificado o superficies heterogéneas por las limitaciones en la transferencia de oxígeno.

**Ventajas** (Rueda, 2015; FRTR, 2007)

- Facilidad de instalación, operación, bajos costos y mínimo impacto.
- Utiliza equipamiento simple y comercialmente disponible.

**Desventajas** (Rueda, 2015; FRTR, 2007)

- Incremento en la movilidad de los contaminantes.
- Potencial de acumulación de vapores en espacios subterráneos con la inyección de aire.
- A menudo, los gases generados deben ser tratados.
- Esta tecnología no requiere de equipo caro, pero los costos pueden verse afectados por la permeabilidad del suelo, además del espacio, número de pozos y velocidad de bombeo requerido.

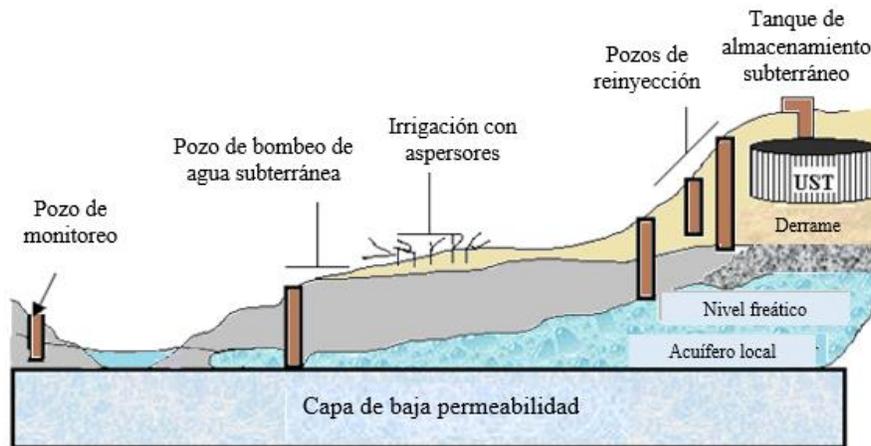
**6.1.2 Biorremediación mejorada**

La biorremediación mejorada también conocida como bioestimulación, es una tecnología in situ (sin excavación) en la que se trata de modificar las condiciones del medio de tal manera que se acelere la degradación natural del contaminante al fomentar el crecimiento de los microorganismos y su metabolismo. (FRTR, 2007; Mulas, 2008)

Esta tecnología típicamente involucra la percolación o inyección de agua subterránea o agua no contaminada mezclada con nutrientes, peróxido de hidrógeno (como fuente de oxígeno), disoluciones que ayuden a la desorción del contaminante (biodisponibilidad) y en algunas ocasiones también microorganismos aclimatados (bioaumentación). (Vallejo & Salgado, 2005; FRTR, 2007)

Este tratamiento puede ser utilizado para remediar la zona no saturada y la saturada, dependiendo en que parte del suelo se realice la inyección de la disolución acuosa. Para suelos superficiales, la adición se realiza por medio de galerías filtrantes o irrigación con aspersores, para suelos más profundos se utilizan pozos de inyección. En el caso de sitios con temperaturas bajas, se utilizan mantas de calefacción para cubrir la superficie del suelo y alcanzar la temperatura que incremente la actividad biológica. (FRTR, 2007; Lenoir & Tornari, 2004)

Una vez que son incorporados los aditivos, se bombea el agua subterránea por medio de pozos de extracción para posteriormente depurarse y volverse a inyectar al acuífero. La *Figura 6.2*, ejemplifica el proceso.



*Figura 6.2.* Biorremediación mejorada. Fuente: (FRTR, 2007)

### Consideraciones (FRTR, 2007)

- Trayectorias de flujo preferenciales pueden disminuir severamente el contacto entre los fluidos de inyección y contaminantes a través de las zonas contaminadas.

- Concentraciones de peróxido de hidrógeno mayores a 100 ppm en agua subterránea inhiben la actividad de los microorganismos.
- El sistema no debe usarse para arcillas, altamente estratificado o superficies heterogéneas por las limitaciones en la transferencia de oxígeno.

**Ventajas** (FRTR, 2007; Lenoir & Tornari, 2004; Mulas, 2008)

- Bajo costo de operación, no requiere de insumos costosos ni equipamientos especializados para su aplicación.
- No genera gran cantidad de residuos, ni residuos que requieran tratamiento adicional o disposición.

**Desventajas** (FRTR, 2007)

- Esta tecnología es de largo plazo y puede tomar varios años para la limpieza de la pluma.
- Puede haber obstrucción de los pozos de inyección por el crecimiento bacteriano.
- La circulación del agua y las soluciones a través del suelo puede incrementar la movilidad del contaminante y tratamiento necesario del agua subterránea.
- Un sistema de tratamiento en la superficie como columna de absorción o adsorción con carbón activado puede ser requerido para tratar el agua extraída antes de reinyectarla o disponerse.

### **6.1.3 Biopilas**

La técnica de biopilas consiste en la biorremediación de suelo excavado y dispuesto en pilas, las cuales son diseñadas para estimular la biodegradación aerobia. En este proceso, el suelo es mezclado con enmiendas que modifican la humedad, nutrientes y pH; el oxígeno se suministra por medio de tuberías de aireación que atraviesan las pilas y el acondicionamiento de temperatura se consigue por membranas que las cubren. (FRTR, 2007; Roldán & Iturbe, 2005)

Para la conformación de la biopila se inicia con la construcción de la base, (generalmente de un material limo-arcilloso), ésta se compacta y se nivela para

posteriormente cubrirse con un material geotextil y una geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) que garantiza la impermeabilización, después se coloca una capa de drenaje compuesta por gravas silíceas y un tubo de drenaje central que se conecta con un sistema de recolección de lixiviados. En esta etapa también se construyen zanjas o canales (cubiertos por capas impermeables) a los lados de la pila para el depósito de los fluidos residuales. (Geotecnia , 2008; Roldán & Iturbe, 2005)

El sistema de aireación puede ser pasivo o activo, en el primero, tuberías ranuradas se colocan a diferentes alturas a través de la biopila de manera que el aire penetra naturalmente; en el segundo, se colocan sistemas de inyección y extracción de aire enterrados que generalmente consisten en un tubo principal que distribuye a varios ramales de la biopila. (Lenoir & Tornari, 2004; Geotecnia , 2008)

De esta manera, se van conformando capas de suelo sobre la base a la vez que se van adicionando los aditivos de estimulación, asegurando la homogeneidad del medio. Una vez completada la pila, se cubre con láminas de plástico (PEAD) para: evitar su erosión, alteración de las propiedades fisicoquímicas debido a las condiciones meteorológicas y escorrentías, a la vez que se evita la evaporación y conservación de la temperatura. (Geotecnia , 2008)

Respecto al sistema de recolección de lixiviados, éstos se transfieren a un tanque de almacenamiento y posteriormente se evalúa su disposición o reutilización en el sistema de tratamiento. (Roldán & Iturbe, 2005)

Referente a los compuestos orgánicos volátiles que dejan el suelo, estos deben ser tratados antes de ser descargados a la atmósfera, generalmente por un sistema de carbón activado. (FRTR, 2007)

Una representación del proceso de restauración por biopilas se muestra en la *Figura 6.3*.

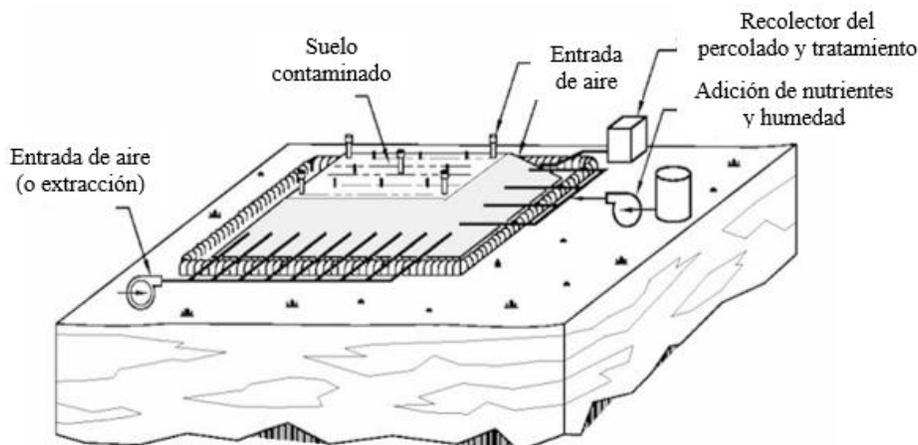


Figura 6.3. Biopilas. Fuente: (EPA, 2008 publicado por Gidahatari, 2011)

### Consideraciones (Lenoir & Tornari, 2004; FRTR, 2007)

- Se deben conducir pruebas de tratabilidad para determinar la biodegradación de los contaminantes, al igual que la oxigenación y nutrientes necesarios.
- La concentración del contaminante debe ser máximo 50 ppm.
- El costo está en función la cantidad y fracción de suelo a tratar, disponibilidad de agentes de volumen y necesidad de tratamientos previos y/o posteriores.

### Ventajas (FRTR, 2007; Roldán & Iturbe, 2005)

- Es una tecnología de corto plazo, la duración de la operación y mantenimiento puede tomar pocas semanas hasta varios meses.
- Diseño y construcción relativamente fácil.
- Costo competitivo respecto a otras técnicas.
- Mayor control de las condiciones del suelo y por lo tanto efectividad respecto a las tecnologías de biorremediación in situ.

### Desventajas (Roldán & Iturbe, 2005; Lenoir & Tornari, 2004)

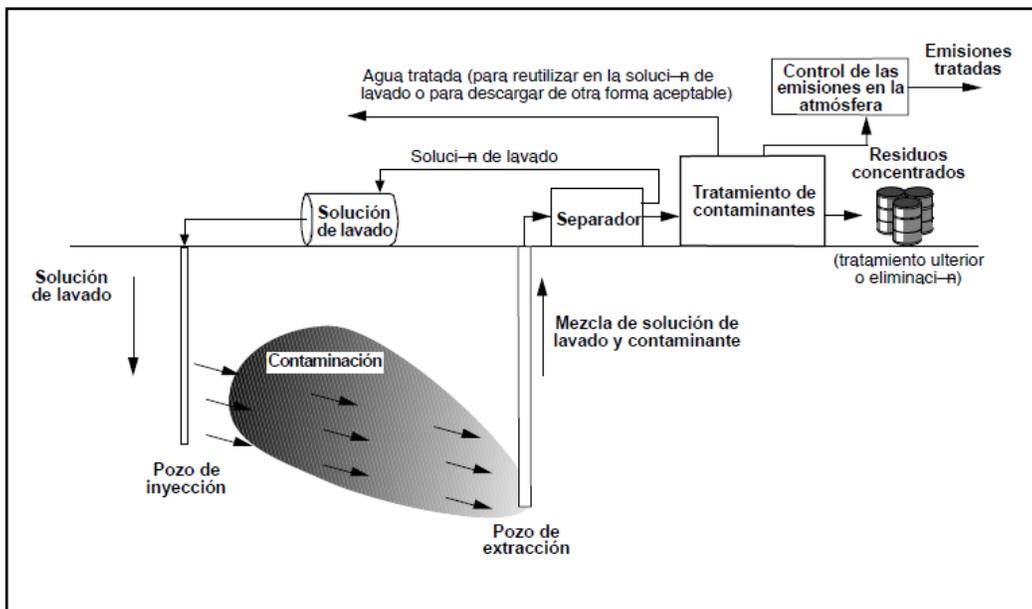
- Se requiere de la excavación del suelo contaminado, pudiendo provocar liberación de compuestos orgánicos volátiles.
- Necesidad de filtros a la salida del aireador para tratar los COV antes de ser liberados a la atmósfera.

- Se requiere una superficie de trabajo relativamente grande.
- Incremento volumétrico del material a tratar.

Con esta tecnología se terminan de describir los procesos que involucran la biorremediación y se da paso a los siguientes tratamientos sugeridos para remediar el sitio de estudio.

