



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

BIOPILAS COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO
PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA
(A M B I E N T A L)

PRESENTA:

ING. GLADYS ADRIANA ROLDÁN MARTÍN

795506

DIRIGIDA POR: DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES



CIUDAD UNIVERSITARIA

AGOSTO de 2001



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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

A Dios:

Gracias por todo

A mis padres Guadalupe y Ezequiel:

*Como muestra de agradecimiento
Por su amor y apoyo incondicional
Por sus sabios consejos y dedicación
Por todos los sacrificios que realizaron
Por todo Gracias*

A mis hermanos Isabel y Ezequiel:

*Por su cariño y paciencia
Por darme la confianza de saber que cuento ustedes
Por ser parte de mi*

A Germán Salgado:

*Por su gran amor
Por llenar mi vida de dulzura y cariño
Te amo*

Agradecimientos:

A la Doctora Rosario Iturbe Argüelles mi profundo agradecimiento por su apoyo proporcionado en la dirección de la presente Tesis.

A los sinodales de manera especial mi agradecimiento por su tiempo, valiosas observaciones y sugerencias que enriquecieron este trabajo.

Al personal de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM que hicieron posibles la realización de la maestría.

A la Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades y el apoyo que me brindaron

A CONACyT por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

A mis amigos de la maestría gracias por su hermandad y por su apoyo incondicional que me brindaron en toda la maestría

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería gracias por su amistad y apoyo

A mis tíos Alberto y Noemi por el apoyo y cariño que me brindaron, que hicieron posible la realización de mis estudios de maestría

Índice

Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
Glosario	X
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivo	5
1.4 Alcances y Limitaciones	5
Capítulo 2 Marco teórico	6
2.1 Química de los hidrocarburos (propiedades físicas y químicas)	7
2.2 Biodegradación de los hidrocarburos	15
2.3 Características geoquímicas de los hidrocarburos	22
2.4 Transporte y destino de los hidrocarburos derramados	26
2.4.1 Mecanismos de transporte	28
2.4.2 Adsorción	29
2.4.3 Volatilización	31
2.4.4 Advección	32
2.4.5 Difusión	33
2.4.6 Dispersión	34
2.4.7 Flujo inmisible	34
Capítulo 3 Marco Legal	35
3.1 Legislación Ambiental Mexicana	37
3.2 Legislación Mexicana sobre contaminación de suelos	39
3.3 Marco normativo para la restauración de suelos contaminados en México	41
3.3.1 Criterios de muestreo y análisis	44
3.3.2 Criterios internos de restauración de suelos	47
3.4 Procedimientos administrativos para el saneamiento de suelos en	49

México

Capítulo 4 Biopilas como tecnología de saneamiento	54
4.1 Características de la Biopila	56
4.2 Factibilidad de la Biopila	59
4.3 Factores que afectan la tecnología de biopilas	60
4.4 Elementos que integran el sistema de biopilas	64
4.4.1 base	64
4.4.2 Aireación	65
4.4.3 Sistema de drenaje	66
4.4.4 Contenido de humedad	67
4.4.5 Sistema de adición de nutrientes	68
4.5 Actividad microbiana	69
Capítulo 5 Saneamiento en la TAD de Acapulco, Gro., utilizando la tecnología de biopilas	71
5.1 Características del sitio	71
5.2 Análisis y técnicas de muestreo	77
5.3 Niveles de contaminación	78
5.4 Áreas y volúmenes contaminados	80
5.5 Análisis de resultados y niveles de limpieza	83
5.6 Volúmenes de suelo a sanear	85
5.7 Selección de la tecnología de saneamiento	86
5.8 Selección del sitio para el saneamiento	94
Capítulo 6 Diseño de la biopila	98
6.1 Estudios de tratabilidad	99
6.2 Cálculos de diseño	101
6.2.1 Criterios de diseño	102
6.3 Diseño de las pilas en la TAD	103
6.3.1 Dimensiones de la biopila	104
6.3.2 Configuración de el sitio	107
6.3.3 Contenido de nutrientes requeridos	109
6.3.4 Contenido de agua requerido	111

6.3.5 Índice de degradación	112
6.3.6 Decisión entre temporal y permanente	116
Capítulo 7 Construcción de la biopila	118
7.1 Preparación del sitio	118
7.2 Construcción de la base de la pila	120
7.3 Sistema de aireación	122
7.4 Sistema de recolección de lixiviados	128
7.5 Adición de nutrientes	131
7.6 Adición de agua	132
7.7 Formación de la biopila	135
Capítulo 8. Operación y Mantenimiento	142
8.1 Operación	142
8.1.1 Manejo Operacional	143
8.1.2 Sistemas de Control	144
8.1.3 Prevención de derrames y contingencias	145
8.2 Prevención de derrames y contingencias	145
8.2.1 Ajuste del flujo de aire	145
8.2.2 Mantenimiento de los equipos y accesorios	145
8.3 Muestreo y Análisis	146
8.4 Clausura del Proyecto	149
Capítulo 9 Consideraciones Económicas	152
9.1 Proyecto de planeación y manejo	152
9.2 Factores Económicos	156
9.2.1 Factores que determinan el costo de la instalación	157
9.2.2 Factores que determinan el costo de la operación y mantenimiento	158
9.3 Elaboración del presupuesto	159
9.4 Programación del proyecto	162
Capítulo 10 Conclusiones y Recomendaciones	173
10.1 Conclusiones	173
10.2 Recomendaciones	175

Bibliografía	177
---------------------	-----

Anexos

Anexo 1 Resultados del programa PILEFLOW	A1
Anexo 2 Gráfica de permeabilidad	A9
Anexo 3 Gráficas de eficiencia	A10
Anexo 4 Capacidad de campo	A12
Anexo 5 Formatos de operación y mantenimiento	A15
Anexo 6 Tarjetas de precios unitarios	A20

Índice de figuras

Figura		Página
Capítulo 2		
Figura 2.1	Estructura química del metano	7
Figura 2.2	Isómero del butano	8
Figura 2.3	Clasificación de los hidrocarburos	8
Figura 2.4	Alcanos simples y ramificados	9
Figura 2.5	Reacción del metano con el cloro	10
Figura 2.6	Estructura del alqueno	10
Figura 2.7	Propieno	11
Figura 2.8	Estructura del ciclo alcano	12
Figura 2.9	Nomenclatura de los compuestos monosustituídos	13
Figura 2.10	Numeración de las posiciones de las sustituciones	14
Figura 2.11	Prefijos orto, meta y para	14
Figura 2.12	Interacciones en el proceso de degradación	15
Figura 2.13	Primera etapa de la degradación de los alcanos	18
Figura 2.14	Segunda etapa de la degradación de los alcanos	19
Figura 2.15	Degradación de los hidrocarburos aromáticos	20
Figura 2.16	Desdoblamiento del núcleo aromático	21
Capítulo 4		
Figura 4.1	Esquema de la biopila	55
Figura 4.2	Factibilidad de la biopila	61
Figura 4.3	Sistema de aireación	66
Figura 4.4	Sistema de drenaje	67
Capítulo 5		
Figura 5.1	Muestreador	73
Figura 5.2	Ubicación de los puntos de muestreo	75
Figura 5.3	Área de mayor contaminación	81
Figura 5.4	Isoconcentraciones de HTP	82
Figura 5.5	Primer paso para la selección de la tecnología	88
Figura 5.6	Áreas disponibles para las biopilas	96
Figura 5.7	Localización del suelo contaminado y área disponible	97

Capítulo 6

Figura 6.1	Geometría de la pila	105
Figura 6.2	Área de tratamiento	107
Figura 6.3	Configuración de las pilas	108

Capítulo 7

Figura 7.1	Área de tratamiento	120
Figura 7.2	Colocación del sistema de aireación	122
Figura 7.3	Ubicación de las válvulas	123
Figura 7.4	Configuración de la biopila de 500 m ³	124
Figura 7.5	Configuración de la biopila de 800 m ³	125
Figura 7.6	Dirección del flujo de lixiviados	130
Figura 7.7	Reutilización de los lixiviados	130
Figura 7.8	Sistema de bombeo de lixiviados	131
Figura 7.9	Sistema de irrigación	133
Figura 7.10	Vista en planta del sistema de irrigación	133
Figura 7.11	Formación de la pila y equipo necesario	136
Figura 7.12	Ángulo de reposo del suelo	137
Figura 7.13	Instalación de la cubierta	138
Figura 7.14	Fijación de la cubierta	139
Figura 7.15	Amarres de la cubierta	140
Figura 7.16	Puntos de muestreo	141

Capítulo 9

Figura 9.1	Estructura general de la evaluación de proyectos	153
------------	--	-----

Anexo 2

Figura A2.1	Gráfica de permeabilidad	A9
-------------	--------------------------	----

Anexo 3

Figura A3.1	Gráficas de eficiencia de la bomba seleccionada para la pila de 500 m ³	A10
Figura A3.2	Gráficas de eficiencia de la bomba seleccionada para la pila de 800 m ³	A11

Índice de tablas

Tabla		Página
Capítulo 2		
Tabla 2.1	Porcentaje en masa de algunas muestras de petróleo	7
Tabla 2.2	Propiedades físicas y químicas de los alcanos	9
Tabla 2.3	Propiedades físicas y químicas de los ciclo alcanos	12
Tabla 2.4	Propiedades físicas y químicas de los aromáticos	13
Tabla 2.5	Hidrocarburos poliaromáticos que se pueden degradar	22
Tabla 2.6	Gravedades de algunos productos del petróleo	25
Tabla 2.7	Propiedades que afectan la adsorción de los contaminantes en el suelo.	30
Tabla 2.8	Parámetros que afectan la volatilización	32
Capítulo 3		
Tabla 3.1	Métodos para los análisis químicos de los contaminantes	45
Tabla 3.2	Criterios internos de restauración de suelos contaminados con hidrocarburos	49
Capítulo 4		
Tabla 4.1	Ventajas y desventajas de la biopila	58
Tabla 4.2	Parámetros usados para evaluar la efectividad de la biopila	60
Tabla 4.3	Estructura química y biodegradabilidad	62
Tabla 4.4	Concentración de los contaminantes y efectividad de la biopila	63
Tabla 4.5	Requerimientos de limpieza y efectividad de la biopila	63
Tabla 4.6	Contenido de humedad y efectividad de la biopila	67
Tabla 4.7	Bacterias heterótrofas y efectividad de la biopila	69
Tabla 4.8	pH del suelo y efectividad de la biopila	70
Tabla 4.9	Temperatura del suelo y efectividad de la biopila	70
Capítulo 5		
Tabla 5.1	Parámetros geohidrológicos, climatológicos y de extension de la contamination	76
Tabla 5.2	Resultados del muestreo en suelos	78

Tabla 5.3	Resultados del muestreo del agua	79
Tabla 5.4	Resultados del muestreo de vapores en agua	79
Tabla 5.5	Muestreo de los vapores en suelos.	79
Tabla 5.6	Niveles permisibles en suelo y agua	80
Tabla 5.7	Áreas y volúmenes de HTO que sobrepasan 2 000 ppm	81
Tabla 5.8	Comparación de las concentraciones máximas de contaminantes en agua	84
Tabla 5.9	Comparación de las concentraciones máximas de contaminantes en suelos	85
Tabla 5.10	Pruebas requeridas para la factibilidad de la biopila	93
Tabla 5.11	Guía para la selección del sitio	95

Capítulo 6

Tabla 6.1	Parámetros físico-químicos para los estudios de tratabilidad	101
Tabla 6.2	Criterios de selección	103
Tabla 6.3	Diseño del tamaño de la biopila	107
Tabla 6.4	Composición y porcentaje de nutrientes	137

Capítulo 7

Tabla 7.1	Datos requeridos para el programa Pilefolw	127
Tabla 7.2	Especificaciones de las bombas	128
Tabla 7.3	Velocidades de deslaves	129
Tabla 7.4	Ángulos de fricción	113

Capítulo 8

Tabla 8.1	Parámetros para cada matriz y métodos analíticos	148
Tabla 8.2	Cronograma de actividades para el muestreo	149

Capítulo 9

Tabla 9.1	Costo de la tecnología de biopilas en diferentes países	161
-----------	---	-----

Anexo 5

Tabla A5.1	Sistema de arranque de la biopila 1	A15
Tabla A5.2	Inspección del sistema de biopilas 2	A16
Tabla A5.3	Inspección del sistema de biopilas	A16

Tabla A5.4	Control de derrames	A17
Tabla A5.5	Inspección exhaustiva	A18
Tabla A5.6	Etiquetas	A18
Tabla A5.7	Cadena de custodia	A19

Glosario

API	American Petroleum Institute
ATP	Adenosin trifosfato
ASTM	American Society for Testing Materials
a_w	Actividad del agua
BETEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno
BPC	Bifenilos policlorados
CIRS	Criterios Internos de Restauración de Suelos
CNA	Comisión Nacional del Agua
COV	Compuestos orgánicos volátiles
CRETIB	Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico infeccioso
DNALP	Desnse Non - Aquous Phase Liquids
GSI	Geographic system information
GTR	Grupo de trabajo sobre restauración de sitios contaminados con materiales y residuos peligrosos.
HPA	Hidrocarburos poliaromáticos
HTP	Hidrocarburos totales del petróleo
I.I	Instituto de Ingeniería
INE	Instituto Nacional de ecología
INEGI	Instituto Nacional de Geografía e Informática
K_H	Constante de Henry
K_{oc}	Coeficiente de partición de carbono orgánico
K_{ow}	Coeficiente de partición octanol-agua
LEGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LNALP	Light Non - Aquous Phase Liquids
MTAE	Metilterametileter
MTBE	Metilterbutileter
NOM	Norma oficial Mexicana
NMX	Normas Mexicanas
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
RDR	Registro de Restauración
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología

SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SNC	Sistema Nervioso Central
TAD	Terminal de Almacenamiento y Distribución
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USEPA	United States Environmental Protection Agency

Capítulo 1

Introducción

Desde hace varios años se iniciaron en México trabajos de prospección del subsuelo, detectándose contaminación de hidrocarburos en el suelo y también en algunos pozos de extracción de agua, como consecuencia de derrames antiguos y fugas de ductos, con lo que se aceptó la existencia de contaminación en el suelo.

Al iniciarse las Auditorías Ambientales en 1993, aumentó el interés por identificar los problemas de contaminación del subsuelo en zonas industriales, especialmente aquellas cercanas a zonas urbanas; con esto, se originó la caracterización de sitios contaminados, en algunos de estos casos se realizaron proyectos de saneamiento. Posteriormente, el decreto de reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (DOF, 1996), que incluyó la responsabilidad ambiental, sirvió para formalizar los trabajos de saneamiento de suelos en sitios contaminados en México. A partir de este momento, y en ausencia de instrumentos regulatorios, las autoridades ambientales se dieron a la tarea de generar instrumentos técnico-administrativos que sirvieran como guía, y simultáneamente se abrió un importante mercado para la restauración de suelos en sitios contaminados y en especial, para aquellos con hidrocarburos.

1.1 Antecedentes

A partir de 1940, la contaminación de sitios urbanos e industriales se incrementó notablemente en casi todo el país. Esto debido al desarrollo industrial que además de brindarle bienestar a la población, ha producido un impacto negativo en el ambiente, al ocurrir derrames accidentales o intencionales, que son consecuencia de una mala operación en instalaciones industriales que pudieron presentarse en el pasado y que hasta la fecha no se han atendido (Iturbe *et. al.* 1998). Por ejemplo, pequeños escurrimientos de combustibles durante la carga y descarga de autos tanque durante la

reparación de las líneas de combustión, o durante la reparación de motores en talleres.

En México se tiene un número considerable de sitios contaminados con hidrocarburos como resultado de fugas o descargas accidentales de petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, que se han producido dentro y fuera de las instalaciones productoras y almacenadoras. En el período enero-junio de 1996 fueron registradas 681 fugas en tuberías de conducción de hidrocarburos, de las cuales 387 ocurrieron en líneas de descarga de pozos, de los cuales la mayoría se debió a tomas clandestinas, 283 en ductos principales (gasoductos, oleoductos, gasolinoductos, entre otros). Y 11 fueron derrames por diversos motivos ; en la mayoría de los casos la causa principal fue la corrosión. Como resultado de estas fugas y derrames se han afectado una gran cantidad de hectáreas de las cuales el 38 % han sido evaluadas.(PEMEX, 1999)

En general los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. Los casos del petróleo, del combustóleo y de los desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes cuando se encuentran sobre la superficie. Si son depositados en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero pueden generar lixiviados, debido a que las lluvias arrastran los compuestos solubles. Mientras que la gasolina, la turbosina, el diesel y el gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo porque su viscosidad es menor a la del agua, además durante su trayectoria son adsorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático y ahí se dispersan según la dirección de la corriente subterránea; por esto en algunos sitios los hidrocarburos no sólo han contaminado el suelo, sino también las aguas subterráneas, debido a que la mayoría de los sitios contaminados tienen como características una alta permeabilidad y nivel freático muy somero de 3 a 6 m de profundidad (SEMARNAP, 2000)

1.2 Justificación

En México se han propuesto diversas técnicas basadas en procesos biológicos, fisicoquímicos y térmicos, para la restauración de los sitios contaminados con hidrocarburos. Sin embargo, dado que cada sitio dañado constituye una problemática específica, se requiere establecer criterios, así como recopilar información, para controlar, mitigar y eliminar los contaminantes en cada sitio.

El término saneamiento, se utiliza para indicar todas aquellas acciones que se realizan para la reducción o eliminación de los niveles de contaminación en el suelo y subsuelo. Por su parte restauración o recuperación es la acción de devolver a un sitio sus características originales. Es decir rescatar o mejorar la función e imagen que el suelo tenía antes de haber sido afectado.

Actualmente en México existe poca experiencia en el saneamiento de sitios contaminados con hidrocarburos. Los lineamientos sobre los procedimientos técnicos para la evaluación de sitios contaminados y las tecnologías para la descontaminación o el aislamiento de estos sitios, tienen muy poco tiempo de haberse iniciado. Además las autoridades ambientales carecen de un sistema de información que respalde la toma de decisiones con respecto al saneamiento, control y monitoreo, así como para la reactivación económica de los sitios contaminados.

Los criterios internos de restauración de suelos contaminados (CIRS) establecidos por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 1998) si bien no tiene la categoría de Norma oficial Mexicana, son los únicos parámetros que existen para establecer los niveles de limpieza en un suelo contaminado.

La biorrestauración ha sido utilizada satisfactoriamente en diversos países para biodegradar los hidrocarburos que se encuentran en el suelo, ya que los microorganismos son capaces de convertirlos en CO₂ y agua.

De acuerdo con los informes de accidentes de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, se han producido accidentes que involucran el derrame y la fuga de todo tipo de hidrocarburos, que han impactado

directamente al suelo, y establecen que el mayor porcentaje de productos que se derraman y provocan afectación al suelo son en el siguiente orden: Petróleo crudo, gasolinas, diesel, combustóleo y tolueno (PROFEPA, 1998).

Las actividades desarrolladas por Petróleos Mexicanos (PEMEX) en materia de protección ambiental, se han incrementado en los años más recientes, atendiendo principalmente la realización de Auditorías tanto ambientales, como de seguridad industrial. Es importante señalar que PEMEX se encuentra dividida en cuatro empresas: Exploración y Producción, Refinación, Gas y Petroquímica Básica y que trabajan en forma independiente en el saneamiento de sitios contaminados. Pemex Refinación es la que presenta una mayor actividad en este aspecto (II. UNAM, 2000)

Como parte del Plan de Acción de Pemex Refinación, se realizó una Auditoría Ambiental, a la Terminal de Almacenamiento y Distribución (TAD) de Acapulco, Gro. Como resultado de la Auditoría, se recomendó realizar un estudio para evaluar la contaminación del subsuelo en el área de la instalación, ya que establece la presencia de hidrocarburos en diversas zonas de la instalación, debido a un derrame de turbosina en el pasado y a operaciones inadecuadas. Por ello Pemex Refinación solicitó al Grupo de Saneamiento de Suelos y Acuíferos del Instituto de Ingeniería, UNAM, un estudio para evaluar la contaminación del subsuelo y del agua subterránea en las instalaciones de la TAD.

Después de realizar la evaluación del sitio mediante un muestreo del subsuelo en 22 puntos de la TAD y en 6 pozos de monitoreo de agua subterránea, se encontró que el suelo y el agua de la TAD Acapulco no está contaminados por los principales hidrocarburos aromáticos que se presentan en la gasolina: benceno (C_6H_6), tolueno (C_7H_8), etilbenceno (C_8H_{10}) y xilenos (C_8H_{10}); conocidos colectivamente como BTEX, ni hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). La principal contaminación del subsuelo se debe principalmente a hidrocarburos totales del petróleo (HTP).

Por las condiciones geohidrológicas de la zona, el tipo de suelo, permeabilidad del mismo, tipo de contaminante, concentración y el bajo contenido de material arcilloso, se propone con el presente trabajo, el uso de la tecnología de biopilas para sanear el suelo contaminado con HTP de la TAD, Acapulco.

1.3 Objetivo

General

Diseñar las biopilas como alternativa de tratamiento para la rehabilitación de suelos contaminados con hidrocarburos en la Terminal de Almacenamiento y Distribución contaminada con hidrocarburos, ubicada en Acapulco Gro.

Particulares

- Proponer como tecnología de rehabilitación la tecnología de biopilas, basándose en las características del sitio
- Seleccionar el sitio óptimo para el saneamiento del suelo, conociendo las características del medio físico
- Dimensionar el tamaño de las biopilas adecuado al área disponible.
- Calcular los nutrientes, agua y flujo de aireación, comparando los presentes y los requeridos para la rehabilitación del suelo
- Describir la construcción, operación y mantenimiento para las pilas, estableciendo cada uno de los proceso
- Elaborar el presupuesto del saneamiento, estimando los factores económicos que determinan el costo de la biopila.

1.4 Alcances y Limitaciones

- Proponer como método de saneamiento la tecnología de biopilas, con base en los niveles de limpieza establecidos para el sitio.
- Elaborar el diseño de la biopila conociendo las características físicas y químicas del suelo y los contaminantes.
- Proponer y establecer los métodos que describan claramente la construcción, operación y mantenimiento de la biopila.
- La elección de la técnica de rehabilitación incluye una evaluación detallada de los costos de la construcción, operación y mantenimiento.
- Para la elección de la alternativa de saneamiento no se realizaron ensayos ni pruebas piloto
- No se realizó la construcción de la pila en campo

Capítulo 2

Marco teórico

El término petróleo proviene del vocablo latino *petra* que significa piedra o roca y *oleum* que significa aceite. El petróleo es un líquido heterogéneo formado por una mezcla de hidrocarburos que como su nombre lo indica, son compuestos de carbono e hidrógeno, con aproximadamente 1.85 átomos de hidrógeno por uno de carbono (Testa and Winegarden, 1991).

Los hidrocarburos y sus transformaciones juegan un papel importante en la Química y las aplicaciones industriales básicas de la vida diaria.

La Química de los hidrocarburos ocupa una parte importante de la Química Orgánica, ya que incluye la Química de los hidrocarburos saturados (alcanos y cicloalcanos), así como los no saturados, alquenos y dienes, acetilenos y aromáticos (Olah *et. al*, 1992).

La composición química del petróleo crudo es compleja y puede variar con respecto a la ubicación, edad geológica y profundidad a la que se encuentra; esto se refleja en la variedad de materia orgánica que contienen, la cual se forma originalmente a través de procesos químicos y bioquímicos complejos.

El petróleo es una mezcla que contiene una gran cantidad de compuestos, sus principales componentes en forma genérica son(Ríos, 1993):

1. Hidrocarburos
2. Compuestos de azufre
3. Compuestos de oxígeno
4. Compuestos de nitrógeno
5. Sales inorgánicas
6. Compuestos metálicos

Típicamente los hidrocarburos constituyen del 50 al 90% del petróleo. Otros elementos como el azufre, nitrógeno y oxígeno representa el 3% del volumen

total y el fósforo y metales pesados como el vanadio y el níquel constituyen menos del 1%. Es importante mencionar que el crudo o petróleo naturalmente no contiene alquenos o hidrocarburos insaturados similares, sino que éstos se presentan en los productos refinados del petróleo, como resultado de un proceso de craking catalítico en las refinerías. En la siguiente tabla se observa la composición de algunas muestras de petróleo.

Tabla 2.1 Porcentaje en masa de algunas muestras de Petróleo. (Wingger and Torkelson, 2000)

Componente químico	Sureste de Louisiana	Kuwait
Alcanos (normales y ramificados)	28.0	34.1
Cicloalcanos	44.8	20.3
Aromáticos	18.6	24.2
Componentes polares (contienen O, N, S)	8.4	3.5
Material con alto peso molecular o alto punto de ebullición.	0.2	3.5

2.1 Química de los hidrocarburos (propiedades físicas y químicas)

Los hidrocarburos son el constituyente principal del petróleo, tanto en importancia como en cantidad. Los hidrocarburos son compuestos simples de hidrógeno y carbono que pueden caracterizarse basándose en su composición y estructura química; cada átomo de carbono puede tener cuatro enlaces simples con el hidrógeno. El metano es el hidrocarburo más simple figura 2.1

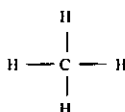


Figura. 2.1 Estructura química del metano

Formas más complejas pueden presentarse con pesos moleculares mayores. También existen hidrocarburos que contienen el mismo número de átomos de carbono e hidrógeno, pero difieren en su estructura, a éstos se les llama isómeros y poseen propiedades diferentes. El isómero más simple de los hidrocarburos es el butano, (figura 2.2).



Figura. 2.2. Isómero del butano

Las características fisicoquímicas de los hidrocarburos son muy variadas. La mayoría de los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua. Su peso molecular, así como su punto de ebullición varía desde un valor muy bajo hasta uno muy alto, pueden ser viscosos o muy ligeros, muy volátiles o relativamente no volátiles, altamente solubles o insolubles. Esta variabilidad en sus características fisicoquímicas provoca que el comportamiento individual de los hidrocarburos, así como de sus mezclas, sea también variable en el subsuelo (Olah *et. al*, 1992).

Los hidrocarburos se dividen en dos clases principales: alifáticos y aromáticos. Los hidrocarburos alifáticos se subdividen a su vez en alcanos o parafinas, alquenos u olefinas, alquilos y alifáticos cíclicos o naftenos.

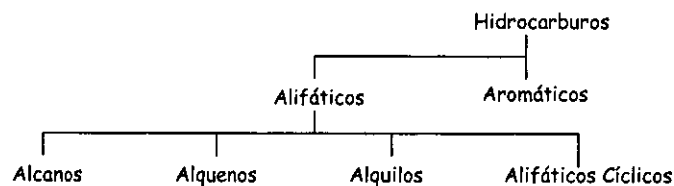


Figura. 2.3 Clasificación de los hidrocarburos (Chang, 1997).

Alcanos

Los alcanos son llamados también parafinas o hidrocarburos alifáticos. Son hidrocarburos en los cuales, los átomos de carbono se unen con un simple enlace de carbono. (figura 2.1) y pueden ser de cadena simple o ramificada, (figura 2.4). Los alcanos ramificados son más largos que los n-alcanos y los radicales son principalmente del grupo metil (CH_3). Estos radicales inhiben la transformación microbiana. La fórmula química general, tanto para los alcanos de cadena, como los ramificados es $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (Baker and Herson, 1994)

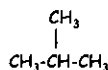
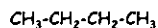


Figura. 2.4 Alcanos simples y ramificados

Las características de los alcanos son:

- 1) Se consideran como hidrocarburos alifáticos saturados y se encuentran principalmente en las fracciones de gasolina
- 2) Son hidrocarburos con edades geológicas mayores por lo que se encuentran a mayores profundidades.
- 3) Su estructura puede ser en forma de cadena o ramificada
- 4) Se nombra utilizando los prefijos griegos de acuerdo al número de carbonos que posean (Olah *et. al.*, 1992).

En la siguiente tabla se observan algunas propiedades químicas y físicas de los alcanos y alcanos ramificados.

Tabla 2.2 Propiedades físicas y químicas de los alcanos. (Testa and Winegardner, 1991)

Compuesto	Fórmula química	Peso molecular (Wt)	Densidad	Solubilidad (g/10 ⁶ gH ₂ O)	Viscosidad (microscopias)	Punto de ebullición (°C)	Presión de vapor (mm)
Alcanos							
Metano	CH ₄	16	0.554		108.7 @ 20°C	-161	400@-168.8°C
Etano	C ₂ H ₆	30	0.446		98.7 @ 17°C	-89	400 @ -99.7°C
Propano	C ₃ H ₈	44	0.582	62.4±2.1	79.5 @ 17.9°C	-42	400 @ -55.6°C
Butano	C ₄ H ₁₀	58	0.599	61.4±2.6		-0.5	400 @ 16.3°C
Pentano	C ₅ H ₁₂	72	0.626	38.5±2.0	676000@25°C	36	426
Hexano	C ₇ H ₁₆	86	0.659	9.5±13	3260 @ 20°C	69	124
Alcanos Ramificados							
Isobutano	C ₄ H ₁₀	58		48.9±2.1		-12	
2,2-Dimetil butano	C ₆ H ₁₄	86	0.649	18.4±1.3		50	400
2,3 Dimetil butano	C ₆ H ₁₄	86	0.668	22.5±0.4		58	400
2 metilpentano	C ₆ H ₁₄	86	0.669	13.8±0.9		60	400 @ 41.6°C
2 metilhexano	C ₇ H ₁₆	100	0.6789	2.54±0.0		90	40
3 metilhexano	C ₇ H ₁₆	100		4.95±0.09		92	
2,2,4 trimetil pentano	C ₈ H ₁₈	114	0.692	2.44±0.12		99	40.6

El grupo alcano, tiene dos tipos de reacciones químicas, oxidación y sustitución. El primer tipo de reacción es con el oxígeno molecular y puede ser inflamable y explosiva. Para el caso de la reacción por sustitución, uno o más átomos de hidrógeno son reemplazados, generalmente el hidrógeno se reemplaza por un halógeno como el cloro, formando compuestos organoclorados. Un ejemplo es la reacción del metano con el cloro, obteniéndose un tetracloruro de carbono (figura 2.5). Es importante mencionar que los compuestos organohaloides son muy tóxicos (Testa and Winegardner, 1991).

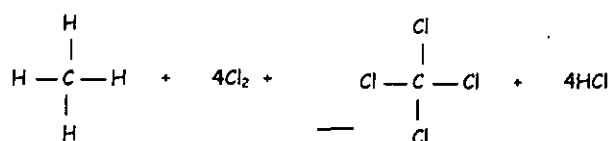


Figura. 2.5 Reacción del metano con el cloro.

Alquenos.

Son hidrocarburos insaturados, con dobles enlaces. Los alquenos son llamados también olefinas y contienen al menos un doble enlace, (figura 2.6).

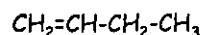


Figura. 2.6 Estructura del alqueno

La fórmula general es C_nH_{2n} , donde $n = 2, 3, \dots$ el alqueno más simple es el etileno (C_2H_4). Para nombrar a los alquenos es necesario indicar la posición del doble enlace y añadir la terminación "eno", como en el caso de los alcanos, el nombre está determinado por un prefijo y un sufijo el primero indica el número de átomos de carbono en la cadena y el sufijo eno indica la insaturación. También existen isómeros, y pueden ser cis ó trans, los cuales difieren ya sea por la posición del doble enlace y/o la forma como se encuentran estructurados sus radicales y por las propiedades físicas y químicas, es decir los isómeros cis, poseen un momento polar (Olah and Arpad, 1992).

Entre las propiedades y reacciones de los alquenos, se puede mencionar que el etileno es una sustancia muy importante, ya que es utilizado en la

manufactura de los polímeros y en la preparación de compuestos químicos orgánicos. El etileno, es obtenido por medio de un proceso de craking. Es importante mencionar que naturalmente el petróleo no contiene alquenos, pues como ya se mencionó, son obtenidos por medio de una reacción de craking catalítico (Roldán, 1998).

Los alquenos son insaturados porque las valencias de los dos átomos de carbono que tiene el doble enlace son insaturados y pueden saturarse, adicionando átomos de hidrógeno.

Alquilos

Son todos aquellos hidrocarburos alifáticos insaturados que tienen al menos un triple enlace, su fórmula química general es C_nH_{2n-2} , el alquilo más simple es el propieno. Su nomenclatura es muy similar a lo de los alquenos, indicando la posición del triple enlace, pero con el sufijo "ieno" (Chang, 1997)

El alquilo más simple es el propieno, (figura 2.7)

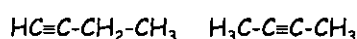


Figura. 2.7 Propieno

Los hidrocarburos alifáticos en general, tienen un efecto narcótico o depresivo sobre el sistema nerviosos humano. Los síntomas a una intoxicación con hidrocarburos alifáticos son similares a los efectos de los compuestos aromáticos: mareo, náusea, y perdida de la coordinación. Los alcanos son buenos solventes de los lípidos y pueden disolver los lípidos de los tejidos y las células de las membranas si son aspirados por los pulmones (Olah and Arpad, 1992).

Cicloalcanos

Los cicloalcanos o naftenos, están formados por la unión de átomos de carbono en una estructura en forma de anillo, son considerados como hidrocarburos saturados, ya que se encuentran saturados con hidrógeno. Los compuestos saturados cíclicos contienen seis átomos de carbono y también son llamados cicloalcanos o ciclo parafinas La fórmula general de los

cicloalcanos es C_nH_{2n} , donde $n = 3, 4, \dots$ (figura 2.8). Sus propiedades físicas y químicas se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2.3 Propiedades físicas y químicas de los cicloalcanos. (Testa and Winegarner1991)

Compuesto	Fórmula química	Peso molecular (Wt)	Densidad	Solubilidad (g/10 ⁸ gH ₂ O)	Viscosidad (microscopias)	Punto de ebullición (°C)	Presión de vapor (mm)
Metilciclopentano	C ₆ H ₁₂	84	0.749	42 ± 1.6		72	
Ciclohexano	C ₆ H ₁₂	84	0.778	55 ± 2.3	1.02 x 17°C	81	95
Etliciclopentano	C ₈ H ₁₆	112		3.29 ± 0.46		132	
1,1,3-trimetilciclohexano	C ₉ H ₁₈	126		1.77 ± 0.05		137	

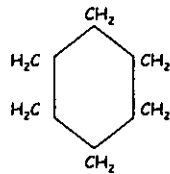


Figura. 2.8 estructura del ciclo alcano

Hidrocarburos aromáticos.

Los hidrocarburos aromáticos comprenden menos del 15% del crudo, aunque en fracciones pesadas llegan a exceder el 50%. Las fracciones aromáticas del petróleo son el grupo de hidrocarburos ambientalmente más importantes, ya que contienen al menos un anillo de benceno, el cual contienen seis átomos de carbono. Los aromáticos se consideran hidrocarburos insaturados, lo cual permite que se añadan otros hidrógenos o elementos al anillo. El benceno es conocido como la base de los compuestos aromáticos y junto con el tolueno, etilbenceno y los tres isómeros del xileno (orto, meta, para) son los principales constituyentes de la gasolina. Los principales compuestos aromáticos y sus propiedades se observan en la siguiente tabla

Tabla 2.4 Propiedades químicas y físicas de los aromáticos. (Testa and Winegardner, 1991)

Compuesto	Fórmula química	Peso molecular (Wt)	Densidad	Solubilidad (g/10 ⁶ gH ₂ O)	Viscosidad (microscopias)	Punto de ebullición (°C)	Presión de vapor (mm)	Koc
Benceno	C ₆ H ₆	78	0.879	1780 ± 45	0.652	80	76 @ 20°C	1.69-2.00
Tolueno	C ₇ H ₈	92	0.866	515 ± 17	0.590	111	20 @ 20°C	2.06-2.18
Etilbenceno	C ₈ H ₁₀	106	0.867	161 mg/L 25°C		173.2°C @ 760 mm/L	4.53 mm	3.05-3.15
Ortoxileno	C ₈ H ₁₀	106	0.880	175 ± 8	0.810	142	10 @ 25.9°C	2.11
Metaxileno	C ₈ H ₁₀	106	0.864	176 ± 1.6	0.620	138.9	10 @ 28.3°C	3.20
Paraxileno	C ₈ H ₁₀	120	0.861	156 ± 1.6	0.648	138	10 @ 27.3°C	2.31
Isopropilbenceno	C ₉ H ₁₂	120		50 ± 5		152		
Benzopireno	C ₂₀ H ₁₂	252	1.351	0.003		495	5.49x10 ⁻⁹ @ 25°C	5.81-6.50

La nomenclatura de los compuestos monosustituídos del benceno, es bastante sencilla, (figura 2.9). Si existe más de una sustitución, debe indicarse la posición de la segunda sustitución con referencia a la primera; para numerarlos se toma un arreglo, (figura 2.10). Los prefijos orto, meta y para son utilizados cuando existen dos sustituciones del mismo grupo, figura 2.11, pero cuando las sustituciones son de diferentes grupos, no se pueden utilizar estos prefijos (Chang, 1997).

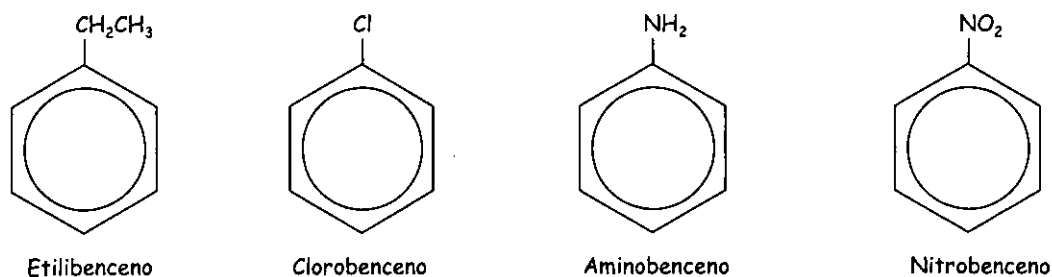


Figura. 2.9 Nomenclatura de los compuestos monosustituídos

Las propiedades de los compuestos aromáticos son:

- Incoloro

- Inflamable
- Es obtenido principalmente del petróleo
- Posee una relatividad inerte
- Tienen la misma fórmula química que el acetileno, pero con un grado mayor de insaturación
- Es menos reactivos que el etileno o acetileno
- Posee una alta estabilidad como resultado de sus electrones
- Reaccionan rápidamente con el grupo halógeno, a través de una reacción de sustitución.

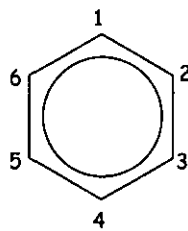


Figura. 2.10 Numeración de las posiciones de las sustituciones.

El benceno y los alquibencenos son considerados los compuestos más tóxicos de la gasolina. Los efectos tóxicos agudos se reflejan en la depresión del SNC (Sistema Nervioso Central) como resultado de la inhalación de hidrocarburos, entre estos efectos se pueden mencionar: dolor de cabeza, y náuseas, la destrucción de células afecta la médula de los huesos y el cáncer (Baker and Herson, 1994).