#### 6.1.4 Enjuague de suelos

Este proceso de rehabilitación es un tratamiento físico-químico in situ en el que disoluciones con aditivos son inyectadas al suelo con la finalidad de desorber, solubilizar o reaccionar con el contaminante de tal forma que pueda ser removido; la cantidad de disolución inyectada debe ser la necesaria para inundar el suelo y atravesar el medio poroso arrastrando al compuesto de interés, posteriormente, la disolución es bombeada a la superficie por medio de pozos de extracción y tratada para re-inyección o disposición. Una representación de este proceso se muestra en la *Figura 6.4.* (EPA A, 1996; CLU-IN, 2015)



*Figura 6.4.* Enjuague de suelos. Fuente: (EPA A, 1996)

En esta tecnología, un factor importante a considerar es el tratamiento de la disolución de enjuague una vez que trae consigo el contaminante, ya que constituye un proceso adicional. En este tipo de restauración generalmente además de los

sistemas de inyección y extracción se instalan plantas de tratamiento para los fluidos extraídos. Además, en este caso, al ser el 1,2-DCA un compuesto volátil también surge la necesidad de un tratamiento de vapores. (NAVFAC, 2012)

Respecto a las disoluciones inyectadas, éstas suelen ser agua y agua con aditivos como ácidos, bases o surfactantes. El agua se usa para tratar contaminantes solubles en ella; las disoluciones ácidas (ácido nítrico o clorhídrico) para extraer metales y contaminantes orgánicos; disoluciones básicas (hidróxido de sodio) para extracción de fenoles y algunos metales; y surfactantes se utilizan para sustancias que normalmente no se mezclan, como aceite y agua, emulsificándolas. (Mulligan, et al., 2000)

En este caso, al ser el 1,2-DCA un DNAPL, lo más adecuado es el uso de surfactantes que incrementen la solubilidad de la fase móvil y a la par, reduzcan las fuerzas capilares o tensión superficial que mantiene al compuesto atrapado en los espacios porosos del suelo. (EPA A, 1996; CLU-IN, 2015)

En la literatura se reportan casos exitosos en los que se han tratado COV clorados, logrando remociones altas del contaminante. Mulligan, et al., (2000), en el artículo *Remediación mejorada por surfactantes en suelos contaminados*, hacen una revisión de los sitios rehabilitados, contaminantes tratados, disoluciones usadas y remociones obtenidas en los distintos casos, corroborando la efectividad del proceso.

Sin embargo, aunque existen casos exitosos, esta técnica no se encuentra entre las más implementadas. En la Conferencia Internacional sobre rehabilitación de suelos con compuestos clorados y recalcitrantes (organizada por Battelle Memorial Institute) se habló sobre la disminución gradual de casos tratados por esta técnica, concluyendo como motivo su difícil escalamiento de laboratorio a campo (por la distribución y estructura del suelo) y costos. (Superfund Remedy Report, 2010)

**Consideraciones** (CLU-IN, 2015; EPA A, 1996; Lenoir & Tornari, 2004)

- Eficaz en suelos que permiten el paso de la solución de lavado, el contacto de la disolución con el medio poroso es fundamental (suelos con alto porcentaje de limo, arcilla o muy heterogéneos no son viables).
- Conocimiento detallado del flujo del agua subterránea a fin de diseñar el sistema de pozos y estimar el trayecto que seguirá el líquido de enjuague y contaminantes (asegurando que no migren fuera del sitio de contaminación).
- Sólo se debe aplicar en áreas donde puedan ser contenidos los líquidos de enjuague.
- El tratamiento de los fluidos de enjuague es determinante para los costos.

**Ventajas** (CLU-IN, 2015; EPA A, 1996; Lenoir & Tornari, 2004)

- Comprobada la efectividad del tratamiento de compuestos orgánicos volátiles con esta tecnología.
- Tratamiento de una mayor cantidad de contaminante respecto al bombeo y tratamiento convencional.
- Aplicable al tratamiento de la zona vadosa y saturada.
- Potencial combinación con otras tecnologías de restauración.
- Se pueden usar surfactantes ambientalmente compatibles.
- Equipo moderadamente complejo.

**Desventajas** (CLU-IN, 2015; EPA A, 1996; Lenoir & Tornari, 2004)

- La disolución de enjuague es específica para el contaminante, por lo que se deben ejecutar extensas pruebas de laboratorio antes de ser aplicadas a escala piloto.
- El contaminante y aditivos del líquido de enjuague pueden contaminar el agua subterránea que no ha sido afectada.
- Modificación de las propiedades físico-químicas del suelo.

- No eficaz para mezcla de sustancias peligrosas ya que es difícil preparar una disolución de enjuague capaz de remover distintos contaminantes al mismo tiempo.
- Se necesita un segundo tratamiento para los contaminantes extraídos.
- Costo adicional por tratamiento de efluentes.

### 6.1.5 Extracción de vapores del suelo

Esta tecnología está catalogada como una restauración físico-química in situ en la que se aprovecha la volatilidad de los compuestos para extraerlos del subsuelo en forma de vapor por medio de la aplicación de vacío en pozos de extracción situados en la zona no saturada. En ocasiones, además de pozos de extracción se instalan pozos de inyección de aire o respiraderos para inducir la entrada de aire en el suelo y consecuente evaporación y remoción de los contaminantes. Finalmente, los vapores colectados son tratados (generalmente con carbón activado). Una representación de este proceso se puede observar en la *Figura 6.5*. (FRTR, 2007)

Los contaminantes objetivo de esta técnica de restauración son compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles, con presión de vapor mayor a 0.5 mmHg, por lo que el 1,2-DCA al poseer una presión de vapor de 65mmHg (a 20°C) es un compuesto viable a tratar por este método. (FRTR, 2007; CAM, 2014)

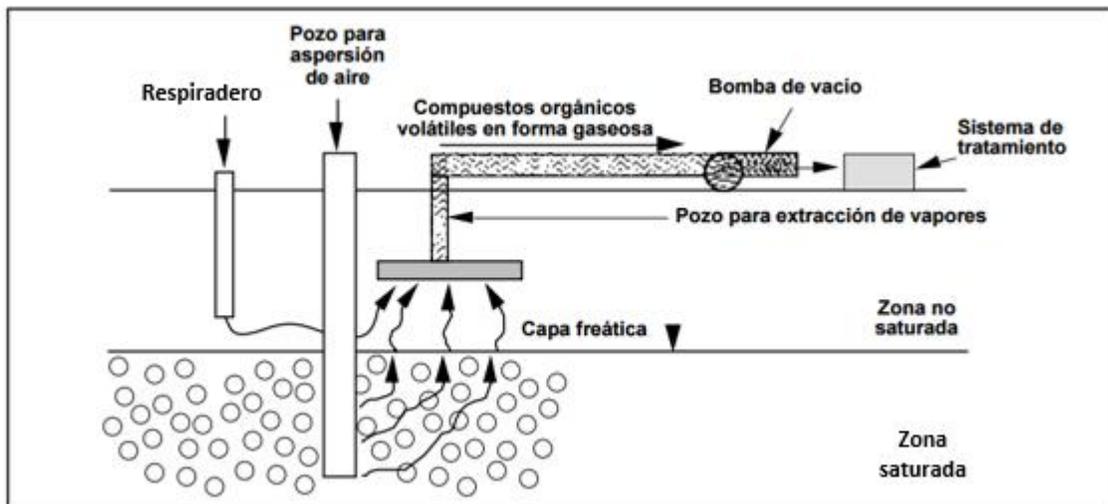


Figura 6.5. Extracción de vapores del suelo. Fuente: (EPA B, 1996)

La extracción de vapores del suelo (SVE, por sus siglas en inglés) constituye una de las técnicas más utilizadas para COV en EU y Europa por sus rendimientos y costos. En el listado de los sitios Superfund de la EPA, el sistema SVE se utilizó en 15% de los sitios remediados; Verona Well Field (Michigan) es un sitio donde se empleó extracción de vapores con recursos Superfund para tratar una zona con tricloroetano, tetracloroetileno y BTEX, alcanzando los niveles de limpieza establecidos. (Superfund Remedy Report, 2010)

Una variación a este tratamiento es la extracción de doble fase, en la cual los pozos de extracción se instalan a mayor profundidad y es posible tratar la zona saturada, aplicando un fuerte vacío para extraer agua subterránea y vapores del suelo, una vez llegados a la superficie se separan y se someten a tratamiento. En suelos densos y arcillosos la extracción de doble fase es más eficaz que el método convencional. (Dorrnsoro A, Carlos, 2011)

**Consideraciones** (CAM, 2014; FRTR, 2007; Lenoir & Tornari, 2004)

- Eficaz en suelos con medio a alto grado de permeabilidad (arena, grava y limo), dependiendo de este factor será el plazo para la restauración y costo de la operación (grado de vacío a aplicar).
- No eficaz cuando hay alta capacidad de adsorción del contaminante al medio poroso, pues no estará disponible para ser acarreado por el flujo de aire.
- Alto grado de humedad disminuye la eficiencia del sistema reduciendo la permeabilidad del suelo y restringiendo el flujo.
- Temperaturas altas favorecen la volatilidad del contaminante y por lo tanto, su extracción por medio del aire.
- La mayor profundidad de instalación de los pozos que se ha alcanzado es 90m.

**Ventajas** (CAM, 2014; FRTR, 2007; Lenoir & Tornari, 2004)

- Desempeño probado.
- Tecnología comercialmente difundida, equipo de fácil instalación y obtención.
- Proceso con pocas tareas de mantenimiento.

- Costo competitivo.
- Tiempo de rehabilitación de medio a largo plazo.
- Se puede combinar con otras técnicas para mejorar la disponibilidad del contaminante y tiempo de remediación.
- Al involucrar un flujo continuo de aire a través del suelo, promueve la biodegradación aerobia in situ del 1,2-DCA.

**Desventajas** (CAM, 2014; FRTR, 2007; Lenoir & Tornari, 2004)

- Reducción de concentraciones de contaminante mayores al 90% son difíciles de conseguir.
- Se deben tratar los vapores efluentes.
- La movilidad del contaminante puede afectar áreas que no han sido dañadas.

#### **6.1.6 Desorción térmica**

Esta tecnología para rehabilitación de suelos es un proceso ex – situ, en el cual una vez excavado el terreno contaminado, el suelo se somete a tratamiento térmico a altas temperaturas con el fin de volatilizar al contaminante, extraerlo y tratarlo en un proceso posterior. (EPA A, 2012; Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd., 2010)

En general, la desorción térmica consta de tres etapas: tratamiento preliminar, desorción y tratamiento de gases desorbidos. (EPA A, 2012; EMGRISA, 2016)

**Tratamiento preliminar:** En este paso, el suelo excavado se acondiciona para ser tratado y mejorar la efectividad de la etapa de desorción, los tratamientos preliminares generalmente consisten en el cribado y secado del material. (EPA A, 2012; EMGRISA, 2016)

**Desorción:** Este proceso es el principal de la tecnología al remover el contaminante del suelo. Aquí, la tierra contaminada se calienta durante un período determinado para vaporizar los contaminantes. (EPA A, 2012; EMGRISA, 2016)

La desorción puede realizarse a baja temperatura o alta temperatura, siendo los rangos de operación de 90 a 320°C y 320 a 560°C respectivamente; dado que la

temperatura de ebullición del 1,2-DCA es 84°C (a 1.03 HPa), la desorción a baja temperatura sería la desorción seleccionada para tratar el caso de estudio. (EPA A, 2012; EMGRISA, 2016)

Generalmente la desorción se efectúa en un dispositivo de desorción giratorio que consiste en un tambor cilíndrico giratorio de metal, el calentamiento se efectúa de dos maneras: (EPA A, 2012; EMGRISA, 2016)

- **Calentamiento directo:** El material entra en el cilindro giratorio y se calienta al entrar en contacto directo con una llama o gases calientes emitidos por una llama.
- **Calentamiento indirecto:** En este proceso se calienta el exterior del cilindro de metal y éste, a la vez, calienta indirectamente a la tierra que da vueltas dentro del cilindro.

Una vez desorbidos los contaminantes, los vapores emitidos son acarreados por una corriente de aire que los dirige al sistema de tratamiento de gases y el suelo descontaminado es enfriado, rociándole agua, además de servir como proceso para eliminar el polvo, posteriormente la tierra es analizada y dispuesto como relleno en el sitio o fuera de él. (EPA A, 2012; EMGRISA, 2016)

**Tratamiento de gases desorbidos:** Los vapores emitidos de la desorción son colectados y oxidados en un quemador auxiliar, adsorbidos en carbón activado o recuperados en un condensador. (EPA A, 2012; EMGRISA, 2016)

El esquema completo del tratamiento se puede observar en la *Figura 6.6*



Figura 6.6. Desorción térmica.

Fuente: (Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd., 2010)

**Consideraciones** (Marín, 2010; Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd., 2010)

- Suelos con alto contenido de humedad incrementan el combustible utilizado para volatilizar los vapores del suelo contaminado y por lo tanto, el costo total del tratamiento.
- Suelos con alto contenido de limo, arcilla y materia orgánica son difíciles de tratar debido a que por sus propiedades, tienden a adsorber los compuestos orgánicos. Además, por su baja porosidad, dificultan el contacto de la energía térmica con los contaminantes a la vez que por la cantidad de polvo que emiten, afectan al equipo de post-tratamiento de gases.
- Es una tecnología transportable, los proveedores (autorizados) se encargan de su montaje en el sitio de la contaminación; una vez terminada la rehabilitación, se desmantela.
- El contaminante no debe superar el 20% de límite de explosividad.
- Metales pesados en la alimentación pueden producir residuos sólidos que requieran estabilización.

- Equipos de desorción han tratado hasta 25 toneladas de tierra contaminada por hora.

#### **Ventajas** (Marín, 2010; Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd., 2010)

- Idóneo para suelos con elevada carga de contaminación orgánica y escaso potencial de biodegradación.
- Tecnología de corto plazo, puede tomar desde pocas semanas a algunos años.
- Específica para tratar compuestos orgánicos volátiles.
- Remoción del contaminante superior al 95%.
- Efectividad comprobada en sitios Superfund de la EPA.
- No hay modificación de las propiedades del suelo, permitiendo al suelo tratado retener la capacidad de soportar la actividad biológica en un futuro.