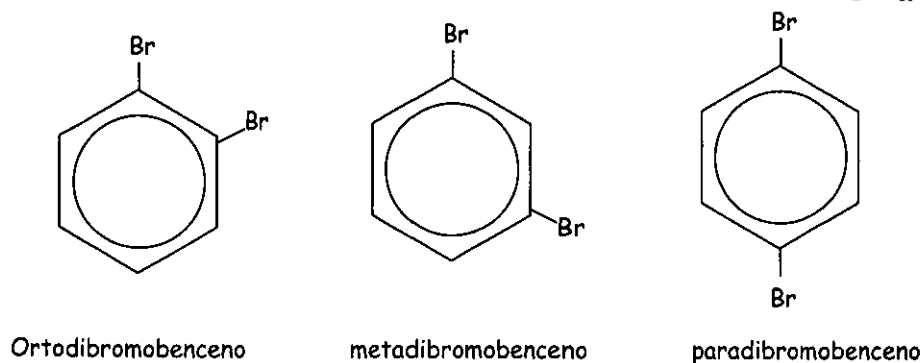


Figura 2.11. prefijos orto, meta y para

2.2 Biodegradación de los hidrocarburos

La biodegradación de los hidrocarburos, es un proceso mediante el cual los microorganismos reducen la complejidad de los compuestos químicos, a compuestos más simples, es decir de menor peso molecular, por lo que se presenta como una opción muy viable para el tratamiento de los suelos contaminados con hidrocarburos.

Las interacciones que se presentan en el proceso de biodegradación, se ilustran en la figura 2.12.

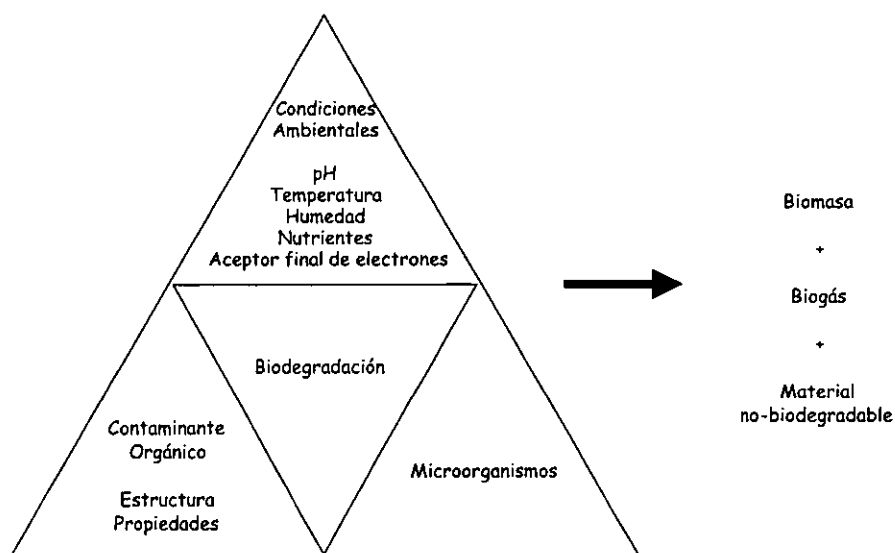


Figura. 2.12. Interacciones en el proceso de degradación. (Deyta, 1999)

Para que la degradación se lleve a cabo, es necesario que existan las condiciones ambientales adecuadas, así como la cantidad suficiente de microorganismos degradadores de hidrocarburos; éstos por lo general, son los microorganismos autóctonos del sitio contaminado. En caso que las condiciones ambientales y las UFC (unidades formadoras de colonias) no sean suficientes, será necesario establecerlas, mediante procesos ingenieriles (Deyta, 1999).

Uno de los principales problemas de la biodegradación, es que en presencia de altas concentraciones del contaminante en el suelo, pueden existir efectos de toxicidad sobre la población microbiana. Otro es la insuficiencia de nutrientes

en el suelo; sin embargo, la presencia de cantidades mínimas de nitrógeno y fósforo, permiten la biodegradación en el suelo, aunque a velocidades muy bajas (Fahnestock and Wickramanayake, 1998).

Los factores ambientales que afectan la actividad microbiana y por lo tanto la biodegradación son: contenido de humedad, temperatura, nutrientes inorgánicos (principalmente nitrógeno y fósforo), aceptores de electrones (oxígeno, nitrato, sulfato), pH, presencia de metales pesados, tipo y cantidad de material orgánico presente (carbono).

La biodegradación de los hidrocarburos se lleva a cabo principalmente por dos grupos de microorganismos: las bacterias y los hongos. Las bacterias tienen un crecimiento muy rápido y una mayor capacidad de adaptación a los medios contaminados.

La biodegradación depende de un adecuado suministro de agua, indispensable para el crecimiento de los microorganismos, por lo que es importante conocer la actividad del agua " a_w " que es la porción de agua disponible para los microorganismos. Esta puede conocerse indirectamente a través de la capacidad de campo, cantidad de agua retenida por el suelo y depende de la textura y porosidad del suelo. La biodegradación de los hidrocarburos es óptima con un contenido de humedad entre 30 y 80% de la capacidad de campo (Saval, 1995).

La biodegradación de los contaminantes es más rápida a pH neutros. La biodegradación de los hidrocarburos es óptima con un pH de 7.8, los hongos son más tolerables a condiciones ácidas, por lo tanto tiene una ventaja sobre las bacterias cuando se trata de rehabilitar un suelo cuyo pH es ácido. La actividad metabólica de los microorganismos produce ácidos orgánicos, los cuales pueden acidificar al suelo si éste tiene deficiencias en su capacidad amortiguadora. La técnica empleada para incrementar el pH es mediante la adición de hidróxido de amonio y para llevarlo a la parte alcalina lo más común es agregar urea. Con un pH alto, decrece la disponibilidad del calcio, magnesio, sodio, potasio, amonio, nitrógeno y fósforo, mientras con pH bajos, decrece la disponibilidad de los nitratos y cloruros.

La temperatura también es un factor importante en el crecimiento y actividad microbiana y por lo tanto para la biodegradación. El intervalo de temperaturas óptimas para la biodegradación de los hidrocarburos es de 20 a 70°C. Existen varias técnicas para modificar la temperatura en el suelo, entre las más comunes están las cubiertas de plástico y las cubiertas con plantas vegetales. Sin embargo, también existen factores adversos al utilizarlas ya que si no se tiene un control adecuado, las cubiertas pueden hacer decrecer la aireación y provocar condiciones anóxicas. Otra forma de aumentar la temperatura en el suelo durante la biorremediación, es irrigar el suelo con agua templada.

Los nutrientes inorgánicos principales para la biodegradación son: el nitrógeno y el fósforo. El nitrógeno es necesario para la síntesis de proteínas y la pared celular, mientras que el fósforo es necesario para formar los ácidos nucleicos y para el ATP (Adenosin trifosfato). El nitrógeno puede perderse rápidamente en el suelo debido a la lixiviación del amonio y el nitrato, y por la desnitrificación del suelo. El fósforo se encuentra frecuentemente limitado debido, a su baja solubilidad y biodisponibilidad. El fósforo orgánico en suelos se encuentra principalmente en los ácidos húmicos mientras que el fósforo inorgánico se encuentra en combinación con el Fe, Al, Ca, F (Daivis, 1967).

La biorremediación depende principalmente de la actividad de los microorganismos aerobios; un suministro adecuado de oxígeno al suelo es esencial para la biorremediación. Se requieren aproximadamente de 0.45 a 1.36 kg de oxígeno por 0.45 kg de hidrocarburos para asegurar una buena degradación. Cuando los poros del suelo se encuentran ocupados por moléculas de agua, la difusión del oxígeno es menor y se pueden presentar condiciones anóxicas. Para tener una degradación aerobia es necesario aproximadamente 10% de poros libres en la matriz del suelo (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Los contaminantes orgánicos presentes en el suelo, son la fuente de carbono que los microorganismos requieren para la biodegradación, pero en algunas ocasiones, éstos son insuficientes por lo que es necesario agregar fuentes exógenas de carbono.

Antes de revisar las rutas de degradación de los hidrocarburos, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

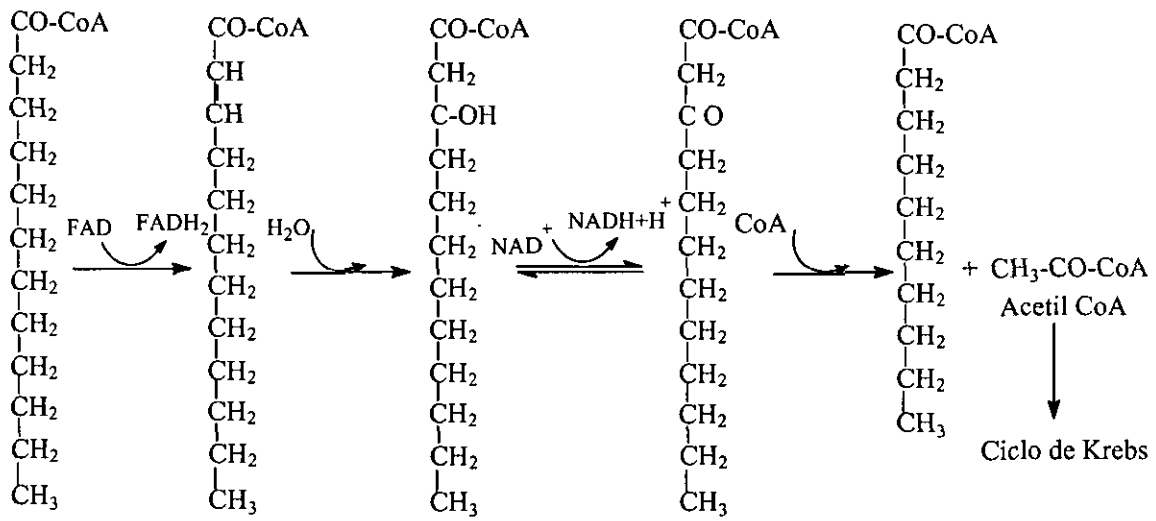
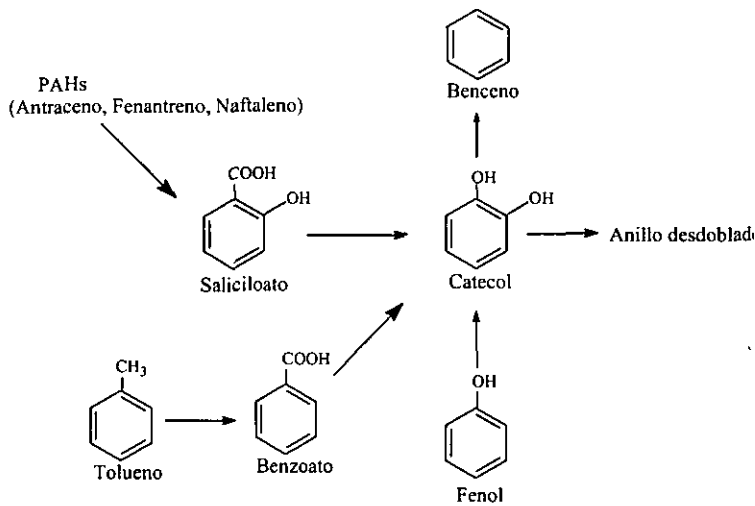


Figura. 2.14 Segunda etapa de la degradación de los alcanos. (Baker and Herson, 1994)

Los hidrocarburos aromáticos son degradados aeróbicamente, los bencenos y bencenos sustituidos son convertidos a catecol o protocatecol (figura 2.15).



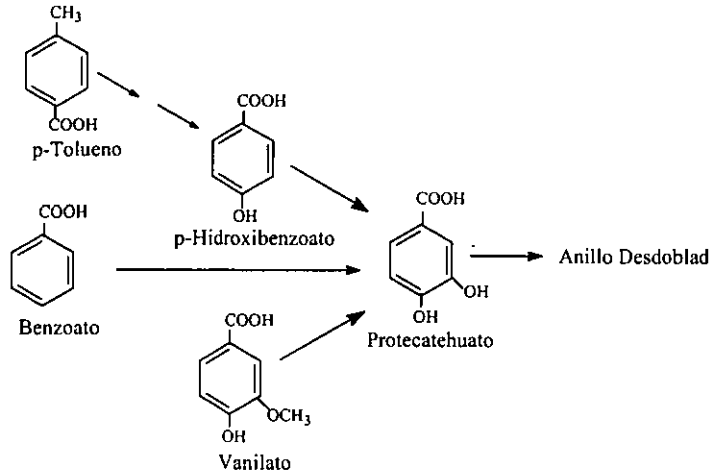
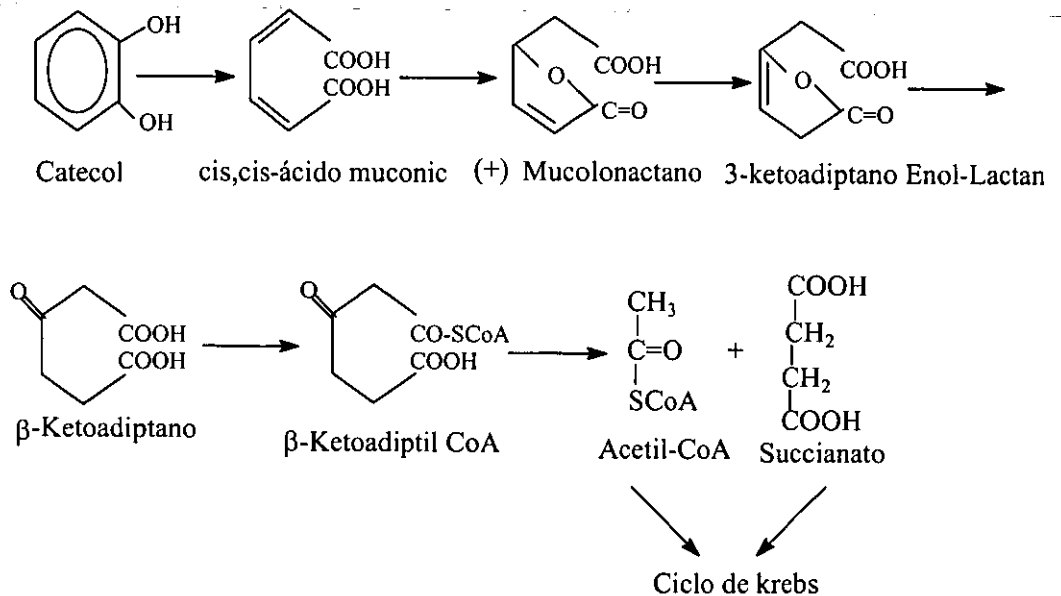


Figura. 2.15. Degradación de los hidrocarburos aromáticos. (Baker and Herson, 1994)

El núcleo aromático de estos compuestos, se desdobla de dos formas, el orto desdoblamiento y el meta desdoblamiento; en el primer caso, se produce Acetil-CoA y succinato, los cuales pueden oxidarse por medio del ciclo de Krebs y del sistema de transferencia de electrones. En el segundo caso los productos finales obtenidos son el acetaldehído y el piruvato, los cuales pueden ser oxidados por medio del ciclo de Krebs y el sistema de transferencia de electrones, en ambos casos el oxígeno molecular es el aceptor final de electrones, por lo que esta ruta de degradación es obligada aerobia (Baker and Herson, 1994). Figura 2.16



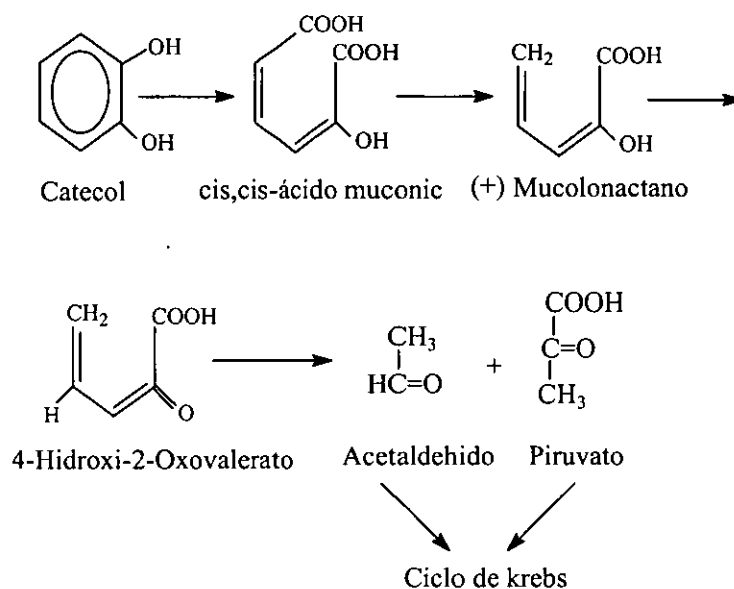


Figura. 2.16. Desdoblamiento del núcleo aromático. (Baker and Herson, 1994)

Por otro lado los compuestos aromáticos pueden ser degradados en condiciones anóxicas y anaerobias, la diferencia entre la degradación aerobia y anaerobia es que en la primera se involucra al oxígeno molecular mientras que en la segunda se utiliza al oxígeno contenido en la molécula de agua. La degradación inicia con una transformación oxidativa, a través del grupo hidroxilo, derivado de la molécula de agua o del metil sustituido, en ambos casos se produce un alcohol aromático, el cual se transforma en un aldehído aromático y finalmente en un ácido aromático.

En la degradación de los hidrocarburos poliaromáticos (HPA) el oxígeno molecular se introduce dentro de la estructura del anillo, ocurriendo su degradación bajo condiciones aerobias. La susceptibilidad de los HPA a degradarse es inversamente proporcional al número de anillos que contengan, siendo el naftaleno más fácil de degradar que el antraceno y el fenantreno. La siguiente tabla contienen los HPA que pueden ser degradados.

Tabla 2.5 Hidrocarburos poliaromáticos que se pueden degradar. (Baker and Herson, 1994)

Compuesto	No de anillos	Microrganismos.
Naftaleno	2	Rhodococcus, Pseudomonas marinas y microorganismos del suelo.
Antraceno	3	Microrganismos del suelo y marinos
Acenafteno.	3	Microrganismos del suelo
Fluoreno	3	Microrganismos del suelo
Fenantreno	3	Microrganismos del suelo y de estuarios
Fluorantreno	4	Microrganismos del suelo
Pireno	4	Microrganismos del suelo, Mycobacterium y Rhodococcus
Benzoantraceno	4	Microrganismos del suelo
Benzopireno	5	Microrganismos del suelo y de estuarios

Los microorganismos capaces de degradar los HPA son eucariotas, hongos y algas.

Los hidrocarburos halogenados pueden ser degradados en condiciones tanto aerobias como anaerobias. En condiciones aerobias la degradación ocurre por medio de la dechloración, es decir, los átomos halogenados son sustituidos por hidrógenos. En este tipo de reacción, los hidrocarburos halogenados son los aceptores de electrones y no las fuentes de carbono. Por su parte los hidrocarburos aromáticos halogenados pueden degradarse utilizando las rutas de los aromáticos o la de los halogenados. La susceptibilidad de degradación de los hidrocarburos aromáticos halogenados depende de la naturaleza del halogeno sustituido, del número y posición de las sustituciones (Buitron and Capdeville, 1993).

2.3 Características geoquímicas de los hidrocarburos.

Cuando existe un derrame de hidrocarburos en el suelo, ocurren fenómenos naturales, que transportan los hidrocarburos hacia las aguas subterráneas. El comportamiento y el transporte de los contaminantes está en función de sus características físicoquímicas como son: la densidad, la solubilidad, la viscosidad, además de las características del suelo como son: tipo,

permeabilidad, tamaño de las partículas, contenido de humedad, materia orgánica y profundidad del nivel freático, así como factores climatológicos (temperatura y precipitaciones pluviales).

De acuerdo con su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: los que poseen una menor densidad que la del agua llamados ligeros por sus siglas en inglés LNALP y los que poseen una mayor densidad que la del agua llamados densos (DNAP). Los ligeros tienden a formar una capa en forma de nata en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, algunos de estos productos son: la gasolina, keroseno, diesel, etc. Los densos por el contrario migran hacia la base del acuífero, ejemplo de estos son los bifenilos policlorados, petróleo crudo, etc. (Iturbe *et. al.* 1998).

Antes de realizar un muestreo de suelo y el análisis químico correspondiente, es importante hacer una evaluación del sitio. Para esto existen diversos métodos, como son los geoelectrónicos y la gasometría. El primero se puede aplicar con éxito a diversos tipos de derrames y tiene la ventaja de dar información sobre el material geológico que se encuentra en el subsuelo, mientras que el segundo se aplica exitosamente cuando los contaminantes son compuestos volátiles y semivolátiles, básicamente combustibles.

Tanto la caracterización geoquímica de los hidrocarburos derramados, ya sea crudo o productos refinados, como la identificación del tipo de fuente y las características del suelo, son actividades importantes para seleccionar adecuadamente la tecnología de remediación para el saneamiento del suelo, sin embargo es difícil realizar la caracterización ya que intervienen factores químicos, físicos y biológicos que no se pueden controlar. Algunas de las técnicas para la caracterización de los hidrocarburos son muy convencionales, pero otras se han desarrollado para usarlas exclusivamente en las exploraciones petroleras, sin embargo estas técnicas se han adaptado y aplicado para identificar y evaluar ambientalmente los hidrocarburos derramados (Saval, 1995).

Para el análisis químico de los contaminantes se utilizan algunos de los siguientes métodos:

-
- Compuestos monoaromáticos volátiles: BTEX, método EPA 8020 por cromatografía de gases o método EPA 8060 o EPA 8240 por espectrometría de masas.
 - Hidrocarburos totales de gasolina y diesel, método EPA 8015.
 - Hidrocarburos totales del petróleo (HTPs) método EPA 418.1 M
 - Hidrocarburos poliarómicos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros métodos EPA 8310.

En todo muestreo de suelo se debe considerar una muestra o varias como control, en puntos alejados del área contaminada, pero lo suficientemente cerca para que se considere dentro de la misma zona.

Algunas de las determinaciones que se realizan son:

- pH
- Humedad.
- Capacidad de retención del agua.
- Concentración de materia orgánica,
- Porosidad.
- Permeabilidad.

Los crudos son comúnmente clasificados con respecto a sus residuos de destilación ya que en éstos, se refleja el contenido de tres tipos de estructuras básicas, como son: parafinas, naftenos y aromáticos. Cerca del 85% de todos los crudos pueden clasificarse con respecto a su base, es decir base asfáltica, parafina y mezcla de ambos (Drever and James , 1997).

El método principal para separar al crudo de sus derivados es la destilación. El punto de ebullición de los hidrocarburos generalmente aumenta con un incremento en el número de átomos de carbono en los compuestos. La mayoría de los hidrocarburos tiene su punto de ebullición por debajo de su punto de volatilización.

El crudo y los productos del petróleo, pueden ser diferenciados por medio de la gasometría de gases, utilizando los métodos 8015 de la EPA.

Clasificación del petróleo.

Existen diversos métodos que no solo pueden ser utilizados para cuantificar los hidrocarburos, sino también para identificar el tipo, grado y en algunas instancias la fuente de contaminación. El método más sencillo, utilizado por la industria petrolera para caracterizar los productos refinados, consiste en determinar el factor de clasificación de Watson y la densidad (gravedad específica o gravedad API (American Petroleum Institute) definen el tipo de crudo o de fracción de petróleo y a partir de ellas pueden estimarse propiedades como el calor de combustión, calor latente de vaporización, punto de ebullición promedio, peso molecular, etc. Así como desarrollar las curvas de destilación con los hidrocarburos LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids). En la siguiente tabla se observan las gravedades API típicas de algunos productos refinados (Testa and Winegardner, 1991).

Tabla 2.6 Gravedades de algunos productos del petróleo. (Testa and Winegardner, 1991)

Producto	Gravedad Específica	Gravedad API
Gasolina	0.74	60°
Crudo Ligero	0.84	36°
Crudo Pesado	0.95	18°
Asfalto	0.99	11°

Las curvas de destilación se obtienen, comparando los puntos de ebullición del producto con el porcentaje acumulado del volumen removido.

Existen también métodos más complicados como el uso de cromatografía de gases, o las comparaciones de distribución estadística de los n-alcanos, así como la determinación de isótopos de carbono e hidrógeno (Palencia, 1998).

Por medio de la caracterización química de los contaminantes, se pueden conocer los hidrocarburos que sirven como sustrato y los compuestos que pueden inhibir la actividad metabólica de los microorganismos. Por su parte con la caracterización fisicoquímica del suelo, se puede conocer el microambiente, donde los microorganismos llevan a cabo su actividad.

2.4 Transporte y destino de los hidrocarburos derramados.

Cuando ocurre un derrame de hidrocarburos en el suelo o en cuerpos de agua los contaminantes inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio físico lo permite. Los hidrocarburos generalmente migran hacia abajo por efecto de la gravedad y de las fuerzas capilares.

El subsuelo se comporta como un vaso de contención que permite la separación en cinco fases fundamentales de los diferentes compuestos basándose en sus características físicas:

1. Gaseosa
2. Adsorción
3. Líquida, menos pesada que el agua
4. Solución
5. Líquida, más pesada que el agua

Las características físicas de los contaminantes más importantes que afectan el transporte de los contaminantes son: densidad, viscosidad, presión parcial de la fase gaseosa y solubilidad en el agua.

Las características químicas de los contaminantes más importantes a considerar son: toxicidad, reactividad, potencial redox y capacidad de ionización.

En términos generales, el comportamiento de los contaminantes en el subsuelo está en función de las características fisicoquímicas de los hidrocarburos (densidad, solubilidad viscosidad), de las características físicas del suelo (tipo, permeabilidad, tamaño, contenido de humedad y materia orgánica) y profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también influyen en este proceso. Todas las variables en su conjunto, definen la distribución tridimensional y el tamaño del bulbo o pluma de contaminación (Domenico, 1997).

La migración de los compuestos orgánicos, depende de la densidad relativa del agua, ya que ésta ocurre en la zona capilar, la cual es el área de transición entre la zona no saturada y saturada y es influenciada por la porosidad y permeabilidad del suelo, así como por la solubilidad, gravedad específica y velocidad del compuesto.

De acuerdo con su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos, aquellos cuya densidad es menor que la del agua, denominados LNAPL y los que tienen una densidad mayor a la del agua DNALP (Dense Non-Aqueous Phase Liquids). El principal factor que afecta la migración de los hidrocarburos es su densidad, ya que mientras los LNAPL's migran hasta que encuentra el nivel freático, los DNAPL's continúan migrando (Baker and Herson, 1994).

Los LNAPL's tienden a formar una capa en forma de nata sobre el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección del flujo del agua subterránea. La migración de los LNAPL's depende del tamaño y distribución de las partículas, es decir si se tiene un suelo con una gran cantidad de finos como la arcilla y los sedimentos, su migración va a ser mucho más lenta que si se tienen gravas o arenas.

Los DNAPL's migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual se mueven en dirección al flujo del agua subterránea, contaminando el acuífero en toda su profundidad (Iturbe *et. al.* 1998).

Desde la perspectiva de la biorremediación el suelo puede dividirse en dos zonas, la superficie somera del suelo y la zona vadosa, la primera se considera hasta una profundidad de un metro, mientras que la segunda está limitada por el nivel freático.

La saturación residual de hidrocarburos, existe tanto en la zona no saturada como en la zona capilar, se incrementa cuando el tamaño de las partículas decrece y la viscosidad de los hidrocarburos se incrementa. Por ejemplo, los hidrocarburos se inmovilizan más rápido en arcillas que en arenas.

La capacidad de saturación residual de un suelo es aproximadamente una tercera parte de su capacidad de agua sostenida. La inmovilización de hidrocarburos depende de la porosidad del suelo, así como de las características físicas de los hidrocarburos. El volumen de suelo necesario para inmovilizar los hidrocarburos incorporados al suelo, pueden calcularse con la siguiente formula:

$$v_s = \frac{0.2V_{hc}}{P(RS)} \dots\dots(1)$$

Donde

V_s = Volumen del suelo en yardas cúbicas.

V_{hc} = Volumen de hidrocarburos descargados en barriles (42 gal = 1 barril)

P = porosidad del suelo.

RS = Capacidad de saturación residual

La combinación de las características del subsuelo, de los contaminantes y las condiciones climatológicas del sitio determinan los diferentes procesos de transporte y distribución de los contaminantes. Los procesos principales de transporte de contaminantes son: adsorción, volatilización, dispersión, lixiviación, equilibrio de las presiones parciales de los gases, movimiento de las aguas freáticas, intercambio iónico y biodegradación.

2.4.1 Mecanismos de transporte

Los contaminantes son transportados a través del suelo principalmente por tres mecanismos principales: flujo de masa de un compuesto disuelto, difusión líquida y difusión gaseosa. El primer mecanismo el flujo de masa se refiere a un transporte pasivo de un soluto disuelto, a través del flujo del agua. La difusión líquida se refiere al transporte de un soluto disuelto, por medio de una colisión molecular.

Los compuestos químicos presentes en el suelo generalmente se mueven por tres mecanismos: (1) difusión gaseosa dentro de un aire de vacío, (2) difusión líquida dentro de una solución y (3) flujo de masa de un compuesto químico disuelto dentro de una solución en movimiento.

Difusión gaseosa. El movimiento de gases a través del suelo se describe por una extensión de la ley de difusión de Fick.

$$J_V = -nD_G^{AIR} \frac{\partial C_G}{\partial z} \dots\dots(2)$$

donde n es la difusión líquida

De una manera similar a la difusión de vapor en el suelo, se utiliza la ley de Fick:

$$J_L = -\frac{\theta^{10/3}}{\phi^2} D_L^{Agua} \frac{\partial C_L}{\partial z} \dots\dots(3)$$

donde D_L^{Agua} es el coeficiente de difusión del compuesto en agua pura.

Flujo de masa. La contribución del flujo de masa de un compuesto transportado puede ser determinado por la concentración del compuesto en solución y la tasa de inestabilidad del agua.

$$J_M = J_W C_L \dots\dots(4)$$

donde J_W es la tasa de inestabilidad

2.4.2 Adsorción

El termino de adsorción describe el proceso por el cual las moléculas contenidas en una fase líquida o gaseosa, tienden a concentrarse en una fase sólida, este proceso, es controlado por factores ambientales como los constituyentes del suelo, contenido de humedad y temperatura. En el suelo este proceso se presenta cuando las moléculas gaseosas, el producto libre y los contaminantes disueltos en el agua son atrapados por las partículas del suelo.

La adsorción se puede presentar de tres formas: física (muy débil), química (mucho más fuerte y similar a unión de los enlaces químicos) y adsorción por intercambio (se caracteriza por una atracción eléctrica entre el adsorbente y la superficie).

La reacción de adsorción entre los compuestos orgánicos disueltos y los LNALP's es del tipo químico, por lo que el equilibrio químico es reversible.

La mayoría de los compuestos del petróleo son no-iónicos, es por eso que se asocian más rápidamente con los orgánicos que con las partículas minerales.

La adsorción es especialmente importante en los sedimentos que contienen un alto porcentaje de materia orgánica y la migración es retardada.

Cuando se relaciona la adsorción con la concentración del contaminante en solución, se obtienen las isotermas de adsorción y de acuerdo con la forma de la gráfica se les clasifica. Las isotermas de adsorción de compuestos hidrofóbicos a bajas concentraciones son lineales y pueden ser descritas con la siguiente ecuación:

$$q = k_d C \dots\dots(5)$$

Donde.

q = es la masa absorbida por masa de suelo.

K_d = pendiente de la isoterma de adsorción.

C = concentración de equilibrio del contaminante disuelto en el agua

Es importante señalar que las moléculas menos solubles son más fáciles de adsorber. La definición de la k_d es difícil de establecer en campo, por lo que estudios de laboratorio han demostrado que la k_d se puede determinar utilizando otros factores como es el contenido de carbono orgánico del suelo y el coeficiente de distribución octanol-agua. El resultado de la adsorción en un suelo contaminado con hidrocarburos es el retardo del movimiento de los contaminantes.

Tabla 2.7. Propiedades que afectan a la adsorción de los contaminantes en el suelo. (Schwalbaum, 1997)

Propiedades del suelo.	Propiedades de los contaminantes	Propiedades ambientales.
Composición de la arcilla y capacidad de intercambio	Estructura electrónica	Temperatura
Contenido de materia orgánica	Solubilidad en el agua	
Contenido de agua en el suelo	composición en solución	
Densidad del suelo suelto	Concentración	
	pH	

Sorción.

La sorción es importante para los compuestos altamente hidrofóbicos, como son los bifenilos policlorados (BPC), y los solventes clorados. La sorción entre las partículas del suelo y los contaminantes orgánicos, puede determinarse, utilizando el coeficiente de partición de carbono orgánico K_{oc} del contaminante, pero como los valores del K_{oc} no se encuentran siempre disponibles, es común utilizar el coeficiente de partición octanol-agua K_{ow} . La sorción se afecta por la temperatura, humedad relativa y porosidad. La sorción puede incrementar el transporte de los contaminantes y por lo tanto afecta la biodisponibilidad y biodegradación de los contaminantes (Testa and Winegradner, 1991).

2.4.3 Volatilización

La volatilización se refiere a la distribución de los contaminantes en la fase gaseosa es decir la transición de los compuestos en forma sólida o líquida a la fase de vapor y puede ocurrir dentro de la matriz del suelo. Cada compuesto tiene una presión de vapor o densidad de vapor característica que varían con la temperatura. El potencial de vapor de un compuesto se alcanza con la presión de vapor inerte. Los compuestos de bajo peso molecular son muy volátiles, por ejemplo el benceno y el tolueno (Iturbe *et. al*, 1998). En el procesos de volatilización, los compuestos más volátiles son los que se evaporan primero, dando como resultado un decrecimiento en la presión de vapor.

La volatilización de compuestos orgánicos depende de las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes (volatilidad, solubilidad y sorción), de las características del suelo (temperatura, contenido de agua, densidad y contenido de materia orgánica, porosidad, densidad, contenido de arcillas), y de la concentración de contaminante presente. Es importante mencionar que bajo condiciones de flujo turbulento la volatilización se incrementa. Song en 1990 demostró que cuando la volatilización de compuestos orgánicos en el suelo decrece, la biodegradación se incrementa.

El movimiento del aire en la zona no saturada es muy lento, este pasa a través de los poros del suelo.

En zonas permeables no saturadas, contaminadas con hidrocarburos ligeros, la volatilización, podría ser el proceso principal para la biorremediación (Schwalbaum, 1997).

Tabla 2.8. Parámetros que afecta la volatilización. (Schwalbaum, 1997)

Parámetros del suelo	Parámetros ambientales	Parámetros del contaminante
Contenido de agua	Temperatura	Concentración
Densidad o porosidad	Viento	Profundidad de penetración
Contenido de arcillas	Evaporación	Irrigación
Densidad del sitio de adsorción	precipitación	
Estructura del suelo	Uso del suelo	

Los compuestos pueden ser clasificados en dos grupos: aquellos cuya resistencia a la volatilización se encuentra principalmente en el suelo (llamados categoría 1) y aquellos cuya resistencia a la volatilización se encuentra principalmente arriba de la capa del suelo, es decir en estado inactivo (llamados categoría 2). Los compuestos son categoría 1, si su constante de Henry es mayor que 10^{-5} , de lo contrario son categoría 2. También se consideran categoría 1 el material volatilizado del suelo a la atmósfera transportado rápidamente. Los compuestos que pertenecen a la categoría 1 son llamados también bien mezclados (Testa and Winegardner, 1991).

2.4.4 Advección

La advección es el proceso donde la sustancia disuelta se transporta con la misma dirección que el flujo del agua. En los acuíferos de materiales muy porosos como arena y grava, la migración de los contaminantes se debe principalmente a la advección, ya que éstos se mueven con el mismo flujo del agua subterránea (Iturbe *et. al.*, 1998).

2.4.5 Difusión

La difusión se refiere al transporte por una diferencia de gradientes, es decir los contaminantes se mueven de zonas de alta concentración a zonas de baja concentración.

Todos los solutos son transportados por difusión molecular, los contaminantes con baja solubilidad en suelos con una alta capacidad de adsorción, se transportan por medio de una difusión hidrodinámica, la cual incluye a los procesos de difusión y flujo de masa (Iturbe *et. al.* 1998).

La difusión líquida se refiere al transporte del soluto disuelto, en solución por medio de colisiones intermoleculares, las cuales mueven el soluto de regiones de altas concentraciones a bajas concentraciones.

Los compuestos químicos incorporados al suelo, penetran principalmente a través de tres rutas. La primera es conocida como lixiviación y ocurre principalmente por un flujo de masa y se describe como un flujo hacia abajo de un compuesto disuelto. La segunda ruta es la volatilización, la cual se refiere a la pérdida de compuestos volátiles, a través de la superficie del suelo y finalmente la degradación, que se refiere a la transformación química (Soto, 1998).

La extensión del soluto transportado a través de difusión líquida en el suelo, es controlada por la cantidad de compuesto disuelto y el espacio disponible para el flujo. Un incremento en la adsorción, tiende a decrecer la concentración de la fase disuelta y por lo tanto decrece la difusión.

El transporte por difusión decrece con un incremento en el contenido de agua porque los espacios de aire decrecen.

El factor principal que afecta el transporte de los compuestos a través de la difusión de vapores, es su concentración, y los factores importantes son la constante de Henry (K_H) y la adsorción. Como regla se tiene un incremento en la adsorción total del compuesto a concentraciones bajas de vapores y un decrecimiento del valor de la constante de Henry a concentraciones bajas de vapores (Knox, 1993). Para compuestos con una apreciable concentración de

vapores, el contenido de agua influye fuertemente en la cantidad de compuesto transportado, a través de la difusión de vapor.

2.4.6 Dispersión

La dispersión generalmente ocurre entre el límite de la pluma de contaminación y el agua fresca, tienen dos componentes: transversal y longitudinal y es el resultado del mezclado del agua subterránea y se define como la tendencia de un soluto a extenderse fuera de la trayectoria del flujo por advección. La dispersión depende de la velocidad del agua subterránea y de las trayectorias del agua debidas a la formación irregular del suelo.

2.4.7 Flujo inmisible

El flujo multifase, se refiere a la combinación del flujo del agua con un fluido inmisible con son los líquidos orgánicos. El comportamiento de la mezcla de flujos inmiscibles a través del acuífero es importante durante la restauración de los mismos. La recuperación de los LNALP's generalmente involucra el movimiento del agua a través de un suelo saturado con hidrocarburos, lo que provoca que se reduzca sustancialmente la permeabilidad (Testa and Winegardner, 1991).

Un flujo inmisible migra a través de la zona no saturada, la fracción del flujo que tiende a la saturación residual es la fase hidrofóbica y afecta el transporte de los contaminantes orgánicos.

Capítulo 3

Marco Legal

En este capítulo se presentan las políticas establecidas en México para la caracterización, determinación de los niveles de contaminación y los criterios de restauración del suelo así como elementos y técnicas que sirven como base para evaluar el daño que ha sufrido un sitio por la presencia de los contaminantes de la industria petrolera y las acciones a seguir para la reparación del sitio; entendiéndose como daño los efectos que ocurren en el subsuelo. Se establece que la causa más importante de contaminación del suelo es el manejo (almacenamiento, tratamiento o disposición) indebido de residuos peligrosos sobre éste.

El marco jurídico ambiental inicia en el año de 1972 con la promulgación de la *“Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental”*, esta Ley regulaba los problemas de contaminación; pero no era específica en los problemas de contaminación de suelos (PROFEPA, 1999).

En 1982, se abroga esta Ley y se promulga la *“Ley Federal de Protección al Ambiente”*, la cual regulaba los problemas de contaminación de aire, agua y suelo; pero tampoco de esta ley se desprendieron normas relacionadas con la protección de los suelos (PROFEPA, 1999).

En 1988 se publica la *“Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente”* (LGEEPA). El 13 de diciembre de 1996, se reforma esta Ley y se incorporan los instrumentos de política ambiental denominados Criterios Ecológicos, Autorregulación y Auditoría Ambiental (PROFEPA, 1999).