#### **Desventajas** (Marín, 2010; Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd., 2010)

- Tecnología costosa por la excavación, uso de combustibles y tren de tratamiento.
- El uso de combustibles incrementa el riesgo del proceso.
- Se requiere de procesos auxiliares para la efectividad de la técnica, sólo sirve como parte de un tren de tratamiento.
- Mayor número de procesos comparado con otras técnicas de rehabilitación.

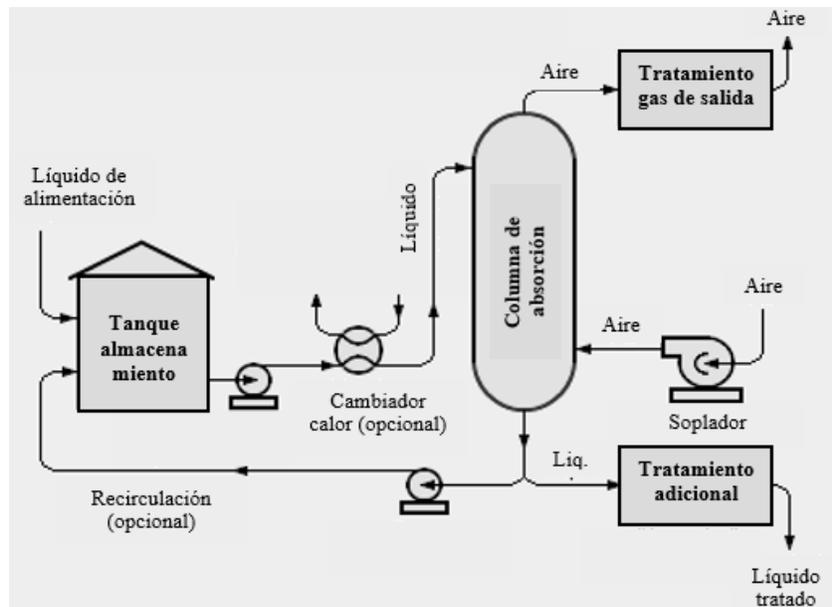
### **6.3 Tecnologías de rehabilitación para tratar la contaminación por**

#### **1,2-dicloroetano en agua subterránea**

##### **6.2.1 Separación por aire (Air Stripping)**

Esta tecnología requiere el bombeo previo del agua subterránea contaminada. Consiste en hacer pasar el agua extraída por un separador (torre de absorción) que efectúa la transferencia de masa de los compuestos orgánicos volátiles desde el agua hacia una corriente de aire que al mismo tiempo se suministra y extrae de la columna por un soplador (extractor), posteriormente el aire con el contaminante es tratado generalmente por unidades de carbón activado o algún proceso de oxidación

para finalmente ser descargado a la atmósfera. El proceso se puede observar en la *Figura 6.7*. (EPA C, 2012; Andromalos, 2000)



*Figura 6.7.* Separación por aire (Air Stripping). Fuente: (Beychok, 2010)

El fundamento de la tecnología se basa en la transferencia de masa desde el agua al aire mediante su contacto directo, a través de una torre de absorción, la cual incrementa la superficie de contacto aire-agua a través del rocío de agua contaminada (por medio de pulverizadores) sobre los platos de la torre, incrementando así también el tiempo de contacto. (EPA C, 2012; Andromalos, 2000)

De ser necesario, se puede volver a tratar el agua contaminada por medio de su recirculación. (EPA C, 2012; Andromalos, 2000)

La torre de absorción genérica incluye boquillas pulverizadoras que distribuyen el agua contaminada sobre el empaque de la columna, un ventilador de aire forzado en contra corriente al flujo de agua y un recolector de agua tratada en el fondo. Dependiendo del proceso se puede necesitar equipo auxiliar que se incorpora a la torre como un calentador de agua en la alimentación y un calefactor de aire que mejoren la eficiencia de remoción. (EPA C, 2012; Andromalos, 2000)

### **Consideraciones** (EPA C, 2012; FRTR, 2007)

- Efectivo sólo para agua con COV o semivolátiles con constantes de Henry mayor a  $0.01 \text{ atm/m}^3\text{mol}$ .
- El costo de energía del proceso es alto.
- Componentes con baja volatilidad a temperatura ambiente pueden requerir precalentamiento del agua subterránea.
- Se puede requerir tratamiento de los gases según las concentraciones de salida de la columna de absorción.

### **Ventajas** (EPA C, 2012; FRTR, 2007)

- Específico para compuestos orgánicos volátiles, existen casos exitosos en los que se han removido compuestos clorados.
- Eficiencia mayor al 90%.

### **Desventajas** (EPA C, 2012; FRTR, 2007)

- El tratamiento puede llevar desde meses a años dependiendo de la concentración del contaminante y volumen de agua a tratar, se debe considerar que el bombeo del agua subterránea no es rápido.
- Proceso idealmente apropiado para concentraciones menores a 200 mg/L.
- Funciona como parte de un tren de tratamiento.

#### **6.2.2 Riego por aspersión**

Esta tecnología consiste en la descarga del agua subterránea sobre la superficie del suelo a través de un sistema de rociadores. La remoción del contaminante se lleva a cabo cuando el agua bajo presión sale de las boquillas de los rociadores y se descarga en finas gotas, incrementando el área de contacto entre la fase acuosa y gas del ambiente, y por lo tanto, la transferencia de masa del compuesto volátil hacia la atmósfera. Un esquema de este proceso se observa en la *Figura 6.8*. (Environmental Science & Technology, 1997; Spalding & Exner, 2011)



Figura 6.8. Riego por aspersión. Fuente: (AgriFarming, 2015)

Una vez que el contaminante se encuentra en la atmósfera, es degradado en presencia de la luz ultravioleta o disminuida su concentración en el ambiente, no constituyendo un riesgo de contaminación. (Environmental Science & Technology, 1997; Spalding & Exner, 2011)

La eficiencia de este tratamiento se ha probado en agua con 1,1,2-tricloroetileno, 1,1,1-tricloroetano y tetracloruro de carbono, mejorando las eficiencias de remoción de los sistemas de bombeo y tratamiento convencionales. Con el paso del tiempo también se han desarrollado mejoras en el diseño de los rociadores, a fin de obtener gotas de agua más finas y por ende mayor eficiencia en la transferencia de masa. (Richardson & Sahle-Demessie, 2010)

**Consideraciones** (Lenoir & Tornari, 2004; FRTR, 2007; Spalding & Exner, 2011)

- El riego por rociadores se utiliza para cualquier contaminante volátil.
- Aplicable a agua subterránea con concentraciones bajas de contaminante.
- Los permisos legales son de difícil obtención debido a la liberación directa de los compuestos a la atmósfera.
- Puede ser necesario desarrollar un estudio de riesgo para asegurar la calidad del agua tratada y concentraciones emitidas de COV.
- Bajas temperaturas pueden afectar la ejecución del proceso.

- La EPA ha evaluado factible este proceso para disminuir la concentración del contaminante por debajo de 1000 ppb.

**Ventajas** (Lenoir & Tornari, 2004; FRTR, 2007; Spalding & Exner, 2011)

- Es una tecnología relativamente simple de montar y operar.
- Los costos son bajos comparados con las demás tecnologías.
- El rendimiento del proceso es mayor que las tecnologías de bombeo y tratamiento convencionales.
- Uso del agua para riego de cultivos una vez tratada
- Es una tecnología comercial.

**Desventajas** (Lenoir & Tornari, 2004; FRTR, 2007; Spalding & Exner, 2011)

- Se transfiere el contaminante de un medio a otro, no hay destrucción del contaminante.
- Se requiere una gran cantidad de espacio.
- Liberación directa del contaminante a la atmósfera, no es posible un control sobre las emisiones.
- Sólidos suspendidos pueden tapar las boquillas de los rociadores, se puede requerir un tratamiento previo para remover los sólidos suspendidos.

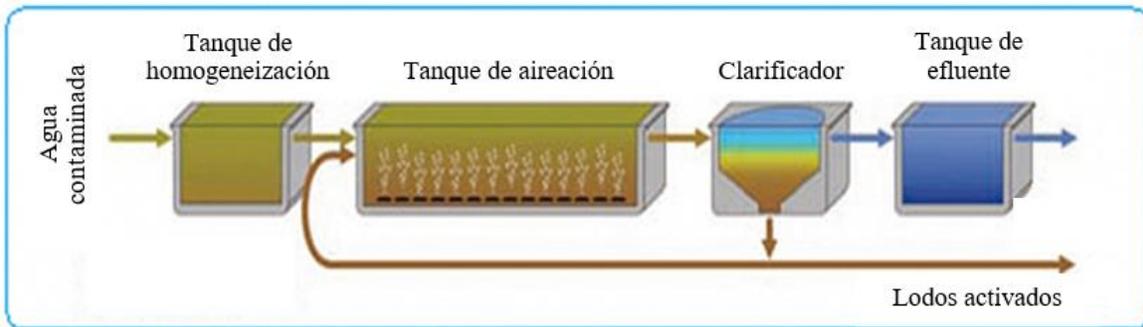
### **6.2.3 Biorreactores**

Esta tecnología trata el agua subterránea contaminada en la superficie del suelo, por lo que como primer etapa, debe ser extraída. El proceso consiste en conducir el agua contaminada a reactores que contienen microorganismos que efectúan la degradación aerobia del contaminante, para ello, el reactor cuenta con un sistema de aireación (generalmente en el fondo del tanque mediante difusores) que provee el oxígeno necesario para efectuar la reacción y al mismo tiempo permite la homogeneización del sustrato. (ESTRUCPLAN, 2008; Lenoir & Tornari, 2004)

Como ya se había mencionado, la biodegradación aerobia transforma la materia orgánica en presencia de oxígeno a productos inocuos, principalmente dióxido de carbono, agua y minerales, al mismo tiempo que contribuye al crecimiento y

reproducción de los microorganismos. Así, una vez que ha transcurrido el tiempo necesario para la biodegradación, el agua ya no contiene contaminantes orgánicos y se conduce a un segundo tanque en donde los productos sólidos de la reacción junto con algunos microorganismos son sedimentados en forma de flóculos, quedando el agua rehabilitada. (ESTRUCPLAN, 2008; CONAGUA, 2011)

La materia sedimentada contiene microorganismos degradadores por lo que una parte se recircula al reactor biológico (a fin de mantener la población microbiana y por lo tanto, la capacidad del proceso para seguir tratando el agua contaminada) y otra se saca de operación tratándola en un proceso por separado o enviándola a disposición fuera del sitio. El conjunto de operaciones antes descritas se observa en la *Figura 6.9*. (ESTRUCPLAN, 2008; Lenoir & Tornari, 2004)



*Figura 6.9.* Biorreactor. Fuente: (Ultrapure TECH, 2011)

Este sistema, en donde los microorganismos se encuentran suspendidos, es el más común, sin embargo también existen procesos en los que tales microorganismos se encuentran soportados sobre una matriz inerte, formando una película que se engrosa cada vez más conforme se desarrolla la biodegradación, cuando la película alcanza la masa necesaria se separa del medio de soporte y posteriormente del agua en el proceso de sedimentación. (CONAGUA, 2011)

Esta tecnología presenta muchas variantes, tanto en la forma como se encuentran los microorganismos (suspendidos o adheridos sobre un medio de soporte), como la forma de aireación, sin embargo, la esencia del tratamiento del contaminante es la misma. (CONAGUA, 2011)

A continuación se presentan las consideraciones, ventajas y desventajas de esta tecnología, las cuales se deberán tomarse en cuenta además de las mencionadas en el apartado de biorremediación, párrafos atrás.

**Consideraciones** (FRTR, 2007; ESTRUCPLAN, 2008; Lenoir & Tornari, 2004)

- Se debe establecer un equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos necesarios para que se elimine dicha carga.
- Es fundamental que el sistema de aireación y agitación en el reactor provea el oxígeno necesario para la reacción y asegure que todo el alimento llegue igual a los microorganismos al igual que evite la sedimentación de los flóculos.
- Las variaciones del caudal afectan las condiciones de proceso en el reactor, debiendo tener un monitoreo intenso y cambios en la operación.
- Los microorganismos degradadores pueden ser autóctonos o inoculados.
- Costo adicional por el bombeo del agua subterránea.

**Ventajas** (FRTR, 2007; ESTRUCPLAN, 2008; Lenoir & Tornari, 2004)

- Degradación del contaminante.
- Facilidad de instalación y mínimo impacto.