A pesar de las diversas regulaciones, para el suelo no existen, Normas Oficiales Mexicanas (NOM) o Normas Mexicanas (NMX) que establezcan los límites máximos permisibles de contaminantes en un suelo después de haber sometido a un tratamiento de restauración (PROFEPA, 2000).

En julio de 1996, cuando se publicó el Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), las actividades sobre restauración de suelos contaminados se encontraban dispersas y desarticuladas, en 1998 se delegaron las actividades de restauración de suelos contaminados a la PROFEPA.

Por tal motivo, con base en lo dispuesto en la LGEEPA y en el Reglamento Interior de la SEMARNAP, se confirieron a la PROFEPA atribuciones específicas en materia de restauración de suelos contaminados como el derecho de toda persona a vivir en un medio sano, preservando y restaurando y, la prevención y control de la contaminación de aire, agua y suelo; estableciendo los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre las autoridades y los sectores social y privado (Reformas a la ley).

Es importante destacar que uno de los principios esenciales de la política ambiental, contenido en la fracción IV del artículo 15 de la LGEEPA, en donde se consigna que *"toda persona que realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligada a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, asumiendo los costos que dicha afectación implique"*.

Por otra parte, pero en estrecha vinculación con lo anterior, en el artículo 152 BIS de la propia ley, dice que tratándose de contaminación de suelos por la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos los responsables de dichas operaciones deben realizar las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo y así estar en posibilidad de reintegrarlo a su vocación natural (LGEEPA).

Como referencia a las actividades de restauración de suelos el INE contaba con atribuciones para establecer normas y criterios para la conservación o restauración del ambiente, en particular en situaciones de emergencia o contingencia ambiental, mientras que la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente en materia de sitios contaminados, se ajustaba a dar seguimiento a las técnicas y niveles de restauración que autorizaba dicho Instituto caso por caso, ya que no se contaba y no se cuenta aún con disposiciones reglamentarias. Sin embargo en el ámbito operacional resultó inapropiado motivo por el cual se confirieron atribuciones específicas a la PROFEPA tanto

en las modificaciones a la LGEEPA como en el Reglamento Interior de la SEMARNAP de fecha 5 de junio del 2000.

Debido a que el manejo de residuos peligrosos esta íntimamente relacionado con la prevención de la contaminación del suelo se hace necesario realizar una revisión de la legislación ambiental en materia de residuos peligrosos.

En la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente se establecen por primera vez los criterios generales sobre el manejo de los materiales y residuos peligrosos y la prevención y control de la contaminación del suelo en el capítulo III artículo 42. Los criterios de la LGEEPA son imprecisos, incompletos y ambiguos. La entidad mexicana que hace cumplir la LGEEPA es la SEMARNAP. Hasta la fecha, en ningún reglamento ni Norma Oficial Mexicana se mencionan los criterios para la evaluación de suelos contaminados, los únicos parámetros que existen se refieren a la definición de residuos peligrosos y en este caso no son aplicables dado que los suelos contaminados no pueden ser considerados como residuos.

3.1 Legislación Ambiental Mexicana.

En materia de legislación ambiental el 28 de enero de 1998 se promulgó la LGEEPA con base en los artículos 27 y 73 fracción X constitucionales, en esta ley se define la política ecológica y se señalan las disposiciones de orden ecológico como la evaluación del impacto ambiental, riesgo ambiental, la protección de la flora y la fauna silvestre y acuática, el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, la prevención y restauración ecológica en materia de aire, agua y suelo, la participación social, educación ecológica, medidas de control, seguridad y sanciones.

La LGEEPA está compuesta por 194 artículos divididos en seis títulos:

- I. Disposiciones generales
- II. Areas naturales protegidas.
- III. Aprovechamiento racional de los elementos naturales
- IV. Protección al ambiente
- V Participación social
- VI Medidas de control y seguridad

Gran parte de los contaminantes del suelo y subsuelo se generan en instalaciones que cuentan con tanques de almacenamiento de combustibles, sin embargo en la legislación mexicana no se menciona nada sobre derrames de productos derivados de la industria petrolera. Únicamente en el título IV, capítulo IV, se destacan las acciones de la industria petroquímica, metalúrgica y procesamiento de minerales radioactivos como actividades peligrosas (SEDESOL-INE, 1994).

Conforme al artículo 139 de la LGEEPA, toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley, el problema es que no se cuenta con un programa de suelo que permita dar congruencia a todas las políticas, los criterios y las normas que inciden en la regulación del uso de suelo.

En lo que se refiere a la contaminación de las aguas, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología publicó en el Diario Oficial del 13 de Diciembre de 1989, el acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de la calidad del agua CE-CCA-001/89

Hay varios aspectos que es necesario abordar de manera urgente para trabajar con grupos interdisciplinarios:

- La creación de un Reglamento en Materia de prevención y Control de la Contaminación del Suelo y Subsuelo.
- La preparación de especialistas en evaluación de riesgo, en materia de contaminación de suelo y subsuelo.
- La generación de los instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de remediación de suelos. Como son los límites permisibles de contaminantes y la metodología oficial para el seguimiento de las actividades de remediación
- Revisión y adecuación de los formatos oficiales de auditorías ambientales.
- Desarrollo de evaluaciones más objetivas
- Desarrollo de metodologías objetivas para la evaluación de tecnologías para el saneamiento de sitios contaminados.

3.2 Legislación Mexicana Sobre Contaminación de Suelos.

En México no existe una legislación adecuada para prevenir y controlar la contaminación del suelo, lo único que existe son los 11 artículos del título IV, capítulo III de la LGEEPA, prevención y control de la contaminación del suelo, donde se establecen criterios muy generales sobre el tema. mencionando que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo sin considerar otros contaminantes que pueden derramarse durante las actividades industriales, por ejemplo los residuos del procesamiento del petróleo, incluyendo combustibles y petroquímicos, aceites gastados y metales, los cuales se consideran residuos peligrosos (SEDESOL-INE,, 1994).

Los suelos contaminados con hidrocarburos se consideraban materiales peligrosos, por lo que se solicitaba al análisis CRETIB, sin embargo el INE, a través de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosos, ha rescatado al suelo como recurso natural, estableciendo criterios basados en análisis químicos. En la actualidad lo que procede es identificar el tipo y concentración de los contaminantes, lo cual constituye el punto de partida para estudiar las alternativas que permitan su tratamiento (Sánchez, 1997).

El artículo de la LGEEPA referente a la Protección y Control de la contaminación del suelo es muy limitado y confuso, ésto se debe a que no se ha reconocido el papel que desempeña el suelo como un recurso natural. Recientemente se presentó a la Comisión de Ecología y Medio Ambiente de la Cámara de Diputados, una propuesta de modificación al capítulo referido, con la intención de proteger y limpiar las zonas afectadas. La revisión de dicha propuesta actualmente está en proceso. A continuación se resumen los aspectos más importantes que no son considerados en la actual legislación y que se resaltan en la propuesta: (Saval, 1995)

- Suelo y subsuelo como un recurso natural difícilmente renovable.
- Las funciones del suelo son:
 - Filtro regulador durante la recarga de acuíferos y protección de los mismos.
 - Medio para la producción de alimentos.

-
- Hábitat biológico y reserva genética.
 - Escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos y de la cadena alimentaria.
 - Base física para la construcción de edificaciones.
 - Albergue de la reserva cultural.
 - Los contaminantes de suelos y acuíferos son:
 - Las aguas residuales descargadas sin previo tratamiento.
 - La lixiviación de rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto.
 - Las fugas del alcantarillado.
 - La infiltración de canales a cielo abierto y ríos contaminados.
 - La lixiviación de materiales de cementerios industriales.
 - Las fugas de tanques y ductos.
 - La lixiviación de agroquímicos.
 - La disposición incontrolada de residuos peligrosos.
 - Los suelos son parte del patrimonio nacional, por lo que aquellos que están contaminados deben ser remediados independientemente de su valor, uso de suelo y de la cercanía de los asentamientos humanos.
 - Cuando la contaminación ocurre como resultado de actividades económicas, el suelo debe ser remediado por los responsables del derrame dentro de un tiempo razonable que asegure que los contaminantes no llegarán al acuífero.
 - Una vez que se ha detectado la fuente de contaminación, ésta debe cerrarse a fin de que se realicen las actividades de remediación.
 - Deben buscarse alternativas de remediación que no lleven a la destrucción o confinamiento del suelo a menos que no exista otra alternativa.

También hay varios aspectos que son necesarios abordar de manera urgente: (Sanchez, 1997)

- La creación de un reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación del suelo y subsuelo que responda a la legislación ambiental.
- La generación de instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de rehabilitación de suelos como son los límites permisibles de contaminantes que se convertirán en los niveles de limpieza para sitios contaminados y la metodología oficial para el seguimiento de las actividades de rehabilitación.

- La creación de programas de financiamiento destinadas específicamente a prevenir y controlar la contaminación del suelo y subsuelo.

Así mismo falta desarrollar el reglamento y las normas respectivas que establezcan (INE, 1999):

- Las responsabilidades y los ordenamientos para que los sitios que han sido dañados y contaminados queden en las mismas condiciones.
- Procedimientos para la identificación de los sitios contaminados.
- Métodos de caracterización de la contaminación.
- Los niveles de contaminación permitidos en caso de derrames de sustancias o residuos peligrosos.
- Los criterios de limpieza, remoción y restauración de un sitio.

La ausencia de disposiciones adecuadas, hacen poco efectiva la prevención y control de la contaminación del suelo, pues la inconsistencia de la LGEEPA genera limitaciones que deben corregirse para alcanzar las metas del saneamiento del suelo en México.

Por otro lado la LGEEPA no ha instrumentado Normas o Reglamentos sobre los criterios para la evaluación de los suelos y aguas subterráneas contaminadas, mucho menos se cuenta con los niveles de limpieza para suelos y aguas subterráneas, por esto, las autoridades mexicanas han establecido procedimientos y límites de limpieza a partir de información extranjera, principalmente de los estados Unidos de América, pero sin un criterio objetivo y uniforme para seleccionar las más adecuadas a nuestro medio (Sanchez, 1997).

3.3 Marco Normativo para la restauración de suelos contaminados en México.

Para la biorremediación de suelos y acuíferos, se requiere de la participación de grupos interdisciplinarios en donde se definan las políticas de operación, técnicas de muestreo de suelos, técnicas de análisis químicos y estudios de evaluación de riesgo a la salud y al ambiente, así como la definición de los criterios de limpieza.

Las técnicas de biorremediación han surgido como una alternativa para el saneamiento de suelos y acuíferos contaminados por ser económicas, limpias, efectivas y seguras, sin embargo no puede aplicarse a todos los casos.

Dada la diversidad de técnicas para la biorremediación, la poca experiencia en el campo y algunas malas prácticas se ha planteado la necesidad de establecer políticas en las que se demuestren aspectos como (PROFEPA, 1999)

- Conocer la base científica del funcionamiento de la tecnología.
- Experiencias buenas y malas en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar.
- Personal técnico idóneo.
- Justificar el uso de productos microbianos y aditivos, así como dar a conocer su composición y características de seguridad hacia el ambiente.
- Contar con un protocolo donde se establezca el seguimiento que se dará al proceso durante la aplicación de la tecnología en campo.

Los aspectos mencionados conforman el marco normativo de referencia bajo el cual el Instituto Nacional de Ecología dará la certificación a tecnologías para la remediación de sitios contaminados (INE, 1997). Para este procedimiento se apoyan en órganos colegiados representados por universidades y centros de investigación reconocidos en el área.

Aunque existen una gran cantidad de tecnologías de remediación, no es fácil decidir cual es la opción más adecuada pues cada sitio constituye una problemática particular, por lo que PEMEX-Refinación realiza una evaluación de tecnologías de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos para la asignación de contratos.

Es por esto que la Gerencia Jurídica de PEMEX se ha interesado en conocer la problemática de las actividades de remediación. Para esto en colaboración con el Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM, y otras instituciones se esta integrando un proyecto que tiene como objetivo proporcionar a PEMEX las herramientas jurídicas y técnicas para plantear soluciones al problema de la contaminación de suelos. En dicho proyecto está participando también PRPFEP, la Gerencia Jurídica de PEMEX y el Programa Universitario de Energía (Carmona, 1998).

El actual reglamento interior de SEMARNAT en el artículo 59 fracción X no menciona las actividades de restauración de sitios contaminados, ya que no representan una "emergencia ambiental" sin embargo en las fracciones VI y VII del artículo 68 del reglamento Interior de SEMARNAT, la DGEA cuenta con atribuciones para formular programas para la evaluación, restauración y seguimiento de daños ambientales, así como para elaborar programas para la identificación, evaluación y restauración de sitios contaminados, por lo tanto cuando ocurren accidentes en los que se involucran materiales y/o residuos peligrosos la DGEA recomienda que la PROFEPA ordene al responsable efectuar:

- Un estudio de evaluación de daños ambientales, incluyendo todos los componentes que fueron afectados, así como una estimación sobre el grado de afectación.
- Propuesta de restauración, que debe contener la tecnología que piensa aplicarse, los niveles de limpieza propuestos, las áreas a tratar y el tiempo necesario para cada una de las fases de restauración.
- Investigación del accidente, que consiste en analizar, cual fue la causa raíz que originó el accidente.

Se puede concluir que conforme a la distribución de competencias plasmadas en la LGEEPA y el reglamento interior de SEMARNAT, la determinación de parámetros para la restauración de sitios contaminados cuando no existe una NOM específica, son responsabilidad de PROFEPA, si se consideran como medidas de seguridad.

El marco legal dentro del cual se realizan las actividades de limpieza de sitios contaminados está conformado principalmente por el artículo 134 fracción V de la LGEEPA, dice que en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizadas en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable (Reglamento LGEEPA). El artículo 139 involucra a la Comisión Nacional del Agua mencionando que toda descarga, depósito e infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley (LGEEPA), la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentaria y las normas oficiales mexicanas (Reglamento Aguas Nacionales).

Finalmente la participación del sector académico en las actividades de limpieza y restauración de sitios contaminados se enmarca en el artículo 29 fracción VII, de SEMARNAT, el cual cita que una de las atribuciones de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas es promover la celebración de convenios con universidades y centros de investigación, para la realización de estudios sobre tecnologías y sistemas de manejo de residuos peligroso (PFPA, 2000).

Existen otros instrumentos legales de apoyo para la limpieza de sitios contaminados como:

- El reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por vertimiento de Desechos.
- El reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos.
- El reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental

3.3.1 Criterios de muestreo y análisis

Criterios de muestreo

Existen dos criterios de muestreo que se aplican durante una restauración: El Muestreo estadístico y el Muestreo a juicio de experto o dirigido (PFPA, 1999). El primero aplica cuando se trata de sitios abandonados en los cuales ha transcurrido un lapso muy dilatado desde que se depositaron los contaminantes, existe una mezcla de productos y la profundidad de la afectación es muy considerable. El segundo tipo de muestreo se aplica cuando son accidentes de transportación, en las cuales se conoce el producto derramado (normalmente uno solo), se puede delimitar la extensión de la afectación y el tiempo transcurrido no es muy prolongado.

Con el fin de uniformar criterios, la PROFEPA determinó, la cantidad de muestras necesaria para dictaminar sobre un proceso de restauración:

- Se tomará una muestra simple y puntual por cada 310 m² y cada metro de profundidad cuando se realice tratamiento *"in-situ"*, es decir, cuando el suelo no sea removido de su lugar original.

- Se tomará una muestra compuesta por cada 500 toneladas (310 m³ aproximadamente), cuando se realice tratamiento "on-site", esto es, cuando se involucre excavación y tratamiento dentro del predio (PRPFEP, 1999).

Análisis químicos

Debido a que tampoco contamos con métodos analíticos oficiales para determinar los niveles de contaminación se recurre a los establecidos por instituciones extranjeras, los más comunes son los métodos de la USEPA (Environmental Protection Agency) y los ASTM (American Society for Testing Materials). Existen varios métodos para cuantificar un mismo parámetro, pero algunos son específicos para muestras de agua y otros para muestras de suelo.

En lo referente a la nomenclatura y definición de los métodos de laboratorio se acordó recomendar que las determinaciones se realicen de acuerdo con las especificaciones de la tabla 3.1

Tabla 3.1 Métodos para los análisis químicos de los contaminantes (PROFEPA, 2000)

Contaminante	Método
Hidrocarburos base diesel	Cromatografía de gases-Ionización de flama extraídos con cloruro de metileno (USEPA 8015 B*)
Hidrocarburos base gasolina	Cromatografía de gases-Ionización de flama extraídos con cloruro de metileno (USEPA 8015 B*)
Hidrocarburos recuperables de petróleo	Espectrometría en infrarrojo, extraídos con hexano (USEPA 418.1** o ASTM 3921)
Benzopireno	Cromatografía de gases. Extraídos con cloruro de metileno (USEPA 8310, 8100 u 8270 (Hidrocarburos poliaromáticos))
Benceno	Cromatografía de gases-Espectrometría de masas extraídos con cloruro de metileno (USEPA 8240 u 8260C (Hidrocarburos monoaromáticos y otros compuestos orgánicos volátiles)

Contaminante	Método
Plomo total	Espectrofotometría de absorción atómica- aspiración directa (USEPA 7420)
Arsénico total	Espectrofotometría de absorción atómica- generación de hidruros (USEPA 7061)
Bario total	Espectrofotometría de absorción atómica- aspiración directa (USEPA 7080) NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
Cadmio total	Espectrofotometría de absorción atómica- aspiración directa (USEPA 7130) NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
Mercurio total	Espectrofotometría de absorción atómica- vapor frío (USEPA 7471) NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
Níquel total	Espectrofotometría de absorción atómica- aspiración directa (USEPA 7520) NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
Selenio total	Espectrofotometría de absorción atómica- generación de hidruros (USEPA 7741) NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
Zinc total	Espectrofotometría de absorción atómica- aspiración directa (USEPA 7950) NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
Cromo total	Espectrofotometría de absorción atómica- aspiración directa (USEPA 7190) NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
Cianuros	Colorimetría (USEPA 9010A)
Acilamida	Cromatografía de gases- espectrometría de masas con purga y trampa (USEPA 8260C)
Acilonitrilo	Cromatografía de gases- espectrometría de masas con purga y trampa (USEPA 8260C)
Plomo orgánico	Pendiente
Bifenilos policlorados	USEPA 8080
Plaguicidas	NOM-053-ECOL/1993
Hidrocarburos monoaromáticos totales (Aromina+otros disolventes)	Cromatografía de gases- espectrometría de masas con purga y trampa (USEPA 8260C)

Fuente Profepa

Última actualización: 16 de Junio del año 2000

*El método USEPA 8015 detecta hidrocarburos hasta de 40 carbonos

** El método USEPA 418.1 detecta hidrocarburos mayores de 40 carbonos pero si la muestra contiene otros compuestos no polares, éstos pueden interferir.

Para las mediciones inicial y seguimiento de los contaminantes en suelo, se deberá usar el mismo método de laboratorio, la decisión entre los métodos a utilizar está en función de cada caso en particular.

3.3.2 Criterios Internos de Restauración de Suelos

En ausencia de normatividad que establezca niveles de limpieza a alcanzar en los suelos contaminados durante el saneamiento, se han utilizado referencias internacionales ya que no existen criterios para elegir entre un valor y otro, lo que hace difícil establecer si una concentración fijada antes de algún tratamiento es tan rigurosa que será difícil alcanzarla, o bien, es tan alta que aún representa un riesgo a la salud o el ambiente.

La experiencia sugiere la necesidad de realizar estudios de evaluación de riesgo para cada caso particular; sin embargo, se necesita una reglamentación propia que establezca un procedimiento uniforme para realizar dichos estudios, pues los diversos enfoques de evaluación de riesgo pueden dar como resultado un intervalo muy amplio en las concentraciones permisibles.