**Desventajas** (FRTR, 2007; ESTRUCPLAN, 2008; Lenoir & Tornari, 2004)

- Temperaturas ambiente bajas significativas disminuyen las tasas de biodegradación resultando en plazos de limpieza mayores o incremento en el costo de calentamiento.
- En el caso del tratamiento de 1,2-Dicloroetano en el agua subterránea, se debe contar con un sistema de captura del contaminante debido a la aireación y fácil volatilización, desarrollando un esquema de tratamiento de acuerdo a las concentraciones emitidas.
- Residuos del proceso de lodos requieren tratamiento o disposición.
- Microorganismos indeseados pueden colonizar los biorreactores, llevando una disminución de la efectividad del proceso.

#### 6.2.4 Barreras físicas

Esta tecnología consiste en la instalación de barreras en el subsuelo que impiden el paso de agua subterránea; en su mayoría son hechas de bentonita o alguna mezcla de ella (generalmente con el suelo del mismo emplazamiento), cemento o en algunos casos también se instalan geomembranas. (FRTR, 2007; Ortiz, 2009)

La finalidad de esta tecnología no es como tal la del tratamiento del contaminante, ya que éste permanece en el subsuelo, en lugar de ello, su objetivo es evitar la migración del agua contaminada y dependiendo del lugar de instalación puede servir para contener el agua contaminada, desviar el agua contaminada del agua potable, desviar el agua no contaminada y/o servir como barrera que delimita el sistema de algún tratamiento de agua subterránea. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1996; FRTR, 2007)

La instalación tradicional consiste en la excavación de trincheras verticales que posteriormente son llenadas con mezclas acuosas de bentonita, las cuales le confieren cierto grado de impermeabilidad a la barrera y proveen contención y sostén a la excavación, además de presentar resistencia química a bajo costo. (Lenoir & Tornari, 2004)

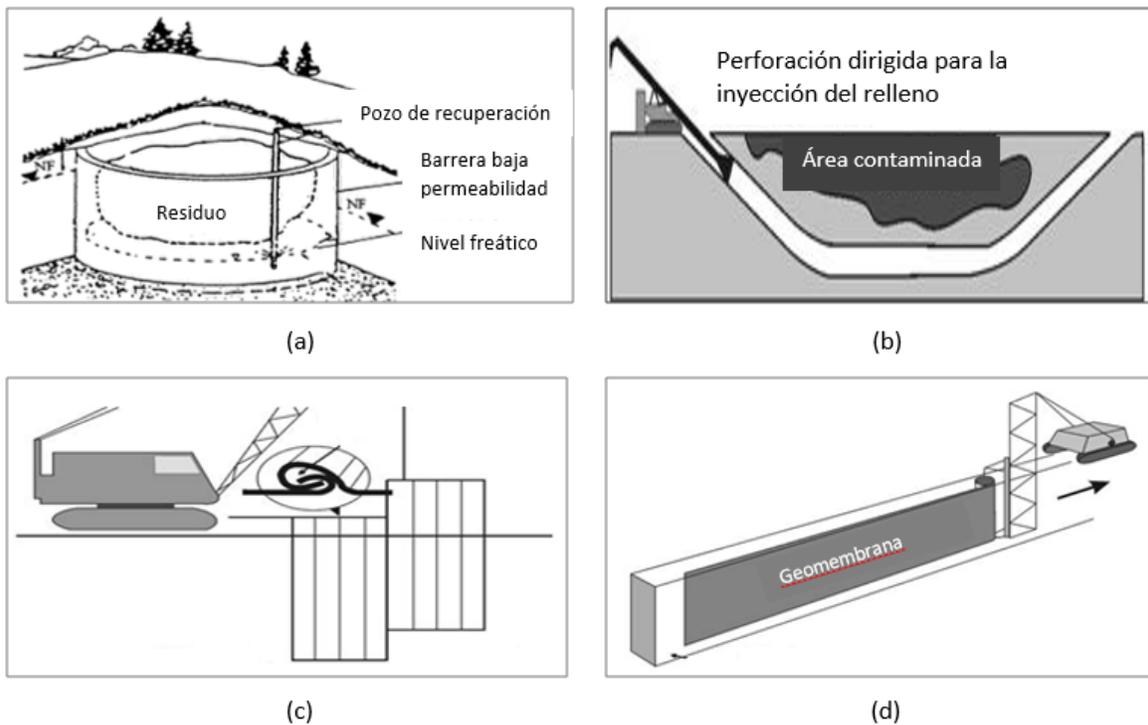
Otros tipos de relleno para la trinchera son mezclas de suelo con arcillas como sepiolita ( $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ ) que confieren estanqueidad a la barrera; el uso de cemento o geomembranas se da en casos donde las medidas de control son más rigurosas, se requiere mayor fuerza estructural o si existen incompatibilidades químicas entre la bentonita y los contaminantes presentes. (Ortiz, 2009)

Respecto a su instalación, típicamente son trincheras de configuración circular a profundidades de hasta 30m y generalmente con 0.6 a 1.2m de grosor, además, típicamente se fijan sobre una capa de baja permeabilidad en el subsuelo (arcilla o la propia roca madre), disminuyendo la probabilidad de fuga. Para contaminantes de baja densidad como combustibles y gases, existe una instalación alternativa en la que la barrera se coloca de manera suspendida dentro del nivel freático a fin de impedir el movimiento del contaminante. (Ortiz, 2009)

Otras técnicas para la instalación de barreras son: (UCLM, 2005)

- **Perforación dirigida:** Consiste en la inyección de una capa continua de cemento (u otra mezcla impermeabilizante) bajo el perímetro inferior del área contaminada.
- **Barreras con paneles:** Consiste en implantar barreras formadas por paneles, cemento, hormigón armado o acero, de forma que puedan penetrar en el terreno sin necesidad de excavación.
- **Membranas sintéticas (geomembranas):** Son un tipo de barrera textil con baja permeabilidad, se instalan con la correspondiente excavación en el entorno del área afectada.

Una representación de las técnicas antes mencionadas se puede observar en la *Figura 6.10*



*Figura 6.10.* (a) Barrera de trinchera circular, (b) Barrera por perforación dirigida, (c) Barrera con inserción de paneles, (d) Barrera con geomembrana.

Fuente: (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1996; UCLM, 2005)

La función más común de una barrera vertical es servir como apoyo a los sistemas de tratamiento y extracción de agua subterránea contaminada, pues delimita el agua a tratar y evita la contaminación de más agua impidiendo el ingreso de agua subterránea limpia al predio, eficientizando el tiempo de operación del sistema de tratamiento y los costos asociados a ello. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1996)

Esta tecnología ha demostrado su efectividad conteniendo más del 95% de agua subterránea no contaminada, sin embargo, en aplicaciones con agua contaminada, tipos específicos de contaminantes pueden degradar los componentes de la barrera y reducir su efectividad a largo plazo. (FRTR, 2007)

**Consideraciones** (Lenoir & Tornari, 2004; Ortiz, 2009; FRTR, 2007)

- De implementación cuando la contaminación está muy localizada (etapas tempranas de contaminación) debido el bajo costo y facilidad de instalación que representa en comparación con las tecnologías de rehabilitación del sitio y cuando la extensión de las áreas afectadas es tal que no es viable eliminar la contaminación por su elevado costo.
- Para profundidades mayores a 30m se deben usar excavadoras sofisticadas, incrementando el costo por unidad de área construida en un factor de tres.
- Los rellenos de suelo-bentonita no soportan el ataque de ácidos, bases, soluciones salinas y algunos químicos orgánicos, estas barreras son potencialmente deterioradas y/o degradadas con el tiempo.

**Ventajas** (Lenoir & Tornari, 2004; Ortiz, 2009; FRTR, 2007)

- Relativamente sencillo, fácil y rápido de implementar.
- Reducción en los costes del sistema de bombeo y tratamiento.
- Pocas operaciones y escaso mantenimiento.
- Permite el uso del terreno durante su implementación.
- Solución a largo plazo para controlar la contaminación

**Desventajas** (Lenoir & Tornari, 2004; Ortiz, 2009; FRTR, 2007)

- No es un sistema que trata o extrae el contaminante del sitio, permanece en él.
- Requiere excavación.
- Su implementación no garantiza que no sean requeridas acciones de restauración futuras.
- Usualmente se requieren esfuerzos considerables de obra civil, su implementación depende del relieve del terreno.

### 6.2.5 Barreras reactivas permeables (BPR)

En esta tecnología el agua subterránea se trata por medio de barreras instaladas en el subsuelo, éstas están constituidas por materiales que las hacen ser permeables al fluido subterráneo y reactivas a los contaminantes de interés, permitiendo de esta forma que cuando el agua subterránea fluya a través de ella, el contaminante sea retenido o transformado a productos inocuos y así, el agua sea descontaminada. (EPA B, 2012; EPA, 2001)

Los mecanismos por los cuales el contaminante es tratado en la barrera permeable son los siguientes: (UCLM, 2005)

**Sorción:** Sucede cuando el contaminante queda adherido a la superficie de la barrera, ejemplo de un material empleado para este fin es el carbón.

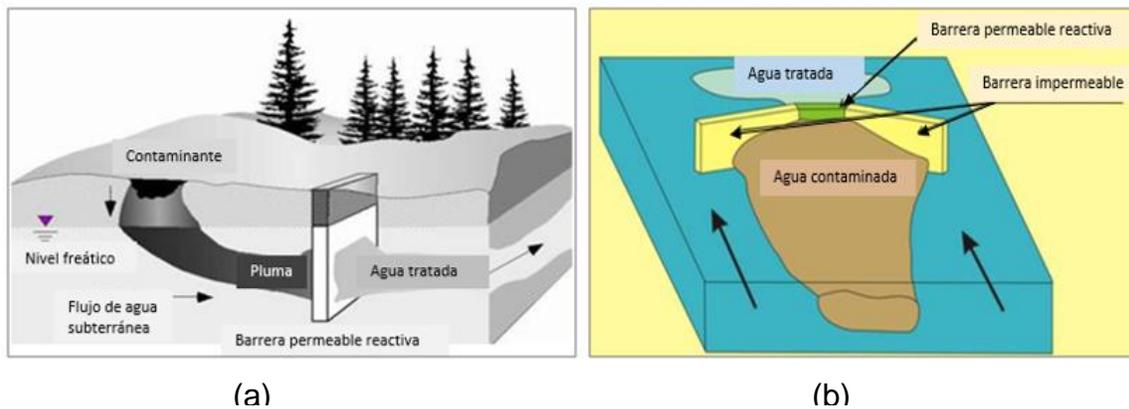
**Precipitación:** Cuando las partículas del contaminante entran en contacto con la barrera se presentan procesos que lo hacen precipitar. Las barreras con caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) proporcionan este comportamiento al igual que agentes quelantes.

**Reacción:** Transformación de sustancias tóxicas a inofensivas. Barreras con hierro están entre las más empleadas por desarrollar reacciones de reducción de los contaminantes, entre sus mayores usos está el tratamiento de compuestos clorados. Metales con valencia cero son empleados para este fin.

**Reacción de biodegradación:** Los nutrientes y oxígeno presentes en la barrera estimulan el crecimiento de microorganismos y biodegradación aeróbica del contaminante.

La construcción de estas barreras es a través de la excavación de zanjas a nivel de la zona saturada y posterior relleno con material reactivo y arena que posibilite el paso del agua; considerando que la permeabilidad de esta barrera deberá ser mayor a la del acuífero para propiciar la circulación del agua a través de ella. (Cortina, 2005)

La disposición común de estas barreras es con un muro continuo perpendicular al flujo de agua o con barreras impermeables semejando un embudo que dirige la pluma de contaminación a una barrera permeable reactiva, ambas disposiciones se muestran en la *Figura 6.11*. (Lenoir & Tornari, 2004)



*Figura 6.11.* Barrera permeable reactiva (a) disposición continua (b) disposición embudo-compuerta. Fuente: (UCLM, 2005)

Para la selección del medio reactivo se debe tomar en cuenta su capacidad para transformar los contaminantes a una velocidad suficientemente elevada, mantener una reactividad adecuada durante largos periodos de tiempo y liberar únicamente compuestos benignos como subproductos. (Cortina, 2005)

El empleo de barreras con hierro para el tratamiento de compuestos clorados es usual. El mecanismo por el cual se trata a este contaminante es a través de la oxidación de hierro ( $Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ ) que fomenta la reducción del hidrocarburo clorado y consecuente remoción del ión cloruro ( $H_2O + RCl \rightarrow RH + OH^{-} + Cl^{-}$ ), destruyendo al contaminante y transformándolo en un hidrocarburo simple (sustitución de cloro por hidrógeno), el cual resulta menos tóxico y más volátil. (Padilla, 2005)

**Consideraciones** (Cortina, 2005; UCLM, 2005; FRTR, 2007)

- Los contaminantes objetivo son COV y COSV, ampliamente usada para solventes clorados.
- Las BPR eliminan muchos tipos de contaminación subterránea y funcionan mejor en sitios de suelos arenosos poco compactos con flujo sostenido de aguas subterráneas, la contaminación no debe encontrarse por debajo de unos 15m de profundidad con la finalidad de ser alcanzable mediante equipos convencionales de excavación.
- Costo-efectividad dudoso para profundidades mayores a 30m.
- Su efectividad es dependiente de la geoquímica del agua subterránea como pH, aniones y cationes mayoritarios presentes.

**Ventajas** (Cortina, 2005; UCLM, 2005; FRTR, 2007)

- No se requiere de bombeo del agua subterránea, resultando económico el tratamiento.
- Bajos costos de operación y mantenimiento.
- No hay costos energéticos pues funcionan con el flujo natural de las aguas.
- Los materiales reactivos no perjudican las aguas subterráneas ni a las personas, los trabajadores que participan en la limpieza no entran en contacto con los contaminantes.
- Relativamente simple de implementar.
- Disposición de pocos desechos.
- La barrera se cubre con tierra y no es visible en la superficie, pudiendo utilizar los terrenos durante el tratamiento.

**Desventajas** (Cortina, 2005; UCLM, 2005; FRTR, 2007)

- A largo plazo la eficiencia de la barrera es menor por el envejecimiento del material reactivo, disminución de la permeabilidad debido a la obstrucción de los poros por precipitación, crecimiento biológico y acumulación de gas (Procesos microbianos reducen el volumen de poro debido a la formación y atrapamiento de hidrógeno gaseoso).

- Puede ser necesario el reemplazo del medio reactivo.
- El tratamiento puede durar muchos años dependiendo del tipo y cantidad de contaminante presente en el agua subterránea, al igual que la velocidad con la que el agua subterránea atraviesa la BPR.
- Tecnología de largo plazo debido a la lentitud del flujo de agua subterránea.
- Re-movilización debida a la disolución de compuestos formados.
- Necesidad de monitoreo del aire durante la excavación.

## CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN

En este capítulo se redactan los argumentos necesarios para la selección final de la tecnología a implementar acorde a los condiciones del sitio caso de estudio.

En el capítulo anterior se mostró la selección preliminar de tecnologías posibles a implementar en el sitio de interés de acuerdo a lo recomendado por la Mesa Redonda de Tecnologías de Rehabilitación (FRTR), a través de la *Tabla 6.4. Tecnologías de restauración más aptas para el tratamiento de COV*, tanto para el suelo como para el agua subterránea, encontrando que para el suelo las tecnologías más recomendadas son Bioventeo, Biopilas, Biorremediación mejorada, Enjuague de suelos, Extracción de vapores del suelo y Desorción térmica; en tanto que para agua subterránea, las tecnologías mejor calificadas fueron Irrigación con aspersores, Biorreactores, Barreras físicas, Separación por aire, Biorremediación mejorada y Barreras reactivas permeables, sin embargo como ya se mencionó éstas son recomendadas para compuestos orgánicos volátiles y se busca en específico para el tratamiento de 1,2-Dicloroetano.

Refiriendo primeramente al suelo, acorde a lo ya investigado y presentado en el capítulo seis, es necesario descartar las tecnologías correspondientes a la biorremediación (por degradación aerobia) ya que aunque ofrece las mayores y más importantes ventajas según la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial (2005); Solanas (2009) y Volke (2002) al eliminar el contaminante y no transferirlo a otro medio, sin dejar a un lado el bajo costo, no se encontraron casos de sitios contaminados por 1,2-DCA rehabilitados con este tipo de tratamiento.

Martínez (2005) y Hage & Sybe (1999) elaboraron un informe en el que hacen una recopilación bibliográfica de bacterias aerobias que fueron capaces degradar el 1,2-DCA en algunos estudios, sin embargo, esto no es suficiente para su implementación a gran escala y garantizar el éxito del tratamiento, pues de acuerdo con la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial (2005) y Solanas (2009), esta tecnología es altamente dependiente del tipo de contaminante al igual que de las condiciones del sitio.

Respecto al Enjuague de suelos, CLU-IN (2015) y EPA (1996), la consideran una tecnología agresiva al remover el contaminante con productos químicos que modifican las propiedades fisicoquímicas del suelo, deteriorándolo y modificando su uso futuro.

Mulligan, et al. (2000) menciona que esta tecnología ha sido comprobada e implementada exitosamente para COV clorados, logrando altos porcentajes de remoción, sin embargo, la introducción de agentes químicos al medio poroso y cantidad que se introduce, posibilita en gran medida la propagación de la contaminación en el suelo, limitando su uso; además, según el reporte de Rehabilitación de sitios Superfund (2010), emitido por la EPA, ha disminuido la implementación de esta tecnología debido al difícil escalamiento de laboratorio a campo; descartando así, esta tecnología como factible para el sitio de interés.

Respecto a la Desorción térmica como posible a ejecutar, Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd., (2010) menciona la necesidad de excavación del emplazamiento y considerando la alta volatilidad del 1,2-Dicloroetano, se evalúa como no factible por el riesgo y alta probabilidad de emisiones sin control, tomando en cuenta que las autoridades ambientales serán las encargadas de aprobar el plan para la rehabilitación y permisos adicionales. Además, como lo menciona Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd., (2010) y Marín (2010) es más recomendado para altas cargas de contaminante considerando el alto costo del tratamiento.

Finalmente, se tiene la Extracción de vapores del suelo, la cual resulta factible tomando en cuenta que la FRTR (2007) y CAM (2014) mencionan que es específica para compuestos volátiles con presión de vapor mayor a 0.5 mmHg, es decir, para el 1,2-DCA con 65 mmHg (a 20°C). Además esta tecnología según el Reporte de Rehabilitación de sitios Superfund (2012), emitido por la EPA, es la más implementada para compuestos orgánicos volátiles por sus rendimientos y costos, además de tener antecedentes de haber sido utilizada en sitios con COV clorados logrando resultados exitosos.

Para su implementación se tiene en cuenta la permeabilidad del sitio, el cual al estar constituido por arenas, arcillas y limos (media a baja permeabilidad), CAM (2014); FRTR (2007) y Lenoir & Tornari (2004) comentan dificultades para el transporte del contaminante en el aire del medio poroso, repercutiendo en el costo de extracción del aire con contaminante; otro factor a considerar es la posible movilización de éste.

Por lo antes comentado, se tiene a la Extracción de vapores del suelo como tecnología seleccionada para implementar en el sitio caso de estudio, siendo la que mayor probabilidad y ventajas alcanzables presenta respecto a las demás.

Por otra parte, se procede a la evaluación de tecnologías para la rehabilitación del agua subterránea del sitio caso de estudio.

Haciendo referencia al tratamiento por biorreactores, se descarta al igual que las tecnologías de biorremediación para suelo, por las mismas razones, en especial por no haber registros de casos que hayan tratado 1,2-Dicloroetano y no poder predecir su biodegradación por microorganismos al ser un tratamiento según la FRTR (2007) altamente dependiente del tipo de contaminante.

Respecto a las barreras físicas, es un tratamiento factible, sin embargo, según el Instituto Tecnológico GeoMinero de España (1996) y FRTR (2007) sólo sirven como mecanismo de contención o apoyo a sistemas de bombeo y tratamiento para evitar la propagación de la contaminación y/o delimitar el sistema de tratamiento, no constituyendo un proceso de rehabilitación del agua subterránea y consecuente descarte como tecnología a usar en el sitio de interés.

Referente al Riego por aspersion de agua subterránea a través de rociadores, Spalding & Exner (2011) ponen de manifiesto la dificultad de su aprobación por autoridades ambientales debido a la liberación no controlada del contaminante hacia la atmósfera, pudiendo ser necesario el desarrollo de un estudio de riesgo. Por los demás aspectos Lenoir & Tornari (2004); FRTR (2007) y Spalding & Exner (2011) la evalúan como una tecnología efectiva de implementar al ser eficaz y presentar costos de operación relativamente bajos.

Respecto al tratamiento de Separación por aire (Air Stripping), la EPA (2012) y Andromalos (2000) consideran esta tecnología como propensa a tener éxito en sitios con compuestos volátiles con constante de Henry mayor a  $0.01 \text{ atm/m}^3\text{mol}$ ; SIGMA-ALDRICH (2015) da un valor de  $0.00091 \text{ atm/m}^3\text{mol}$  para el 1,2-DCA resultando difícil su implementación, sin embargo EPA (2012) y Andromalos (2000) también mencionan la existencia de mecanismos para aumentar la desorción del contaminante del agua y transferencia a la fase gaseosa, como calentamiento del agua y/o de la corriente de aire; en adición, se puede volver a tratar el agua para remover aún más contaminante, siendo esta tecnología factible de implementar..

Por último, haciendo referencia al tratamiento con Barreras reactivas permeables, Padilla (2005) menciona usual el tratamiento de compuestos clorados empleando como reactivo al hierro (Fe), recomendando límites de profundidad efectivos técnica y económicamente hasta los 15m, proponiendo así esta tecnología como competitiva para tratar el 1,2-DCA; considerando que la zona saturada impactada se expande hasta los 17m es posible un incremento en el costo, sobre todo por la excavación.

Este tratamiento según Cortina (2005); ULCM (2005) y FRTR (2007) presenta una ventaja adicional al destruir el contaminante y no transferirlo a otro medio, además de su bajo costo de operación y mantenimiento; una desventaja importante a mencionar es su duración, ya que es una tecnología a largo plazo.

Cualquiera de la dos tecnologías anteriores, Separación por aire (Air Stripping) y Barreras reactivas permeables, son las más factibles de implementar en agua subterránea y se deja a consideración. Realizar pruebas piloto ayudaría a tomar una mejor decisión, aunque también es importante el acoplamiento de las tecnologías para rehabilitación del suelo y del agua subterránea. En este caso, Dorronsoro (2011) explica que el tratamiento por extracción de vapores en el suelo se puede adecuar a la zona saturada y por medio de un alto vacío, extraer vapores y agua subterránea para su posterior tratamiento por Separación con Aire (Air Stripping), juntando así, dos tecnologías de rehabilitación (para suelo y agua subterránea) con mayores ventajas y factibilidad en un tren de tratamiento.

En cualquier caso, realizar pruebas piloto es fundamental para la evaluación final de la tecnología a implementar en el sitio.

Finalmente, se tiene que la tecnología más viable a implementar para el tratamiento de un sitio contaminado en el que suelo y agua subterránea están afectados por 1,2-Dicloroetano, según la investigación realizada, es la de Extracción de vapores y agua subterránea por medio de pozos de extracción, con posterior tratamiento del vapor en contenedores de carbón activado y tratamiento del agua subterránea con Separación por Aire (Air Stripping).

## **CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES**

Se identificaron las tecnologías para la rehabilitación de un sitio contaminado con 1,2-dicloroetano considerando las condiciones del sitio afectado y características del contaminante, encontrando que la mejor opción es un tren de tratamiento conformado por la Extracción de vapores y agua subterránea del suelo, sistema de Separación por aire (Air Stripping) y contenedores de carbón activado.

Aunado a ello, se investigó sobre las técnicas de rehabilitación de sitios contaminados en medios impresos y electrónicos, considerando los últimos seis años se encontró que la información bibliográfica actual acerca de los procesos para remover el contaminante no ha sufrido grandes variaciones y siguen teniendo las mismas bases para su implementación que años atrás; en algunos casos, los procesos han sufrido ligeras modificaciones a fin de mejorar la eficiencia de remoción del contaminante y/o tiempo necesario para rehabilitar el sitio.

Respecto al contaminante 1,2-Dicloroetano se investigaron sus propiedades, usos, aplicaciones y toxicología, concluyendo que: 1) conocidas las propiedades del 1,2-DCA es posible deducir la interacción del contaminante con el medio litológico y así, los mecanismos por los cuales se encuentra retenido en él, las zonas con mayor afectación (y por lo tanto a rehabilitar) y las tecnologías que por sus bases teóricas de operación combaten esta retención y pueden removerlo; 2) conocidos los usos y aplicaciones del contaminante, se puede inferir el tipo de industria que estuvo ahí y/u otros compuestos susceptibles a encontrar en el sitio; 3) la toxicología del 1,2-DCA, permite comprender el riesgo que corren los seres vivos y no vivos por su presencia en el ambiente, contribuyendo a tomar decisiones acerca del tiempo necesario para restaurar el sitio, controles ambientales necesarios durante su ejecución y por lo tanto, la tecnología a implementar.

Por último, también se investigó acerca de las características físico-químicas de las diferentes texturas del suelo, encontrando que dadas sus propiedades es diferente la interacción del contaminante con ellas y por lo tanto su retención, impactando en la tecnología factible a aplicar. Específicamente la fracción arcilla es la que más

problemas presenta al tener una capacidad de adsorción alta y permeabilidad baja que afecta la remoción del contaminante.

## **ANEXOS**

ANEXO I. Matriz para selección de tecnologías de rehabilitación.

Fuente: (FRTR, 2007)

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Actinomiceto:** Microorganismo del suelo caracterizado por ser organismo intermedio entre hongo y bacteria.

**Agente quelante:** Sustancia química que se utiliza para unir iones metálicos y así formar una estructura de anillo.

**Battelle Memorial Institute:** Organización internacional de ciencia y tecnología que explora áreas emergentes de ciencias, desarrollo, comercializa tecnología y administra laboratorios.

**Bentonita:** Arcilla formada por la descomposición de ceniza volcánica, capaz de absorber una enorme cantidad de agua y multiplicar su volumen proporcionalmente.