Para establecer límites de limpieza, la PROFEPA gestionó la creación del "Grupo de Trabajo sobre Restauración de Sitios Contaminados con Materiales y Residuos Peligrosos", el objetivo del grupo es proponer:

- Criterios, lineamientos y niveles de limpieza.
- Técnicas y métodos de análisis de laboratorio
- Documentar métodos exitosos y no exitosos
- Participar en la elaboración de un registro de restauración (RDR)
- Proponer programas de seguimiento posteriores al tratamiento

El grupo determinó que las sustancias más frecuentes en emergencias o contingencias ambientales son en orden de ocurrencia (PROFEPA;1999):

- Petróleo crudo
- Combustóleo
- Diesel
- Gas LP
- Amoniaco
- Gasolina Nova

-
- Gasolina Magna
 - Acido Sulfúrico
 - Cloro
 - Tolueno
 - Aceites residuales

También se decidió incluir al xileno debido a su alta incidencia y su peligrosidad intrínseca.

Se consideraron a estos productos porque, en los registros sobre emergencias ambientales más del 90% de las emergencias ocurridas durante el período de 1997 al primer semestre del 2000, se vieron involucrados estos productos.

Este primer grupo de ocho Criterios Interinos se enfoca principalmente a hidrocarburos y a ácidos y bases, ya que los derrames de hidrocarburos son los que más llaman la atención y por efectos de la actividad petrolera e industrial de nuestro país, se tiene un gran número de suelos contaminados con derivados del petróleo.

Para la definición de los criterios interinos de limpieza, se tomaron como base tres aspectos principales:

1. Dar énfasis a la presencia de compuestos químicos indicadores de toxicidad y su efecto en la salud.
2. Considerar la concentración de hidrocarburos como un parámetro de control en la restauración del suelo.
3. Aplicar criterios en función del uso del suelo considerando tres tipos:
 - Suelo 1 agrícola, forestal, recreativo, de conservación
 - Suelo 2 residencial, comercial
 - Suelo 3 industrial.

Con base en lo anterior se establecieron los criterios internos de limpieza para suelos contaminados que se presentan en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Criterios Internos de restauración de suelos contaminados con hidrocarburos

Uso del suelo:	Agricultura Forestal Recreativo de Conservación mg/Kg (ppm)	Residencial Comercial	Industrial	Método Analítico (USEPA)
Gasolina HC	200	200	500	8015
Benceno*	20	20	50	8240u 8260c
Tolueno	40	40	100	8240u 8260c
Xilenos	40	40	100	8240u 8260c
Diesel HC	1,000	1,000	2,000	8015
Benzopireno*	0.08	0.08	0.08	8310, 8100, 8270u
Benzo(a)antraceno*	0.80	0.80	0.80	8310,8100u, 8270
Benzo(b)fluoranteno*	0.80	0.80	0.80	8310,8100u, 8270
Benzo(k)fluoranteno*	8.0	8.0	8.0	8310,8100u, 8270
Criseno*	80.0	80.0	800.0	8310,8100u, 8270
Residuos aceitosos				
HC recuperables	1,000	1,000	2,000	418.1
Benzopireno*	0.08	0.08	0.75	8310,8100u, 8270
Benzoantraceno*	0.8	0.8	7.5	8310,8100u, 8270
Benzofluoranteno*	0.8	0.8	7.5	8310,8100u, 8270
Benzofluoranteno*	8.0	8.0	75.0	8310,8100u, 8270
Criseno*	80.0	80.	750.0	8310,8100u, 8270

Contaminante (mg/kg, ppm) *compuestos cancerígenos

Acidos (ácido sulfúrico)	pH del suelo > 4
Bases (sosa)	pH del suelo < 10

Estos criterios son referencias genéricas. Cada propuesta de restauración se resuelve caso por caso. Para las mediciones inicial y de seguimiento de los contaminantes en suelos, se deberá usar invariablemente el mismo método de laboratorio.

3.4 Procedimientos administrativos para el saneamiento de suelos en México

En suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos es necesario llevar a cabo acciones para recuperar o restablecer sus condiciones para que puedan ser utilizados nuevamente.

El INE establece normas y criterios ecológicos para restaurar la calidad del ambiente y clasifica los suelos de acuerdo a la notificación de su contaminación (INE, 1997):

- Emergencias ambientales.
- Auditorias ambientales
- Verificación industrial
- Abandonados
- Notificación voluntaria

El procedimiento de PFFA para la restauración de suelos contaminados es:

1. Detección del sitio
2. Evaluación del daño
3. Propuesta de restauración
4. Seguimiento y conclusiones

En los términos de la legislación vigente, el responsable de un derrame o fugas de materiales peligrosos, debe realizar las actividades enfocadas a limpieza de sitios. Debido a la diversas alternativas que existen para la limpieza de sitios contaminados es importante evaluar y analizar las diferentes tecnologías que pueden aplicarse.

Las técnicas incluidas en el Registro de Restauraciones (RDR) son (PROFEPA, 2000):

1. Excavación y Confinamiento
2. Extracción de vapores
3. Lavado de suelos
4. Tratamiento térmico (desorción, incineración y pozos térmicos)
5. Neutralización
6. Oxidación
7. Ozonación
8. Estabilización/solidificación
9. Biolabranza
10. Bioestimulación/degradación
11. Biopilas

Con base a lo anterior, la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas del Instituto Nacional de Ecología, en febrero de 1998 dio a conocer la nueva política a seguir para la limpieza de sitios contaminados. Básicamente son dos tramites:

Acreditación de la tecnología.

Para este trámite es necesario llenar los formatos correspondientes a la *Solicitud de acreditación para la empresa y las tecnologías que ofrecen servicios de restauración de sitios*, a la cual se debe anexar la información correspondiente a la tecnología y la empresa, la descripción detallada de la tecnología propuesta, los documentos que avalen su certificación, un listado de experiencias previas y los datos curriculares de la empresa (Sánchez, 1997). Con esto se conforma el expediente que deberá ser evaluado por un órgano colegiado. Cuando se ha cumplido con este trámite se pasa al siguiente.

Evaluación del plan de remediación.

Se debe integrar un documento que lleva el título "*Presentación del plan de restauración de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos*", el cual debe contener los estudios de caracterización del sitio, el programa de trabajo calendarizado, el protocolo de pruebas a nivel laboratorio y en campo y el estudio de riesgo a partir del cual se definen los niveles de limpieza a alcanzar (Sanchez ,1997).

El INE es quien fija los niveles de limpieza por alcanzar, de acuerdo con la empresa contaminadora y con la empresa de servicios ambientales. Los elementos que sirven como referencia para establecer éstos niveles de limpieza son los estudios de riesgo, pero es necesario contar con la caracterización completa del sitio.

Los estudios de riesgo consideran dos aspectos básicos que son: la peligrosidad de la contaminación y el tipo de exposición. Con el análisis de peligrosidad se determina la toxicidad de los contaminantes en el sitio mientras que con el de exposición se evalúan los medios por lo cuales un ser humano encuentra los contaminantes que se generan en un sitio.

El análisis de riesgo consta de tres criterios principales:

- La actividad del nivel de peligrosidad para químicos que tiene efectos tóxicos.
- La aditividad del nivel de peligrosidad para exposición de un mismo compuesto.
- Los efectos sinérgicos

En algunas ocasiones se manejan estándares oficiales extranjeros, pero es conveniente conocer la base de razonamiento que llevó a éstos valores, con la finalidad de tener elementos que permitan definir su aplicabilidad a otro sitio (Vidal, 1998).

Evaluación del daño.

La evaluación del daño constituye un estudio completo de caracterización que incluye: un análisis del sitio y sus alrededores, un análisis geohidrológico, un análisis químico de los contaminantes y un análisis fisicoquímico del suelo o agua contaminados (Vidal, 1998). Este estudio es muy preciso ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las medidas de mitigación, limpieza y en su caso, restauración.

Desde el punto de vista técnico, la estrategia para la reparación del daño es única para cada caso, se puede hablar de varios niveles de reparación del daño: mitigación, remediación y restauración (Saval, 1998). Las medidas de mitigación son todas aquellas acciones inmediatas que se toman para evitar un daño mayor. En la remediación no todas las tecnologías son aplicables a todos los casos, por lo que se recomienda la realización de estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio, para obtener información sobre su efectividad; para la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos, la biorremediación es de las mejores desde el punto de vista ambiental y económico, aunque las altas concentraciones de hidrocarburos o la presencia de otros contaminantes como metales pesados y compuestos clorados pueden limitar el tratamiento y finalmente cuando se observa el restablecimiento de los procesos naturales, se puede comprobar la restauración del sitio.

Para finalizar conviene resaltar que la evaluación de un daño ambiental no es requisito administrativo, es una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos.

Capítulo 4

Biopilas como tecnología de saneamiento

El suelo contiene consorcios de microorganismos como bacterias, algas, protozoos y actinomicetos; de estos organismos, las bacterias son el grupo más numeroso y bioquímicamente el más activo (Deyta, 1999). El suelo contaminado en ocasiones es pobre en materia orgánica y con una baja actividad microbiana, pero por lo general la comunidad bacteriana se adapta a la presencia del contaminante, aunque la disponibilidad de nutrientes así como la concentración de oxígeno pueden provocar una baja degradación de los contaminantes en el sitio.

Las bacterias requieren una fuente de carbono y nutrientes como nitrógeno y fósforo para su crecimiento. La fuente de carbono disponible son los hidrocarburos, también requieren de un contenido de humedad óptimo que no sea excesivo, ya que el agua puede ocupar todos los espacios vacíos e impedir el flujo del oxígeno y su disponibilidad para las bacterias. La tasa de crecimiento de las bacterias está en función de la temperatura; por ejemplo, en el rango de 10°C a 45°C las bacterias degradadoras de hidrocarburos tienen su máximo crecimiento (Trejo, 1998).

La USEPA demostró que la presencia de altas concentraciones de hidrocarburos así como de metales pesados en el suelo contaminado pueden ser tóxicos e inhibir el crecimiento de las bacterias degradadoras, provocando una baja actividad microbiana. También asegura que la actividad microbiana puede mejorarse modificando la humedad y los nutrientes, con esto se logra acelerar la biodegradación de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) adsorbidos por las partículas del suelo.

La tecnología de biopilas puede ser utilizada para tratar suelos contaminados con hidrocarburos, estimulando a las bacterias nativas para que degraden los contaminantes (EPA, 1994).

Las biopilas son conocidas como bioceldas, biomontículos o pilas de composteo. Se utilizan para reducir las concentraciones de HTP en suelos contaminados con hidrocarburos a través de la biodegradación. La biopila se define como un proceso biológico controlado donde los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados. El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad. El incremento de la actividad microbiana es directamente proporcional a la reducción de las concentraciones de HTP (EPA, 1994).

La tecnología de biopilas es similar a la biolabranza ya que ambas son *ex situ*, utilizan el oxígeno contenido en el aire y estimulan el crecimiento de bacterias aerobias, las cuales degradan los constituyentes del petróleo adsorbido por el suelo; pero su diferencia radica en la forma de suministrar el oxígeno, es decir en la biolabranza se suministra el oxígeno labrando o arando el suelo contaminado, mientras que en la biopilas el aire se inyecta o extrae a través de tubos perforados o ranurados que atraviesan la pila figura 4.1 (EPA, 1994).

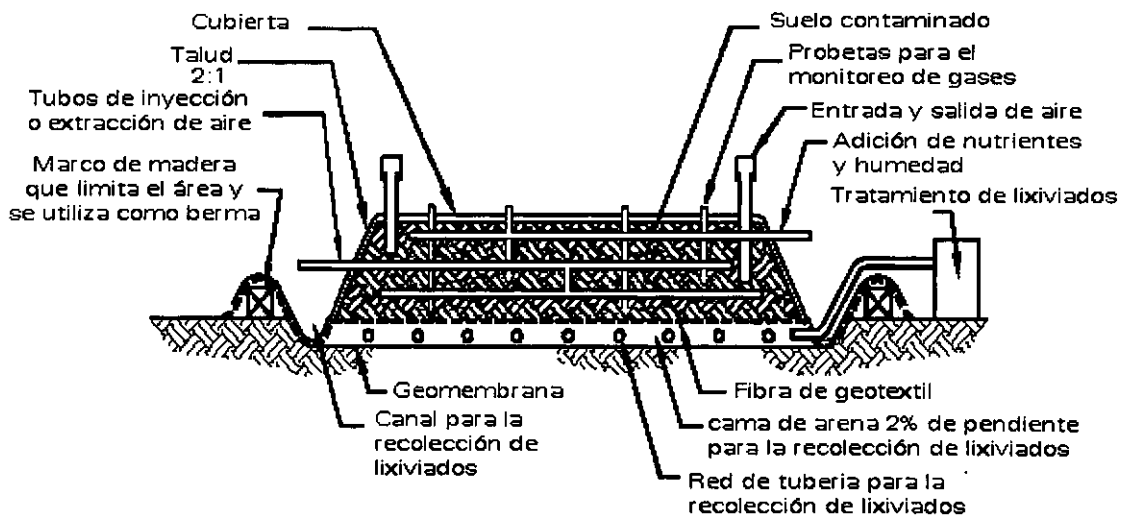


Figura 4.1 Esquema de la biopila

Los lixiviados se colectan a través de un sistema de drenaje y pueden ser tratados en bioreactores antes de ser reciclados. Los parámetros que deben controlarse para aumentar la biodegradación son: humedad, temperatura, nutrientes, (carbono, nitrógeno y fósforo), oxígeno y pH (Fahnestock *et al*, 1998) Las biopilas son utilizadas principalmente en suelos contaminados con

hidrocarburos. El tiempo de operación puede ser de 6 meses a 2 años aproximadamente.

Los productos ligeros del petróleo como la gasolina, tienden a evaporarse durante el proceso de aireación, por lo tanto su degradación microbiana disminuye. Las normas correspondientes para las emisiones a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles (COV) determinarán si es necesario controlar las emisiones; el control consiste en capturar los vapores y tratarlos antes de ser liberados a la atmósfera.

Los productos intermedios como el diesel y el keroseno contienen un bajo porcentaje de compuestos volátiles, por lo que su biodegradación es más significativa que su volatilización (Siebe, 1998).

Los productos pesados (no volátiles) como los aceites lubricantes no se volatilizan durante la aireación, el mecanismo para disminuir las concentraciones de sus HTP es la biodegradación; sin embargo, la actividad microbiana requiere de un tiempo mayor para degradar estos compuestos.

Una vez formadas o construidas las pilas, éstas deben cubrirse con una cubierta de plástico para evitar la volatilización de HTP y pérdida de calor en el proceso. Si la concentración de compuestos volátiles es significativa, deberá colocarse un filtro a la salida del aireador, para tratar los gases antes de ser liberados a la atmósfera (EPA, 1994).

4.1 Características de la Biopila

La efectividad de la biopila depende de varios parámetros, los cuales se encuentran agrupados en tres categorías:

1. Características del suelo.
2. Características de los contaminantes.
3. Condiciones climatológicas.

La textura del suelo afecta la permeabilidad, el contenido de humedad y la densidad del suelo; por ejemplo, los suelos con texturas finas son menos

permeables que los de texturas gruesas y a su vez los suelos con baja permeabilidad son más difíciles de airear por lo que los suelos, con alta permeabilidad son los más adecuados para el uso de las biopilas.

Durante el proceso de saneamiento existen varios parámetros que deben ser monitoreados en el laboratorio; por ejemplo, las concentraciones de contaminantes deben ser analizados por lo menos una vez a la semana, así como la actividad microbiológica (EPA, 1994).

La altura de la biopila puede variar entre 0.9 y 3 m, aunque por lo general se construyen de 1.5 porque a alturas mayores no se asegura una buena aireación. Para el largo y ancho de la biopila no existe restricción, a menos que la aeración se produzca por volteo mecánico de la pila, en este caso el ancho de la pila no debe ser mayor de 2.4 m (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Las biopilas son construidas en capas por su facilidad constructiva, es decir primero se coloca una capa de suelo, luego se coloca la red de tubos de aeración y posteriormente se colocan capas hasta alcanzar la altura deseada.

Fahnestock and Wicramanayake en 1998 determinaron que el suelo contaminado puede requerir un pretratamiento antes de construir la biopila para aumentar la biodegradación de los contaminantes, para ello es necesario mezclarlo con materiales tales como:

- a) Estiércol, para aumentar la población microbiana y adicionar nutrientes
- b) Agentes texturizantes como aserrín o paja para modificar su textura y asegurar que la pila tenga una permeabilidad óptima.
- c) Agentes químicos para ajustar el pH del suelo, el pH óptimo para el crecimiento de las bacterias es de 6 a 8.
- d) El agua debe ser añadida periódicamente a la pila porque el suelo se seca como resultado de la evaporación provocada por el proceso de aireación.

Debido a que los compuestos orgánicos volátiles tienden a volatilizarse de la pila durante la aireación antes de degradarse, será necesario colocar un filtro

de carbón activado en la salida del aire, para capturar los gases que posteriormente serán tratados.

Para evitar el flujo de lixiviados al agua subterránea las biopilas deben construirse sobre una base impermeable, ésta puede ser natural o artificial; es decir, sobre una capa de arcilla o sobre una geomembrana, esto depende de las características geohidrológicas del sitio contaminado. También deben construirse drenes colectores de lixiviados para su posterior tratamiento.

Las ventajas y desventajas de las biopilas se agrupan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Ventajas y Desventajas de la Biopilas (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El diseño es relativamente fácil. • El tratamiento requiere de tiempos cortos. Generalmente de 6 meses a 2 años bajo condiciones óptimas • Es efectiva para suelos contaminados con compuestos orgánicos • Requiere de menos área que la biolabranza. • Puede ser diseñada como un sistema cerrado y controlar las emisiones a la atmósfera. • Puede ser utilizada para diversas condiciones de sitios y productos del petróleo. • Los contaminantes son destruidos y se reduce la toxicidad. • No se requiere un tratamiento adicional. • El costo es competitivo con otras tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> • La reducción de las concentraciones después del 95% es muy difícil • No es efectiva para concentraciones > 50,000 ppm de TPH • La presencia significativa de metales pesados (> 2,500 ppm) puede inhibir el crecimiento microbiano. • Los compuestos volátiles tienden a evaporarse y no a biodegradarse durante el tratamiento. • Requieren grandes áreas para el tratamiento, aunque menores que la biolabranza. • Los vapores generados durante el proceso pueden requerir un tratamiento a priori antes de descargarlos a la atmósfera. • No es efectiva para los hidrocarburos poliaromáticos (PAH's) con 5 y 6 anillos. • Puede requerir una capa impermeable para evitar que los lixiviados contaminen el subsuelo y agua subterránea.

4.2 Factibilidad de la Biopila

La USEPA determinó que la tecnología de biopilas puede aplicarse para remediar suelos contaminados con hidrocarburos, bajo las siguientes condiciones:

- Cuando el suelo se encuentra contaminado principalmente con hidrocarburos del petróleo.
- La concentración de los compuestos clorados y recalcitrantes es nula o mínima.
- La concentración de metales pesados es menor de 2,500 mg/kg.
- El volumen de suelo a tratar es mayor de 200 m³

Estas condiciones aseguran el éxito de la biopila como tecnología de saneamiento.

Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad del proceso son:

- Los costos en la excavación del suelo contaminado
- Los costos de las pruebas de tratabilidad, ya que éstas determinan la biodegradabilidad de los contaminantes, la apropiada oxigenación y los nutrientes requeridos.
- La efectividad del proceso es cuestionable para compuestos halogenados y para productos explosivos.

Las biopilas operan efectivamente en climas cálidos, aunque también pueden operar en climas fríos inyectando aire caliente al sistema de aeración.

La factibilidad para utilizar las biopilas como tecnología de saneamiento puede dividirse en tres pasos:

- **Paso 1:** evaluar la efectividad de la biopila; en este paso es necesario identificar el tipo de suelo y los factores climatológicos, que contribuyen a la efectividad de la biopila.
- **Paso 2:** evaluación del diseño de la biopila; se evalúa si en el diseño se consideraron todos los parámetros y si el estudio de costo-beneficio es adecuado.
- **Paso 3:** evaluación de los planes de operación y monitoreo; es necesario determinar los períodos de monitoreo y evaluar si son suficientes.