**Conductividad hidráulica:** Parámetro para evaluar la resistencia que ofrece el suelo al flujo de agua.

**Edafización:** Proceso de intemperismo y erosión mediante el cual las rocas o sedimentos se convierten en suelo.

**Edafología:** Ciencia que se ocupa del estudio de la naturaleza, las condiciones que presentan los suelos y la relación que estos mantienen con los seres vivos que viven sobre ellos, especialmente las plantas, seres vivos que ocupan un lugar fundamental en el suelo.

**Embeber:** Dicho de un cuerpo sólido: Absorber a otro líquido.

**Endógeno:** Que se origina por una causa interna.

**Escoria de fundición:** Sustancia vítrea que flota en el crisol de los hornos de fundir metales, que procede de las impurezas.

**Ex situ:** Tipo de tratamiento en el que se requiere de excavación o proceso en el que se remueve el suelo contaminado antes de tratarse, su tratamiento se da en el mismo sitio (on site) o fuera de él (off site).

**Exógeno:** GEOL. Se produce en la superficie terrestre.

**Fanerítico:** Término textural aplicado a rocas ígneas en las que los cristales constituyentes pueden distinguirse a simple vista.

**Fase libre o Fase líquida no acuosa (NAPL):** Líquido inmiscible en agua que en procesos de contaminación de aguas subterráneas constituye una capa diferenciada del agua.

**Fase líquida no acuosa ligera (LNAPL):** Líquido inmisible en agua de menor densidad que ella y que, por tanto, en procesos de contaminación de aguas subterráneas se presenta flotando sobre el nivel freático.

**Fase líquida no acuosa pesada (DNAPL):** Líquido inmisible en agua de mayor densidad que ella y que, por tanto, en procesos de contaminación de aguas subterráneas tiende a hundirse en la zona saturada y a acumularse en la base del acuífero.

**Fenocristales:** GEOL. Cristal de gran tamaño producido como consecuencia de un enfriamiento lento del magma.

**Filosilicato:** Subclase de los silicatos, su característica principal es su disposición en capas.

**Fotoautótrofo:** Organismo con capacidad de efectuar la fotosíntesis para obtención de energía.

**Galería filtrante:** Conducto casi horizontal permeable (semejante a un dren subterráneo), cerrado, enterrado, rodeado de un estrato filtrante, y adyacente a una fuente de recarga superficial que permite interceptar el flujo natural del agua subsuperficial.

**Geomembrana:** Lámina (membrana) que está en contacto con el suelo (geo), entre sus aplicaciones está impermeabilizar.

**Geotextil:** Material textil permeable de estructura planar usado como parte integral de los suelos y cimentaciones, se caracteriza por su estructura permeable y gran resistencia a la tensión, desgarre y deterioro químico.

**Hormigón:** Material de construcción obtenido al mezclar arena, grava, cemento y agua que, al fraguar y endurecerse, adquiere una notable resistencia.

**Humus:** Capa superior del suelo compuesta por un conjunto de materia orgánica en descomposición.

**In situ:** Tipo de tratamiento en el que el contaminante es removido del suelo sin excavar el sitio, es decir, se realiza en el mismo sitio de la contaminación.

**Jal minero:** Apilamiento de roca molida que queda después de que los minerales de interés han sido extraídos de las rocas que los contienen.

**Ladera:** Cualquiera de los lados en declive de un monte.

**Lignina:** Polímero orgánico que aparece en los tejidos leñosos de los vegetales y que mantiene unidas las fibras de celulosa que los componen.

**Lipofílico:** Capaz de disolver lípidos (grasas), ser disuelto en ellos o absorberlos.

**Litificación:** Proceso, generalmente de compactación y cementación, por el cual los sedimentos se convierten en rocas sedimentarias.

**Mineral:** Sólido natural inorgánico que presenta una estructura interna ordenada y una composición química definida.

**Piroclasto:** Fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica.

**Pluma de contaminación:** Referido a aguas subterráneas, ámbito de un acuífero afectado por un fenómeno de contaminación en un momento dado.

**Vesicular:** Que tiene forma de vesícula.

**Vítreo:** Rocas o partes de roca, que no están constituidas de unidades cristalinas discretas y no presentan estructura cristalina.

**Volcanoclástico:** Característica general del material fragmentado procedente de una erupción volcánica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AgriFarming. (2015). *Sprinkler Irrigation Farming*. Obtenido de AgriFarming:  
<http://www.agrifarming.in/drip-irrigation-vs-sprinkler/> Último acceso: Febrero 2017
- Aguilera, N. (1989). *Tratado de Edafología de México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Andromalos, K. (2000). *Burbujeo de aire (Air Stripping)*. Obtenido de Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/remediacion/tema07.pdf>  
Último acceso: Febrero 2017
- ARC. (2012). *Guía técnica para la evaluación de la problemática del subsuelo asociada a compuestos organoclorados*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- ASTDR. (2016). *1,2-Dicloroetano*. Obtenido de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts38.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts38.html)  
Último acceso: Febrero 2017
- Badía, D. (2011). *Procesos formadores del suelo*. Obtenido de iARASOL. Estudios y clasificación de suelos de Aragón:  
<http://www.suelosdearagon.com/contenido.php?padre=7&IDContenido=7>  
Último acceso: Diciembre 2016
- Bautista, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Bernier, R., & Alfaro, M. (2006). *Acidez de los suelos y efectos del encalado*. Osorno, Chile: América Osorno.
- Beychok, M. (2010). *Air Stripping system*. Obtenido de Citizendium:  
[http://en.citizendium.org/images/0/08/Air\\_Stripping\\_System.png](http://en.citizendium.org/images/0/08/Air_Stripping_System.png)  
Último acceso: Febrero 2017
- Blanco, P., & Garro, M. (2002). *Perfil del suelo*. Obtenido de Formación del suelo:  
<https://sites.google.com/site/formaciondesuelo/perfil-de-suelo>  
Último acceso: Diciembre 2016
- Buckman, H., & Brady, N. (1966). *The Nature and Properties of Soils*. The Macmillan.  
Último acceso: Diciembre 2016

- CAM. (2014). *Remediación "in situ" por el Método de inyección de aire y extracción de vapores orgánicos*. Obtenido de Instituto de Ingeniería UNAM: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/2doCursoSuelosAcuiferos/JerjesPantoja.pdf>  
 Último acceso: Febrero 2017
- CAMIMEX. (2012). *Diatomita*. Obtenido de Cámara minera:  
<https://www.camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-prensa/uso-de-los-metales/diatomita/> Último acceso: Diciembre 2016
- Cano, M. (2014). *Acidez y alcalinidad de los suelos*. Obtenido de Agricultura:  
<http://tiposagricultura.blogspot.mx/2014/07/acidez-y-alcalinidad-de-los-suelos.html>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Casanova, E. (2005). *Introducción a la ciencia del suelo*. Caracas: UCV, Consejo de Desarrollo Científico.
- CENAPRED. (1994). *Tecnologías de tratamiento para la descontaminación de suelos*. Obtenido de Centro Nacional de Prevención de Desastres:  
<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/152-TECNOLOGASDETRATAMIENTOPARALADESCONTAMINACINDESUELOS.PDF>  
 Último acceso: Febrero 2017
- Ciencia y biología. (2014). *Compuestos orgánicos volátiles*. Obtenido de  
<https://cienciaybiologia.com/compuestos-organicos-volaticos-covs-o-vocs/>  
 Último acceso: Enero 2017
- CLU-IN. (2015). *In Situ Flushing*. Obtenido de EPA. Technology Innovation and Field Services Division: [https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/In\\_Situ\\_Flushing/cat/Application/](https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/In_Situ_Flushing/cat/Application/)  
 Último acceso: Febrero 2017
- Collazo, M., & Montaña, J. (2012). *Manual de agua subterránea*. Obtenido de  
<http://www.cebra.com.uy/presponsable/adjuntos/2012/11/Manual-de-agua-subterranea-bajo.pdf> Último acceso: Diciembre 2016
- CONAGUA. (2011). *Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua*. Obtenido de CONAGUA: [http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/sistemas\\_secundarios.pdf](http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/sistemas_secundarios.pdf)  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Conde, G. (2010). *Contaminación de suelos y aguas subterráneas*. Obtenido de  
[http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45692/componente45689.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45692/componente45689.pdf)  
 Último acceso: Diciembre 2016

- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial. (2005). *Biorremediación*. Obtenido de Gobierno de Canarias:  
[http://www.gobiernodecanarias.org/dgse/descargas/pecmar/anejo\\_09/Doc\\_10%20Biorremediacion.pdf](http://www.gobiernodecanarias.org/dgse/descargas/pecmar/anejo_09/Doc_10%20Biorremediacion.pdf) Último acceso: Febrero 2017
- Cortina, J. (2005). *Estudios de los procesos de oxidación de hidrocarburos poliaromáticos (HPA) mediante peróxidos inorgánicos en barreras reactivas permeables*. Obtenido de UNICIENCIA. Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo:  
<http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Tecpanreaperes.pdf>  
Último acceso: Febrero 2017
- Cortinas, C. (2002). *Marco conceptual de la remediación de sitios contaminados*. Obtenido de SEMARNAT:  
<http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/GTZ/G-Marco%20conceptual-completo.pdf> Último acceso: Enero 2017
- Custodio, E., & Llamas, M. (1976). *Hidrología subterránea*. OMEGA.
- Dávila, J. (2011). *Diccionario Geológico*. Obtenido de Academia:  
[http://www.academia.edu/4059077/DICCIONARIO\\_GEOLOGICO](http://www.academia.edu/4059077/DICCIONARIO_GEOLOGICO)  
Último acceso: Diciembre 2016
- Departamento de Desarrollo Sostenible. (2008). *Educación Ambiental para el Trópico de Cochabamba*. Obtenido de Food and Agriculture Organization of the United Nations:  
<http://www.fao.org/docrep/009/ah648s/ah648s07.htm> Último acceso: Diciembre 2016
- Departamento de Petrología y Geoquímica. (2013). *Rocas volcánicas*. Obtenido de Atlas de rocas ígneas: <https://petroignea.wordpress.com/rocas-volcanicas/>  
Último acceso: Diciembre 2016
- DGGIMAR/SEMARNAT. (2009). *Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados*. Obtenido de SEMARNAT:  
[http://www.inafed.gob.mx/work/foro\\_desde\\_lo\\_local/memorias/6\\_foro/remediacion.pdf](http://www.inafed.gob.mx/work/foro_desde_lo_local/memorias/6_foro/remediacion.pdf)  
Último acceso: Diciembre 2016
- DGGIMAR/SEMARNAT. (2014). *La gestión en la remediación y reutilización de sitios contaminados en México*. Obtenido de SEMARNAT: <http://www.palabras-fuertes.com/subidas-provisionales/relasc-mex-2014/taller-perspectivas-fin-ponencias/01-semarnat-gestion.pdf>  
Último acceso: Diciembre 2016

- DOF. (2016). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Obtenido de Cámara de Diputados: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148\\_130516.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_130516.pdf)  
 Último acceso: Diciembre 2016
- DOF A. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Obtenido de Cámara de Diputados: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263\\_220515.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_220515.pdf)  
 Último acceso: Diciembre 2016
- DOF A. (2014). *Ley de Aguas Nacionales*. Obtenido de Cámara de Diputados.
- DOF B. (2003). *Manual de Organización General de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Obtenido de SEMARNAT:  
<http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/conocenos/Documents/Manual%20de%20Organizaci%C3%B3n%20General%20de%20la%20Semarnat.pdf>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- DOF B. (2014). *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Obtenido de Cámara de Diputados:  
[www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LGPGIR\\_311014.doc](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR_311014.doc)  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Dorronsor A, Carlos. (2011). *Descontaminación de suelos*. Obtenido de Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada España:  
<http://www.edafologia.net/desconta/sve1.pdf> Último acceso: Diciembre 2016
- Dorronsor B , Carlos. (2016). *Propiedades fisicoquímicas del suelo*. Obtenido de Libros web, monografías, trabajos de investigación, conferencias, atlas sobre Edafología y los suelos.
- EMGRISA. (2016). *Desorción térmica*. Obtenido de Gestión de residuos, tratamiento de suelos y aguas contaminadas: <http://www.emgrisa.es/wiki/desorcion-termica/>  
 Último acceso: Febrero 2017
- Environmental Science & Technology. (1997). *Sprinkler irrigation destroy VOCs*. Obtenido de ACS Publications: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es972543n>  
 Último acceso: Febrero 2017
- EPA. (2001). *Guía del ciudadano para Barreras Reactivas Permeables*. Obtenido de EPA:  
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/prb-sp-12-6.pdf>  
 Último acceso: Febrero 2017
- EPA A. (1996). *Guía del ciudadano: El enjuague del suelo in situ*. Obtenido de Contaminated Site. Clean-Up Information: <https://clu-in.org/download/remed/spanflus.pdf>  
 Último acceso: Febrero 2017