La efectividad de la biopila depende de parámetros que se agrupan en: características del suelo, características de los contaminantes y las condiciones climatológicas (tabla 4.2).

Tabla 4.2 Parámetros usados para evaluar la efectividad de la biopila. (EPA 1994)

Características del suelo	Características del contaminante	Condiciones Climatológicas.
Densidad de la población microbiana	Volatilidad	Temperatura ambiente
pH del suelo.	Estructura química	Precipitaciones
Contenido de humedad	Concentración y toxicidad	Viento.
Temperatura del suelo		
Concentración de nutrientes		
Textura del suelo.		

También es posible visualizar la factibilidad de la biopila, en forma de diagrama de flujo (figura 4.2).

4.3 Factores que afectan la tecnología de biopilas

Textura del suelo

La textura afecta la permeabilidad, el contenido de humedad y la densidad del suelo. Para asegurar la oxigenación, la distribución de nutrientes y el contenido de humedad óptimo, debe considerarse la textura del suelo (EPA, 1994) Por ejemplo los suelos arcillosos son difíciles de airear y por lo tanto se tienen bajas concentraciones de oxígeno y una mala distribución de los nutrientes. Para mejorar la textura de éstos suelos, se pueden agregar agentes texturizantes como aserrín, pulpa de coco, etc.

Volatilidad

La volatilidad de los contaminantes es importante ya que éstos tienden a evaporarse de la biopila durante el proceso de aireación antes que empiecen a degradarse por acción de las bacterias. Los vapores se escapan a la atmósfera a menos que cuenten con un sistema que los capture y trate antes de ser liberados a la atmósfera (EPA, 1994). La evaporación de los contaminantes

volátiles puede reducirse minimizando la aireación, pero esto provoca una disminución en la biodegradación ya que se reduce el suministro de oxígeno.

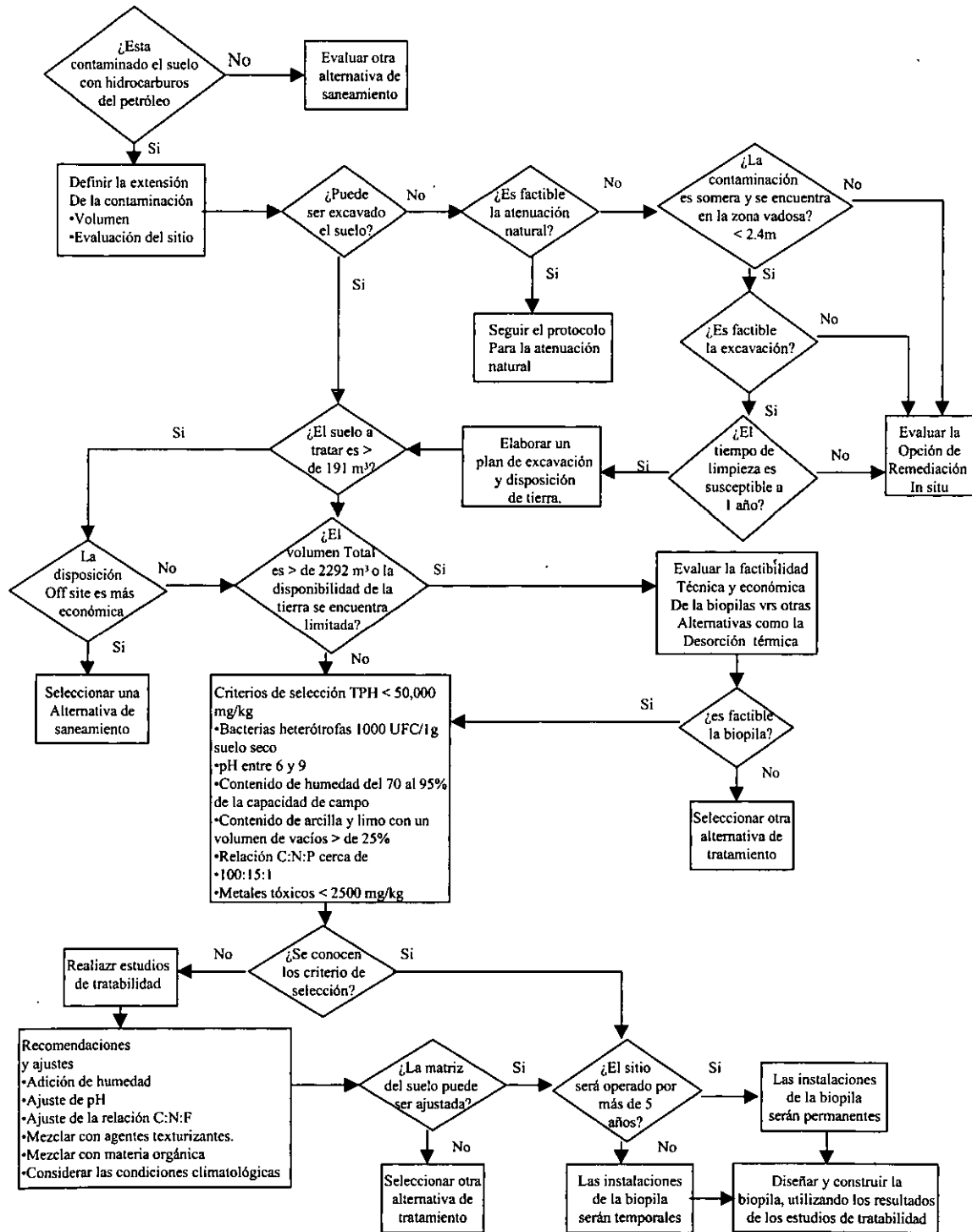



Figura 4.2 factibilidad de la biopila (Fahnestock and Wicramanayake, 1998)

Estructura química

La estructura química de los contaminantes presentes en el suelo es importante porque afecta la biodegradación de los mismos, es decir, los compuestos con estructuras moleculares complejas son más difíciles y menos rápidos de degradar; por el contrario, los alifáticos y monoaromáticos son más fáciles de degradar (EPA, 1994). La evaluación de la estructura química de los contaminantes permite estimar el tiempo de saneamiento así como elaborar los planes de operación y mantenimiento. En la tabla 4.3 se relaciona la estructura química con la biodegradación.

Tabla 4.3 Estructura química y biodegradabilidad (EPA, 1994)

Biodegradabilidad	Constituyentes	Productos en los cuales los constituyentes son típicamente encontrados
Más degradables	n-butano, l-pentano	• Gasolina
	n-octano	
	nonano	• Diesel
	Metil butano	• Gasolina
	Demietil pentano	
	Metil octano	
	Benceno	• Gasolina
	Tolueno	
	Etil benceno	
	xileno	
	Propibenceno	• Diesel, keroseno
	Decanos	• Diesel
	Dodecanos	• Diesel
	Tridecanos	• Combustibles
	Tetradecanos	• Lubricantes
	Naftalenos	• Diesel
Fluorantrenos	• Keroseno	
Menos degradables	Pirenos	• Combustibles
	Acenantrenos	• Lubricantes

Concentración y toxicidad

La presencia de altas concentraciones de HTP y de metales pesados en el suelo pueden ser tóxicos o inhibir la actividad de las bacterias degradadoras. (EPA, 1994). A concentraciones muy bajas de HTP la actividad microbiana disminuye.

En general las concentraciones de HTP no deben ser mayores de 50 000 ppm y los metales pesados < 2 500 ppm. En la tabla 4.4 se relaciona la concentración de los contaminantes con la efectividad de la biopila.

Concentración de los contaminantes	Efectividad de la biopila
HTP's < 50 000 ppm y metales pesado \leq 2 500 ppm	Es efectiva
HTP's > 50 000 ppm y metales pesados > 2 500 ppm	No es efectiva, existen condiciones tóxicas o inhibidoras, es necesario mezclar el suelo con agentes texturizantes o con suelos menos contaminados para disminuir las concentraciones

En resumen, las concentraciones máximas deberán considerar los niveles de limpieza a los que se desea llegar, la experiencia demuestra que los niveles a que se pueden alcanzar con las biopilas es hasta el 95%, ya que el 5% restante pueden ser compuestos recalcitrantes o no biodegradables. En la tabla 4.5 se relacionan los requerimientos de limpieza con la efectividad de la biopila.

Requerimientos de limpieza	Efectividad de la biopila
Concentración de HTP's > 0.1 ppm y reducción < 95%	Es efectiva
Concentración de HTP's \leq 0.1 ppm o reducción de HTP \geq 95%	No efectiva, se requieren realizar estudios de tratabilidad para demostrar que la reducción de los contaminantes.

Temperatura ambiente

La temperatura ambiente es importante, ya la EPA ha demostrado, que está que afecta la temperatura del suelo, impactando la actividad bacteriana y por lo tanto la biodegradación.

Precipitaciones

Algunos diseños para las biopilas no incluyen la cubierta, dejando expuesta la biopila a los factores climatológicos como las precipitaciones, nieve, viento y las temperaturas ambientales. Las precipitaciones podrían aumentar el contenido de humedad del suelo y causar su erosión. Si la precipitación anual es mayor de 762 mm, es necesario cubrir la pila con una cubierta de plástico y contar con un sistema de recolección de lixiviados (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Viento

La erosión del suelo de la biopila ocurre durante los períodos de viento, esto puede controlarse cubriendo la biopila o agregando agua.

4.4. Elementos que integran el sistema de biopilas

De acuerdo con Fahnestock and Wicramanayake, los principales elementos que integran el sistema de biopilas son los siguientes:

- Base
- Sistema de aireación
- Sistema de drenaje
- Sistema de irrigación
- Sistema para la adición de nutrientes

4.4.1 Base

La base de la biopila puede ser de arcillas compactadas o de concreto, dependiendo si las instalaciones se consideran temporales o permanentes (Guidelines, 2000). Es importante mencionar que la base debe contar con una

capa impermeable a fin de evitar la migración de los contaminantes; esta capa puede ser natural o artificial, para el primer caso pueden utilizarse arcillas y para el segundo caso una geomembrana de polietileno.

De acuerdo con Jorgensen, la base de la biopila tiene tres funciones importantes:

- Proporcionar un soporte estable a la biopila.
- Sirve como barrera para evitar la migración de los contaminantes hacia el agua subterránea.
- Proporciona una pendiente del 2% para evitar el encharcamiento de los lixiviados en la base de la biopila.

4.4.2 Aireación

La biopila debe airearse adecuadamente para mantener una biodegradación óptima de los contaminantes. De todos los factores metabólicos, el oxígeno es el más importante, por lo que una aireación eficiente es esencial para el éxito de la biopila. La aireación puede ser tanto pasiva como activa (Brown *et al*, 1990; Kamnikar, 1992).

El sistema de aireación pasivo es el más simple, para ello se utilizan tubos perforados, los cuales son colocados a diferentes alturas a lo largo de toda la biopila. Éstos tubos deben ser lo suficientemente largos de tal forma que salgan más allá de la biopila y permitan una transferencia de aire. El método pasivo reduce el capital y los costos de operación, ya que no requiere de bombas o compresores, también reduce de manera potencial la volatilización de la fracción volátil de los contaminantes (Guidelines, 2000)

A pesar del bajo costo que implica el sistema de aireación pasiva, se prefiere la aireación activa porque proporciona un flujo completo y controlado de aire, lo que incrementa la biodegradación (Jorgensen, 2000).

Para el sistema de aireación activa se utilizan dos modalidades:

- Inyección de aire.
- Extracción de aire.

En ambas modalidades se utilizan tubos perforados conectados a un soplador o compresor que inyecta aire al interior de la pila o lo extrae a través de ella (Figura 4.3). El flujo de aire evita las condiciones anaerobias en el suelo y la volatilización de la fracción ligera de los hidrocarburos (EPP, 1994).

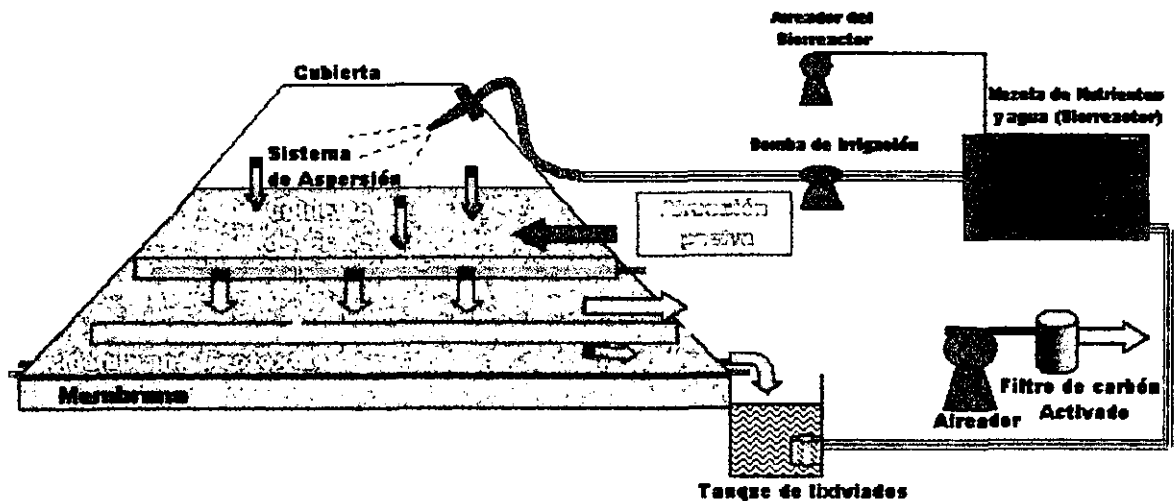


Figura 4.3 Sistema de aireación

Cuando se utiliza la aireación activa por extracción, se recomienda tratar los gases antes de liberarlos a la atmósfera, por lo anterior el sistema de inyección es preferido, porque el tratamiento de los vapores liberados puede ser no necesario.

4.4.3 Sistema de drenaje

El sistema de drenaje consta de una berma o estructura instalada alrededor de la pila que sirve como canal para coleccionar los lixiviados generados y de tubos colectores, los cuales recolectan los lixiviados en el interior de la pila (figura 4.4).

Cuando las pilas son pequeñas, el sistema de drenaje puede estar incorporado al sistema de inyección de agua o irrigación, para su recirculación.

4.4.4 Contenido de humedad

La humedad del suelo debe encontrarse entre 40 y 85% de su capacidad de campo. Debe añadirse periódicamente agua al suelo debido a que éste se seca como resultado de la evaporación, la cual se incrementa durante la aireación de la biopila. En la tabla 4.6 se relaciona la humedad con la efectividad de la misma (Fahnestock and Wicramanayake, 1998)

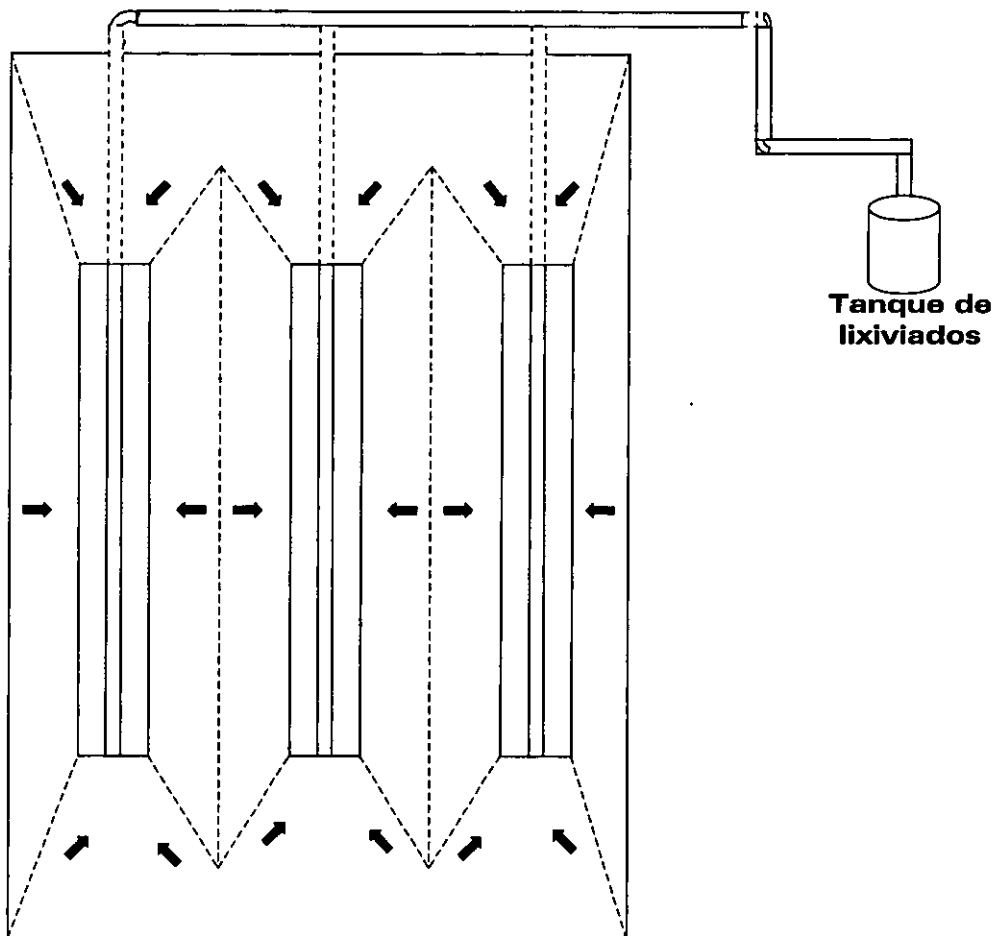


Figura 4.4 Sistema de drenaje

Tabla 4.6 Contenido de humedad y efectividad de la biopila (EPA, 1994)	
Humedad del suelo	Efectividad de la biopila
$40\% \leq \text{capacidad de campo} \leq 85\%$	Es efectiva
Capacidad de campo $< 40\%$	Es necesario añadir agua
Capacidad de campo $> 85\%$	El diseño de la biopila debe considerar el sistema de drenado.

De acuerdo con Fahnestock and Wicramanayake, el agua debe estar disponible en la biopila, pero no ser excesiva debido a que los microorganismos requieren de un medio acuoso para transportar los nutrientes y llevar a cabo su metabolismo. Sin embargo una humedad excesiva no es deseable porque:

- El agua al saturar el suelo ocupa los espacios vacíos disminuyendo la eficiencia de la aireación.
- El exceso de humedad incrementa la lixiviación de los contaminantes y de los nutrientes

Tanto el contenido de humedad como la retención de la misma son características que deben tomarse en cuenta para determinar el agua requerida. Si el contenido de agua es muy alto será necesario mezclar el suelo con agentes texturizantes; estos agentes pueden aumentar o disminuir la retención de humedad en el suelo.

El contenido de humedad puede variar durante el proceso de saneamiento, ya que la biodegradación convierte los hidrocarburos en CO_2 y H_2O . Aproximadamente 0.68 kg de H_2O se obtienen al degradar 0.45 kg de HTP. Bajo condiciones normales y con un sistema de biopilas cubierto, se pierde aproximadamente de 1 a 2% de humedad durante un período de operación de 3 a 4 meses. La U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency) recomienda que el contenido de humedad debe encontrarse entre el 40 y 85% de la capacidad de campo, aunque se ha comprobado que el contenido de humedad es óptimo entre el 70 y 90% de la capacidad de campo (Fahnestock and Wicramanayake, 1998)

4.4.5 Sistema de adición de nutrientes.

Los microorganismos requieren de nutrientes inorgánicos como el nitrógeno y el fósforo para su crecimiento, estos nutrientes puede estar disponibles en cantidades suficientes en algunos suelos contaminados, pero en la mayoría es necesario añadirlos, aunque una cantidad excesiva de ciertos nutrientes en forma de fosfato o sulfato puede reprimir el metabolismo microbiano.