- EPA A. (2012). *A Citizens's Guide to Thermal Desorption*. Obtenido de CLU-IN: [https://clu-in.org/download/Citizens/a\\_citizens\\_guide\\_to\\_thermal\\_desorption.pdf](https://clu-in.org/download/Citizens/a_citizens_guide_to_thermal_desorption.pdf)  
 Último acceso: Febrero 2017
- EPA B. (1996). *Guía del ciudadano: La extracción de vapores del suelo y la aspersión de aire*. Obtenido de CLU-IN: <https://clu-in.org/download/remed/spansve.pdf>  
 Último acceso: Febrero 2017
- EPA B. (2012). *Guía del ciudadano sobre la reducción química in situ*. Obtenido de CLU-IN: [https://clu-in.org/download/citizens/EPA-542-F-12-012S\\_guia\\_del\\_ciudadano\\_sobre\\_la\\_reduccion\\_quimica\\_in\\_situ.pdf](https://clu-in.org/download/citizens/EPA-542-F-12-012S_guia_del_ciudadano_sobre_la_reduccion_quimica_in_situ.pdf)  
 Último acceso: Febrero 2017
- EPA C. (2012). *Guía del ciudadano sobre la separación por aire*. Obtenido de CLU-IN: [https://clu-in.org/download/citizens/EPA-542-F-12-002S\\_guia\\_del\\_ciudadano\\_sobre\\_la\\_separacion\\_por\\_aire.pdf](https://clu-in.org/download/citizens/EPA-542-F-12-002S_guia_del_ciudadano_sobre_la_separacion_por_aire.pdf)  
 Último acceso: Febrero 2017
- ERCROS. (2012). *1,2-Dicloroetano*. Obtenido de ERCROS: [http://www.ercros.es/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=15&Itemid=&lang=es](http://www.ercros.es/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=15&Itemid=&lang=es) Último acceso: Enero 2017
- Errazuriz, A., Cereceda, P., Gonzalez, J., Gonzalez, M., Henriquez, M., & Rioseco, R. (1998). *Manual de Geografía de Chile*. Santiago, Chile: Andres Bello.
- Escolástico, C., Cabildo, M., Claramunt, R., & Claramunt, T. (2013). *Ecología I: Introducción. Organismos y poblaciones*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- ESTRUCPLAN. (2008). *Ingeniería de tratamiento de aguas residuales: Procesos biológicos aerobios*. Obtenido de Estructplan Consultora S.A. Argentina: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2521>  
 Último acceso: Enero 2017
- FAO. (2016). *Propiedades físicas del suelo*. Obtenido de Portal de suelos de la FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/> Último acceso: Diciembre 2016
- FRTR. (2007). *Technology Sceening Matrix*. Obtenido de Federal Remediation Technologies Roundtable: <https://frtr.gov/scrntools.htm> Último acceso: Febrero 2017
- Fuentes, J. (2008). *Aguas subterráneas*. Obtenido de Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente:

- [http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd\\_1992\\_01.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1992_01.pdf)  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Gardi, C., Agelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz, C., Encina, A., . . . Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Obtenido de Food and Agriculture Organization of the United Nations:  
[http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/AGRO\\_Noticias/docs/Suelos\\_LAC\\_UE.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/Suelos_LAC_UE.pdf)  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Geología on line. (2011). *Obsidiana*. Obtenido de Geología on line: <http://geologia-online.blogspot.mx/2011/06/obsidiana.html> Último acceso: Diciembre 2016
- Geotecnia . (2008). *Descontaminación de suelos y aguas subterráneas contaminadas por hidrocarburos mediante biopilas activas*. Obtenido de Geotecnia:  
<http://www.geotecnia2000.com/files/archivos/DESCONTAMINACION%20DE%20SUELOS%20Y%20AGUAS%20SUBTERRANEAS%20CONTAMINADAS%20POR%20HIDROCARBUROS%20MEDIANTE%20BIOPILAS%20ACTIVAS.pdf> Último acceso: Febrero 2017
- Hage, J., & Sybe, H. (1999). *Monooxygenase-Mediated 1,2-Dichloroethane Degradation by Pseudomonas sp. Strain DCA1*. Obtenido de National Center for Biotechnology Information: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/> Último acceso: Febrero 2017
- Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M., Bojórquez, J., García, N., & García, J. (2006). *El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo*. Universidad Autónoma de Nayarit.
- Ibáñez, J. (2006). *La acidez del suelo*. Obtenido de Comunidad de madrid:  
<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/11/01/49004>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- INEGI. (2015). *Colima*. Obtenido de Cuéntame:  
<http://www.cuentame.org.mx/monografias/informacion/col/territorio/clima.aspx?tema=me&e=06> Último acceso: Enero 2017
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1996). *Suelos contaminados*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Obtenido de bdigital:  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf> Último acceso: Diciembre 2016
- Javiera, O. (2010). *Las rocas y sus procesos de formación*. Obtenido de Departamento de Geología Universidad de Chile: <http://www.geologia.uchile.cl/las-rocas-y-sus-procesos-de-formacion> Último acceso: Diciembre 2016

- Juárez, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Junco, J. (08 de Abril de 2015). *Escorrentía*. Obtenido de Monitoreo Ambiental:  
<http://www.monitoreoambiental.com/escorrentias/> Último acceso: Diciembre 2016
- Kapelle, M. (2009). *Erosión de suelos*. Obtenido de Diccionario Enciclopédico Dominicano de Medio Ambiente:  
<http://www.diccionariomedioambiente.org/DiccionarioMedioAmbiente/es/pdf/erosion.pdf>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Lenoir, C., & Tornari, L. (2004). *Contaminación y tratamiento de suelo*. Obtenido de Universidad Abierta Interamericana:  
[http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/cont\\_y\\_tratam\\_suelos.pdf](http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/ing/cont_y_tratam_suelos.pdf)  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Marín, A. (2010). *Optimización de los tratamientos de desorción térmica de suelos contaminados por hidrocarburos derivados del petróleo*. Obtenido de Archivo Digital UPM:  
[http://oa.upm.es/3703/1/ANA\\_FABIOLA\\_MARIN\\_SAN\\_PEDRO.pdf](http://oa.upm.es/3703/1/ANA_FABIOLA_MARIN_SAN_PEDRO.pdf)  
 Último acceso: Febrero 2017
- Martínez, T. (2005). *Remoción de 1,2 Dicloroetano en un reactor biológico aerobio de lecho fluidizado*. México.
- Mena, J. (2009). *Rocas ígneas*. Obtenido de Guía de minerales y rocas:  
<http://geologia.byethost17.com/petrologia/plutonicas/gabro2.htm?ckattempt=1>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Mercado, F. (2006). *Contaminantes orgánicos volátiles*. Obtenido de Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental:  
<http://www.bvsde.paho.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-04a18.pdf>  
 Último acceso: Enero 2017
- Merck Millipore. (2015). *1,2-Dicloroetano*. Obtenido de  
[https://www.merckmillipore.com/MX/es/product/1%2C2-Dicloroetano,MDA\\_CHEM-100955](https://www.merckmillipore.com/MX/es/product/1%2C2-Dicloroetano,MDA_CHEM-100955)  
 Último acceso: Enero 2017
- Minera de rocas. (2008). *El granito, la roca ígnea*. Obtenido de Minera de rocas:  
<http://www.mineraderocas.es/granito/grisalba/> Último acceso: Diciembre 2016
- Ministerio de Agricultura y Pesca. (2008). *Compuestos orgánicos volátiles*. Obtenido de  
[http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos\\_organicos\\_volatiles.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx)  
 Último acceso: Diciembre 2016

- Ministerio de Educación cultura y deporte. (2008). *El relieve terrestre*. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado.intef:  
<http://recursostic.educacion.es/ciencias/biosfera/web/alumno/2ESO/tierrin/contenidos9.htm>  
Último acceso: Diciembre 2016
- Mulas, R. (2008). *Fundamentos de biorremediación*. Obtenido de Universidad Nacional Abierta y a Distancia:  
[http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358046/ENTORNO\\_DE\\_CONOCIMIENTO/UNIDAD\\_2/Fundam\\_Biorremediacion.pdf](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358046/ENTORNO_DE_CONOCIMIENTO/UNIDAD_2/Fundam_Biorremediacion.pdf) Último acceso: Febrero 2017
- Mulligan, C., Yong, R., & Gibbs, B. (2000). *Surfactant-enhanced remediation of contaminated*. Obtenido de University of Alberta:  
<https://sites.ualberta.ca/~mrscott/host/hw/400/sdarticle5.pdf> Último acceso: Febrero 2017
- NAVFAC. (2012). *Soil Flushing*. Obtenido de Naval Facilities Engineering Command:  
[http://www.navfac.navy.mil/navfac\\_worldwide/specialty\\_centers/exwc/products\\_and\\_services/ev/erb/tech/rem/soilflush.html#pubs](http://www.navfac.navy.mil/navfac_worldwide/specialty_centers/exwc/products_and_services/ev/erb/tech/rem/soilflush.html#pubs) Último acceso: Febrero 2017
- Ortega, L. (2012). *El suelo. Edafología*. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado:  
[http://roble.pntic.mec.es/lorg0006/dept\\_biologia/archivos\\_texto/ctma\\_t10\\_suelo.pdf](http://roble.pntic.mec.es/lorg0006/dept_biologia/archivos_texto/ctma_t10_suelo.pdf)  
Último acceso: Diciembre 2016
- Ortiz, I. (2009). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Obtenido de Jardinería, Agricultura y Medio Ambiente:  
[http://www.jaravalencia.com/docu/Recuperacion\\_suelos\\_contaminados.pdf](http://www.jaravalencia.com/docu/Recuperacion_suelos_contaminados.pdf)  
Último acceso: Enero 2017
- Oyarzún, R. (2007). *Transporte de contaminates en aguas subterráneas*. Obtenido de Geología-Botánica-Medioambiente-Sociedad:  
[http://www.aulados.net/Temas\\_ambientales/Contaminantes\\_aguas\\_subterraneas/Transporte\\_contaminantes.pdf](http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Contaminantes_aguas_subterraneas/Transporte_contaminantes.pdf) Último acceso: Enero 2017
- Pacheco, C. (2015). *Importancia de la materia orgánica y la salud del suelo en la agricultura*. Obtenido de Revista Ambiental Corriente Verde: <http://goo.gl/Y5jrpu>  
Último acceso: Diciembre 2016
- Padilla. (2005). Tratamiento de efluentes acuosos contaminados con compuestos organoclorados. *Ingeniería del agua*.
- Padilla, F. (2009). *Ingeniería geológica*. Obtenido de Escuela técnica superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos:

- [http://caminos.udc.es/info/asignaturas/obras\\_publicas/106/pdfs/GMT%2009%20Notas%20V.pdf](http://caminos.udc.es/info/asignaturas/obras_publicas/106/pdfs/GMT%2009%20Notas%20V.pdf) Último acceso: Diciembre 2016
- PEMEX Exploración y Producción. (2010). *Aplicación de la normatividad*. Obtenido de Aprendizaje virtual PEMEX:  
[http://aprendizajevirtual.pemex.com/nuevo/guias\\_pdf/Guia\\_Aplicacion\\_de\\_la\\_Normatividad.pdf](http://aprendizajevirtual.pemex.com/nuevo/guias_pdf/Guia_Aplicacion_de_la_Normatividad.pdf) Último acceso: Diciembre 2016
- Pozo, M., Giner, J., Carenas, M., & González, J. (2014). *Geología*. Madrid: Paraninfo.
- Pulido, A. (2007). *Nociones de hidrogeología para ambientólogos*. Universidad de Almería.
- Purdue University West Lafayette. (2007). *Guidance Document for In-situ soil flushing*. Obtenido de Purdue University: <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2578&context=jtrp>  
 Último acceso: Febrero 2017
- RACEFN . Obtenido de Universidad de Granada:  
[http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac\\_geologia/rac.htm](http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm) Último acceso: Diciembre 2016
- Richardson, T., & Sahle-Demessie, E. (2010). *Sprinkler Irrigation for the removal of VOCs from groundwater*. Obtenido de International Association for Hydro-Environment Engineering and research:  
<http://iahr.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593331908616762?needAccess=true&journalCode=tent20> Último acceso: Febrero 2017
- Rocha, P. (2015). *Edafología*. Obtenido de Ciencia y biología:  
<http://cienciaybiologia.com/edafologia-iii-nomenclatura-abc-del-suelo/>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Roldán, A., & Iturbe, R. (2005). *Saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos mediante biopilas*. Obtenido de ResearchGate:  
[https://www.researchgate.net/profile/Rosario\\_Iturbe2/publication/237751497\\_SANEAMIENTO\\_DE\\_SUELOS\\_CONTAMINADOS\\_CON\\_HIDROCARBUROS\\_MEDIANTE\\_BIOPILAS/links/55c69208aebbb8f577ade.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Rosario_Iturbe2/publication/237751497_SANEAMIENTO_DE_SUELOS_CONTAMINADOS_CON_HIDROCARBUROS_MEDIANTE_BIOPILAS/links/55c69208aebbb8f577ade.pdf) Último acceso: Enero 2017
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Obtenido de Facultad de Agronomía:  
<http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Rueda, V. (2015). *Bioventing*. Obtenido de Ecosistema Tierra:  
<http://ecosistematierra.blogspot.com/2015/07/bioventing.html> Último acceso: Enero 2017

- Salazar , S., Gonzales, L., & Arias, L. (2008). *Litoestratigrafía y pedoestratigrafía de los depósitos recientes en el altiplano de Santa Rosa de Osos*. Obtenido de bdigital. Portal de revistas UN: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/9236/11130>  
 Último acceso: Enero 2017
- Sánchez, J. (2008). *Transporte de contaminantes*. Obtenido de Hidrogeología: [http://hidrologia.usal.es/temas/Transporte\\_de\\_contaminantes.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Transporte_de_contaminantes.pdf)  
 Último acceso: Enero 2017
- SCJN. (2006). *El Sistema Jurídico Mexicano*. Obtenido de Suprema Corte de Justicia de la Nación: <https://www.scjn.gob.mx/conocelacorte/documents/publicaciones/sistema-juridico-mexicano.pdf> Último acceso: Diciembre 2016
- SEMARNAT. (2015). *Leyes y Normas* . Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/normas-oficiales-mexicanas>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- SGM. (2009). *Estudio de gran visión sobre las condiciones geológico-geotécnicas en el trazo del gasoducto Manzanillo-Guadalajara a lo largo de 263 Km*. Obtenido de Sistema Geológico Mexicano: [https://mapserver.sgm.gob.mx/ArchivoTecnico/Arch\\_Estado3.jsp](https://mapserver.sgm.gob.mx/ArchivoTecnico/Arch_Estado3.jsp)  
 Último acceso: Enero 2017
- Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd. (2010). *Thermal Desorption*. Obtenido de Shanghai Yu Kai Energy Technology Co., Ltd.: [http://www.shyukai.com.cn/EN/en\\_product/chanpin01/127.html](http://www.shyukai.com.cn/EN/en_product/chanpin01/127.html)  
 Último acceso: Febrero 2017
- SIGMA-ALDRICH. (2015). *Safety Data Sheet 1,2-Dicloroetano*. Obtenido de SIGMA-ALDRICH: <http://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=MX&language=es&productNumber=284505&brand=SIAL&PageToGoToURL=http%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Fsial%2F284505%3Flang%3Des>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Smart Fertilizer Managment. (2016). *El boro en las plantas*. Obtenido de Fertilizer Managment: <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/boron> Último acceso: Diciembre 2016
- Solanas, A. (2009). *La biodegradación de hidrocarburos y su aplicación en la biorremediación de suelos*. Obtenido de CIMNE Congress Bureau: <http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p422.pdf>  
 Último acceso: Enero 2017

- Spalding, R., & Exner, M. (2011). *Sprinkler irrigation; a VOC remediation alternative*. Obtenido de Kansas State university: <https://www.engg.ksu.edu/HSRC/ag/2002/proceed/c04.pdf>  
 Último acceso: Febrero 2017
- Spalletti, L. (2009). *Rocas fosfáticas-fosforitas*. Obtenido de Facultad de ciencias naturales y museo: <http://www.fcnym.unlp.edu.ar/catedras/sedimentologia/pdf/fosforitas.pdf>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Suelo* . Obtenido de Glosarios de términos especializados de las Ciencias, las Artes, las Técnicas y la Sociedad: <http://glosarios.servidor-alicante.com/geologia/suelo-geosuelo>  
 Último acceso: Diciembre 2016
- Superfund Remedy Report*. (2010). Obtenido de Clean-Up Information: [https://clu-in.org/download/remed/asr/13/SRR\\_13th\\_MainDocument.pdf](https://clu-in.org/download/remed/asr/13/SRR_13th_MainDocument.pdf) Último acceso: Enero 2017
- Suprema Corte de Justicia de la Nación. (2016). *Tratados Internacionales de los que el Estado Mexicano es parte en los que se reconocen los derechos humanos*. Obtenido de Suprema Corte de Justicia de la Nación: <http://www2.scjn.gob.mx/red/constitucion/TI.html#MEDIO AMBIENTE> Último acceso: Diciembre 2016
- UCLM. (2005). *Restauración y remediación III: Suelos y aguas subterráneas*. Obtenido de Universidad de Castilla-La Mancha: <http://www.uclm.es/users/higueras/MAM/MAM10.htm#Biblio10> Último acceso: Enero 2017
- Ultrapure TECH. (2011). *Biorreactores de membrana MBR*. Obtenido de Ultrapure TECH. Tratamientos del agua: [http://www.ultrapure.info/productos\\_MBR/biorreactores\\_membrana\\_MBR.asp](http://www.ultrapure.info/productos_MBR/biorreactores_membrana_MBR.asp)  
 Último acceso: Febrero 2017
- UNAD Colombia. (2010). *Procesos de flujo y transporte de contaminantes*. Obtenido de Propiedades y contaminación del suelo: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358013/ContenidoEnLinea/leccin\\_12\\_procesos\\_de\\_flujo\\_y\\_transporte\\_de\\_contaminantes.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358013/ContenidoEnLinea/leccin_12_procesos_de_flujo_y_transporte_de_contaminantes.html) Último acceso: Enero 2017
- Valencia, C. (2009). *Química de suelos* . Obtenido de Agrícola UNAM: <http://www.agricolaunam.org.mx/edafologia/PAPIME%20APUNTES%20QUIMICA%20DE%20SUELOS/Quimica%2008.pdf> Último acceso: Diciembre 2016
- Vallejo, V., & Salgado, L. (2005). *Evaluación de la bioestimulación en la biodegradación de TPHs en suelos contaminados con petróleo*. Obtenido de <file:///C:/Users/Lucero/Downloads/Dialnet->

EvaluacionDeLaBioestimulacionEnLaBiodegradacionDeT-2351601.pdf

Último acceso: Enero 2017

Velasco, J., & Volke, T. (2002). *Tecnologías deremediación para sitios contaminados*. México: Instituto Nacional de Ecología.

Villasuso, R., Rubinos, D., Barral, R., & Díaz-Fierros, F. (2008). Biocorrección de suelos contamiandos con isómeros de hexaclorociclohexano mediante técnicas de landfarming y biopilas. *Edafología*, 53-72.

Volke, T. (2002). *Biorremediación de suelos contaminados*. Obtenido de Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería:

[http://www.smbb.com.mx/revista/Revista\\_2002\\_1/biorremediacion.pdf](http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2002_1/biorremediacion.pdf)

Último acceso: Febrero 2017

Yajara, A. (2014). *Mecánica de suelos*. Obtenido de Academia:

[http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES\\_FISICAS\\_Y\\_MECANICAS\\_DE\\_LOS\\_SUELOS](http://www.academia.edu/6386237/PROPIEDADES_FISICAS_Y_MECANICAS_DE_LOS_SUELOS) Último acceso: Diciembre 2016



# TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance					Availability	Nonhalogenated VOC's	Halogenated VOC's	Nonhalogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
<b>Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge</b>																
<b>3.1 In Situ Biological Treatment</b>																
4.1 Bioventing	●	●	●	●	●	●	○	●	●	◇	●	○	●	○	◇	○
4.2 Enhanced Bioremediation	●	●	○	○	○	○	○	●	●	●	◇	●	◇	◇	◇	●
4.3 Phytoremediation	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	◇	○	○	○	○	○
<b>3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment</b>																
4.4 Chemical Oxidation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.5 Electrokinetic Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.6 Fracturing	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.7 Soil Flushing	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.8 Soil Vapor Extraction	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.9 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.3 In Situ Thermal Treatment</b>																
4.10 Thermal Treatment	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.4 Ex Situ Biological Treatment (assuming excavation)</b>																
4.11 Biopiles	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	◇	●	◇	○	○	○
4.12 Composting	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	◇	●	○	○	○	○
4.13 Landfarming	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.14 Slurry Phase Biological Treatment	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.5 Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming excavation)</b>																
4.15 Chemical Extraction	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.16 Chemical Reduction/Oxidation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.17 Dehalogenation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.18 Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.19 Soil Washing	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.20 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.6 Ex Situ Thermal Treatment (assuming excavation)</b>																
4.21 Hot Gas Decontamination	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.22 Incineration	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.23 Open Burn/Open Detonation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.24 Pyrolysis	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.25 Thermal Desorption	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.7 Containment</b>																
4.26 Landfill Cap	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.27 Landfill Cap Enhancements/Alternatives	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.8 Other Treatment</b>																
4.28 Excavation, Retrieval, Off-Site Disposal	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>Ground Water, Surface Water, and Leachate</b>																
<b>3.9 In Situ Biological Treatment</b>																
4.29 Enhanced Bioremediation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.30 Monitored Natural Attenuation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.31 Phytoremediation	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.10 In Situ Physical/Chemical Treatment</b>																
4.32 Air Sparging	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.33 Bioslurping	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.34 Chemical Oxidation	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.35 Directional Wells (enhancement)	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.36 Dual Phase Extraction	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.37 Thermal Treatment	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.38 Hydrofracturing Enhancements	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.39 In-Well Air Stripping	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.40 Passive/Reactive Treatment Walls	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.11 Ex Situ Biological Treatment</b>																
4.41 Bioreactors	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.42 Constructed Wetlands	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.12 Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming pumping)</b>																
4.43 Adsorption/Absorption	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.44 Advanced Oxidation Processes	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.45 Air Stripping	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.46 Granulated Activated Carbon/Liquid Phase Carbon Adsorption	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.47 Groundwater Pumping/Pump & Treat	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.48 Ion Exchange	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.49 Precipitation/Coagulation/Flocculation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.50 Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.51 Sprinkler Irrigation	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.13 Containment</b>																
4.52 Physical Barriers	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.53 Deep Well Injection	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
<b>3.14 Air Emissions/Off-Gas Treatment</b>																
4.54 Biofiltration	●	N/A	●	●	◇	●	●	○	○	○	○	○	○	○	I/D	◇
4.55 High Energy Destruction	○	N/A	I/D	I/D	○	○	I/D	○	○	○	○	○	○	○	I/D	○
4.56 Membrane Separation	○	N/A	I/D	I/D	○	○	I/D	○	○	○	○	○	○	○	I/D	○
4.57 Oxidation	○	N/A	○	○	○	○	I/D	○	○	○	○	○	○	○	I/D	○
4.58 Scrubbers	●	N/A	○	○	○	○	I/D	○	○	○	○	○	○	○	I/D	I/D
4.59 Vapor Phase Carbon Adsorption	●	N/A	●	●	○	○	I/D	○	○	○	○	○	○	○	I/D	○

## TABLE 3-1: DEFINITION OF SYMBOLS USED IN THE TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

Factors	● Above Average	○ Average	○ Below Average	Other	
<b>Development Status</b> Scale status of an available technology	Implemented as part of the final remedy at multiple sites, well documented, understood, etc.	Has been implemented at full scale but still needs improvements, testing, etc.	Not been fully implemented but has been tested (pilot, bench, lab scale) and is promising	◇ Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application/design  N/A "Not Applicable"  I/D "Insufficient Data"	
<b>Treatment Train</b> Is the technology only effective as part of the treatment train?	Stand-alone technology (not complex in terms of number of media/treatment technologies, maybe one "routine" technology in addition)	Relatively simple (two-car train or so), and well understood, widely applied, etc.	Complex (more technologies, media to be treated, generates excessive waste, etc.)		
<b>Relative overall cost and performance</b>	<b>O&amp;M</b> Operation and Maintenance Intensive	Low degree of O&M intensity	Average degree of O&M intensity		High degree of O&M intensity
	<b>Capital</b> Capital Intensive	Low degree of capital investment	Average degree of capital investment		High degree of capital investment
	<b>System Reliability/Maintainability</b> The expected range of demonstrated reliability and maintenance relative to other effective technologies	High reliability and low maintenance	Average reliability and average maintenance		Low reliability and high maintenance
<b>Relative overall cost and performance</b>	<b>Relative Costs</b> Design, construction, and operations and maintenance (O&M) costs of the core process that defines each and pre-and post-treatment	Low degree of general costs relative to other options	Average degree of general costs relative to other options	High degree of general costs relative to other options	
	<b>Time</b> Time required to clean up a "standard" site using the technology	in situ soil	Less than 1 year	1-3 years	More than 3 years for in situ soil
		ex situ soil	Less than 0.5 year	0.5-1 year	More than 1 year for ex situ soil
<b>Availability</b> Number of vendors that can design, construct, and maintain the technology	More than 4 vendors	2-4 vendors	Fewer than 2 vendors		
<b>Contaminants Treated</b> Contaminants are classified into eight groups: - Nonhalogenated VOCs - Halogenated VOCs - Nonhalogenated SVOCs - Halogenated SVOCs	Effectiveness Demonstrated at Pilot or Full Scale	Limited Effectiveness Demonstrated at Pilot or Full Scale	No Demonstrated Effectiveness at Pilot or Full Scale	Same as above	