La relación óptima de carbono:nitrógeno:fósforo se encuentran entre 100:15:1 y 100:10:1, dependiendo del tipo de contaminante y de los microorganismos

involucrados en el proceso de biodegradación (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Los contaminantes y los compuestos orgánicos presentes en el suelo son utilizados por los microorganismos como fuente de carbono y energía, aunque también requieren de otros nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo o potasio y pueden ser insuficientes con la cantidad de carbono.

Los nutrientes pueden disolverse en agua y rociarse al suelo antes de la construcción de la pila o mezclarse con el suelo durante la construcción de la misma (Von Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Durante la operación de la pila puede ser necesario añadir nutrientes a la misma y combinarla con la adición del contenido de humedad; los nutrientes se diluyen y se aplican utilizando un sistema de aspersion o irrigación. El nitrógeno penetra hasta el fondo de la pila, sin embargo, el fósforo no penetrará más allá de 0.3 m debido a las reacciones químicas que tiene con el suelo (EPA, 1994). Para evitar esto la biopila se construye por capas no mayores de 0.30 m y a cada capa se le agregan los nutrientes.

4.5 Actividad microbiana

Para conocer la densidad de las bacterias nativas y degradadoras del sitio contaminado, se realiza un conteo de colonias para determinar las UFC/g de suelo presentes. La densidad microbiana para que la tecnología de biopilas sea eficiente debe ser de 10^4 y 10^7 UFC/g, un conteo menor indica la presencia de algún inhibidor (EPA, 1994).

En la tabla 4.7 se relaciona la efectividad de la biopila con las UFC presentes:

Tabla 4.7 Bacterias heterótrofas y efectividad de la biopila (EPA, 1994).	
Bacterias heterotróficas	Efectividad de la biopila
> 1 000 UFC/g	Es efectiva
< 1 000 UFC/g	Requiere de una evaluación para determinar se existen inhibidores.

Para un crecimiento adecuado de las bacterias el pH del suelo debe encontrarse entre 6 y 8, siendo 7 el óptimo. En la tabla 4.8 se relaciona el pH del suelo con la efectividad de la biopila.

PH del suelo	Efectividad de la biopila
$6 \leq \text{pH} \leq 8$	Es efectiva
$6 > \text{pH} > 8$	Requiere ajuste del pH.

Es importante tener en cuenta que durante la operación de la biopila debe mantenerse el pH dentro del intervalo, en caso contrario, será necesario ajustarlo. Si el pH del suelo es muy ácido se puede agregar cal, por el contrario, si es muy básico se puede agregar sulfato de amonio, sulfato de aluminio o sulfuro.

El crecimiento de las bacterias también está en función de la temperatura. La actividad microbiana de las bacterias que degradan hidrocarburos es óptima entre 10 y 45°C. En la tabla 4.9 se relaciona la temperatura del suelo con la efectividad de la biopila.

Temperatura del suelo	Efectividad de la biopila
$10^{\circ}\text{C} \leq \text{temperatura del suelo} \leq 45^{\circ}\text{C}$	Es efectiva
$10^{\circ}\text{C} > \text{temperatura del suelo} > 45^{\circ}\text{C}$	No es efectiva, la actividad microbiana disminuye durante la época de temperaturas extremas.

Capítulo 5

Saneamiento en la TAD de Acapulco, Gro, utilizando la tecnología de biopilas

Como parte del plan de acción de PEMEX Refinación, se realizó una auditoría ambiental en la Terminal de Almacenamiento y Distribución (TAD) de Acapulco, Gro.

Una de las principales deficiencias en la Auditoría Ambiental se refiere a la presencia de hidrocarburos al Este de la instalación debido a un derrame de turbosina que ocurrió en el pasado y a operaciones inadecuadas. Así mismo establece la presencia de hidrocarburos cerca de la fosa de aceites al Noroeste de la TAD.

Como resultado de la auditoría se recomendó realizar un estudio para evaluar la contaminación del subsuelo y agua subterránea en el área de la instalación, el estudio lo realizó el Grupo de Saneamiento de Suelos y Acuíferos del Instituto de Ingeniería; UNAM en 1999. Debido a las características de alta permeabilidad del subsuelo en la zona constituida principalmente por arena de media a gruesa (proveniente del desgaste del granito) y a que el nivel freático es muy somero (de 4 a 6 m de profundidad), se considera esta zona como vulnerable, por la alta probabilidad de contaminar el agua subterránea.

5.1 Características del sitio

La TAD se ubica en el municipio de Acapulco a 19°17'30" de latitud norte y 99°37' de longitud oeste. (INEGI, 1994)

Debido a sus condiciones de temperatura se considera un clima cálido, con una temperatura media anual por arriba de 22°C y la temperatura media del mes más frío es alrededor de 18°C. La precipitación pluvial promedio de los

últimos 20 años es de 1,403 mm. La humedad relativa varía entre el 76 y 80 por ciento (INEGI, 1994).

Características Geohidrológicas

La zona pertenece a la región hidrológica RH-19 que forma parte de las cuencas Río Atoyác. El coeficiente de escurrimiento es de 10 por ciento.

El perfil geohidrológico está compuesto por material granular como arena de grano grueso, medianamente consolidado y alta permeabilidad. El material consolidado está formado por rocas ígneas sedimentarias y metamórficas; las rocas sedimentarias tales como lutitas, caliza y areniscas se clasifican como de baja permeabilidad por el contenido de material arcilloso y escaso fracturamiento. (CNA, 1998). Las rocas metamórficas por su génesis y fracturamiento poco profundo se consideran como mal conductoras y almacenadoras de agua.

La corriente de agua subterránea presenta una dirección hacia el Océano Pacífico. El nivel freático en la zona de la terminal se encuentra entre los 4 y 6 metros de profundidad. Información determinada por personal del Instituto de Ingeniería.

Zonas contaminadas

Las sitios contaminados de hidrocarburos identificados fueron:

Zona noroeste:

Esta zona estaba libre de contaminación superficial, sin embargo al remover la capa superficial del suelo, se observó muy contaminada, el olor que se desprendía era de gasolina. (puntos de muestreo 1,2, 3 y 4).

Zona norte:

En la zona de recarga (llenaderas) se observaron pequeñas fugas en las mangueras. No existía evidencia de alta contaminación, sin embargo al perforar para obtener la muestra de suelo, apareció un fuerte olor a hidrocarburos. (puntos de muestreo 14, 15, 16 y 17).

Zona noreste:

En esta zona se ubica una fosa de decantación con agua en su interior, al costado oriente se encuentra un almacenamiento de chatarra y al costado poniente se encuentra un almacén de llantas usadas (puntos de muestreo 9, 10 y 11).

Zona oriente:

Esta zona corresponde al área de tanques de almacenamiento. En general es una zona sin manchas superficiales.

Zona sur y suroeste:

Se observan algunas manchas superficiales en la zona, al norte del estacionamiento de pipas (puntos de muestreo 18, 19, 20 y 21)

El muestreo del suelo se realizó extrayendo núcleos de suelo en 20 puntos distribuidos dentro de la TAD Acapulco, las muestras se tomaron entre la superficie y 3.5 m de profundidad. En la figura 5.2 se presenta la ubicación de los puntos de muestreo seleccionados.

Para la toma de muestras se utilizó un equipo portátil que consta de un tripié, un tubo pistón o martinete, un tubo espiga o golpeador y un tubo muestreador con zapata (figura 5.1).

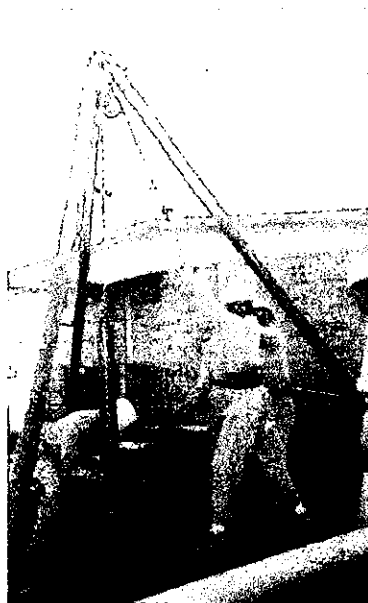


Figura 5.1 Muestreador

En cada punto de muestreo se midió la explosividad con un equipo COSMOS XP-311 ALPHA A, la gasometría para medir hidrocarburos volátiles se realizó con un equipo petrosense PHA-100 Plus, con un sensor químico de fibra óptica. Para evitar pérdidas de vapores entre la extracción de la muestra y la introducción del sensor, la entrada de la perforación se selló inmediatamente después de extraer la muestra.

Para el caso del agua subterránea la TAD de Acapulco cuenta con seis pozos de monitoreo de 20 m de profundidad, en los cuales se midió la explosividad y se tomó una muestra de agua en cada uno , con un bailer de material acrílico.

La profundidad del suelo contaminado se consideró como una fracción del total de la columna del suelo hasta el nivel freático, ya que en la etapa de muestreo se tomaron muestras a diferentes profundidades hasta 3.50 m, encontrándose diferentes grados de contaminación a lo largo de la zona no saturada.

El objeto de delimitar las zonas contaminadas por hidrocarburos y metales en la TAD Acapulco, fue para calcular las áreas y volúmenes contaminados por cada parámetro utilizando el modelo RocWorks 3D.

El RocWorks 3D es un modelo que delimita y evalúa las zonas contaminadas de un sitio, requiere de datos de estatigrafía, pruebas de bombeo, coordenadas de los puntos de interés y concentraciones de los parámetros, etc.

Caracterización del sitio

Tabla 5.1 Parámetros geohidrológicos, climatológicos y de extensión de la contaminación			
	Parámetro	Valor	Fuente
	A (m ²) Área de la zona fuente	30306.82	Plano PEMEX
	W (m) Longitud de la zona fuente paralela a la dirección del viento (E-O)	269.07	Plano PEMEX
	Wgw (m) Longitud de la zona fuente paralela a la dirección de flujo del agua subterránea (NE-SO)	161.12	Plano PEMEX
	Uair (m/s) Velocidad del viento en la zona de mezclado	3.84	SMN (1961-1988)
	h _{air} (m) Altura de la zona de mezclado de aire (altura promedio de adulto)	1.7	
	Pa (g/cm ² /s) Tasa de emisión de partículas (default)	6.9E-14	GSI (1988b)
S	h _{cap} (m) Espesor de la zona capilar (default)	0.05	GSI (1998B)
U	h _v (m) Espesor de la zona no saturada (prof unidad hasta el nivel freático)	2.86	Información medida por personal del II
E	ρ _s (g/cm ³) Densidad aparente	2.64	Determinado en el laboratorio por el Instituto de Ingeniería
L	F _{oc} Fracción de carbono orgánico	0.0084	Determinado en el laboratory por el Instituto de Ingeniería
O	η _T Porosidad total	0.391	Determinado en el laboratorio por el Instituto de Ingeniería
	K _{vs} (x10 ⁻³ cm/s) Conductividad hidráulica vertical	0.1	Información determinada en estudios geotécnicos
	k _v (m ²) Permeabilidad vapor (default, típica de una arena limosa)	1.E-12	GSI (1998b)
	L _{gw} (m) Profundidad a la que se encuentra el agua subterránea (nivel freático)	2.86	Determinado en el laboratorio por el Instituto de Ingeniería
	L _s (m) Profundidad superior del suelo afectado (0 m)	0	
	L _{base} (m) Profundidad inferior del suelo afectado (profundidad del nivel freático)	2.86	Información medida por personal del Instituto de Ingeniería
	PH potencial de hidrógeno del suelo	6.9	Determinado en campo por el II
	θ _{w1} Contenido volumétrico de agua en la zona capilar	0.2046	Determinado en el laboratorio por el Instituto de Ingeniería
	θ _{w2} Contenido volumétrico de agua en la zona no saturada (default)	0.0.08	Determinado en el laboratorio por el Instituto de Ingeniería

	Parámetro	Valor	Fuente
A G U A S U B T E R R A N E A	δgw (m) Zona de mezclado del agua subterránea (fluctuación del nivel freático)	5	Información proporcionada por personal de la TAD Acapulco
	I_r (cm/años) Tasa de infiltración (15% de precipitación anual)	42.45	GSI (1998b), INEGI (1994)
	I , Gradiente hidráulico	0.001	Información calculada por el Instituto de Ingeniería
	S_w (m) Ancho de la zona fuente de agua subterránea	222.66	Plano PEMEX
	S_d (m) Profundidad de la zona fuente de agua subterránea (fluctuación del nivel freático)	5	Información obtenida en la Auditoría Ambiental
	n_{eff} Porosidad efectiva	0.391	Considerada igual a la porosidad total
	f_{oc-sat} , Fracción de carbono orgánico de la zona saturada	0.001	GSI (1994)
	pH_{sat} , pH del agua subterránea	6.36	Determinado en campo por el Instituto de Ingeniería
Ambiente	Precipitación media anual (CM/año)	141.5	INEGI (1994)
	Dirección de viento	Este-Oeste	SMN (1961-1988)

5.2 Análisis y técnicas de muestreo

Como ya se mencionó la TAD de Acapulco cuenta con 6 pozos de monitoreo de 20 m de profundidad. En cada pozo se obtuvo una muestra de agua y a cada muestra se le determinó: pH, HTP, plomo, hierro, cromo y zinc.

El muestreo del suelo se realizó en 20 puntos ubicados dentro de la TAD y a cada muestra de suelo se le realizaron los siguientes análisis:

- Plomo total
- Hierro
- Cromo
- Zinc
- HTP (hidrocarburos totales del petróleo)
- BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno)
- Perfil de hidrocarburos que incluye los siguientes parámetros:
 - Diesel
 - Gasolina
 - Metilterbutileter (MTBE)
 - Metilteramileter (MTAE).

La técnica utilizada para la determinación de HTP fue la 418.1 por espectrometría con infrarrojo, mientras que para los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno) que son compuestos monoaromáticos volátiles, los metilterbutileter (MTBE) y los metilteramileter (MTAE) estos dos últimos solubles al agua, se analizaron con la técnica EPA 8240.

5.3 Niveles de contaminación

Los niveles de contaminación que se encontraron en la TAD, se presentan en las siguientes tablas. La primera contiene los resultados del muestreo en suelo, la segunda los del agua, la tercera la explosividad y la última los niveles permisibles para cada uno.

En tabla 5.2 se presentan los resultados obtenidos en los 20 puntos de muestreo del suelo.

Tabla 5.2 resultados del muestreo de suelos

RESULTADOS DEL MUESTREO DEL SUELO							
punto	hidrocarburos totales del petróleo, HTP (mg/kg)	Perfil de hidrocarburos (mg/Kg)	plomo (mg/kg)	Hierro (mg/kg)	Cromo (mg/kg)	Zinc (mg/kg)	Hidrocarburos aromáticos policíclicos HAP(mg/Kg)
1	59213	N.D.	10.45	6262	N.D.	26	N.R.
2	4207	Diesel 1020.00 <C5 0.083, >C5<C8 18.84 >C8<C10 5.53, >C10<C13 75.55	46.95	20930	N.d.	80.7	N.R.
3	N.D.	N.D.	9.4	6346	N.D.	25.8	N.D.
4	10003	Diesel 2443.00 <C5 N.D., >C5<C8 13.29 >C8<C10 10.47, >C10<C13 76.24					
5	29	N.D.	N.D.	6162	N.D.	21.4	N.D.
6	N.D.	N.D.	18	12430	N.D.	37.1	N.R.
6'	N.D.	N.D.	11	8084	N.D.	26.5	N.D.
7	N.D.	N.D.	9.3	7883	N.D.	25	N.R.
9	N.D.	N.D.	9.2	7484	N.D.	24	N.D.
10	104	N.D.	8.3	6504	N.D.	20	N.D.
11	N.D.	N.D.	10.8	10010	N.D.	33	N.D.
12	33	N.D.	25	13820	N.D.	32	N.R.
14	N.D.	N.D.	N.D.	4885	N.D.	18.5	N.D.
15	4394	Diesel 5272.00 <C5 0.026, >C5<C8 4.85 >C8<C10 8.88, >C10<C13 86.24					
16	988	Gasolina 43.80 <C5 0.036, >C5<C8 8.63 >C8<C10 42.94, >C10<C13 48.38	37.8	12680	N.D.	40	Naftaleno 0.99
17	N.D.	N.D.	15.6	8825	N.D.	29.7	N.D.
18	64	N.D.	14.5	13690	N.D.	36.5	N.D.
19	N.D.	N.D.	13.6	10620	N.D.	30.9	N.D.
20	N.D.	N.D.	N.D.	6393	N.D.	21.7	N.D.
21	48	N.D.	N.D.	5277	N.D.	21.3	N.D.

N.D. = No detectado

N.R. = No realizado

Las celdas sombreadas indican que se ha excedido la concentración límite. Tabla 5.6

En la tabla 5.3 se presentan los resultados de los 6 pozos de muestreo del agua.

Tabla 5.3 resultados del muestreo del agua

RESULTADOS DEL MUESTREO DEL AGUA							
Punto	pH	Nivel del agua (m)	Hidrocarburos totales del petróleo, HTP (mg/l)	Plomo (mg/L)	Hierro (mg/L)	Cromo (mg/L)	Zinc (mg/L)
1	6.4	2.5	0.64	N.D.	6.37	N.D.	0.06
2	6.6	3.1	0.84	N.D.	2.29	N.D.	0.044
3	6.4	sin agua	8.35	N.D.	8.4	N.D.	0.112
4	6.4	3.3	0.3	N.D.	0.39	N.D.	0.113
5	5.9	4.3	21.2	N.D.	0.19	N.D.	0.035
6	6.5	3.1	0.49	N.D.	1.54	N.D.	0.034

N.D. = No detectado

N.R. = No realizado

Las celdas sombreadas indican que se ha excedido la concentración límite. Tabla 5.6

En cada pozo de monitoreo se midió la explosividad y los compuestos volátiles presentes, utilizando un equipo Petrsense PHA-100 Plus, con sensor de fibra óptica. Los resultados de vapores se presentan en la tabla 5.4

Tabla 5.4 Resultados del muestreo de vapores en agua

Vapores (Muestreo en Agua)		
Pozo	Explosividad	HTP
	%	ppm
1	0	N.D.
2	0	N.D.
3	0	2 983
4	0	N.D.
5	0	3 428
6	10	104

Las concentraciones de los vapores presentes en el suelo se presentan en la tabla 5.5

Tabla 5.5 Muestreo de los vapores en suelos

Muestreo en suelo		
Vapores		
Punto	Explosividad (%)	Hidrocarburos totales del petróleo HTP (ppm)
1	100	17008
2	5	12577
3	100	N.D.
4	100	19921
5	5	15988

Muestreo en suelo		
Vapores		
Punto	Explosividad (%)	Hidrocarburos totales del petróleo HTP (ppm)
6	70	240
6		
7	0	1340
8	0	ND
9	0	ND
10	0	ND
11	0	ND
12	0	ND
13	30	ND
14	0	ND
15	NR	ND
16	0	NR
17	0	ND
18	0	ND
19	0	ND
20	0	ND
21	0	ND

Los niveles permisibles de los compuestos orgánicos e inorgánicos analizados en las muestras de suelo y agua se presentan en la tabla 5.6

Tabla 5.6 niveles permisibles en suelo y agua

Niveles Permisibles en Suelo y Agua			
Suelo		Agua	
Niveles Permisibles	Referencia	Niveles Permisibles	Referencia
Plomo 400 mg/Kg	Buoncore (1996), USEPA (1994)	Plomo 0.025 mg/L	NOM-127-SSA1-1994
Hierro 25000 mg/Kg	Buoncore (1996)	Hierro 0.300 mg/L	NOM-127-SSA1-1994
Cromo 5.0 mg/Kg	Buoncore (1996)	Cromo total 0.050 mg/L	NOM-127-SSA1-1994
Zinc 2500 mg/Kg	Buoncore (1996)	Zinc 5.000 mg/L	NOM-127-SSA1-1994
Hidrocarburos totales del petróleo HTP 2000 mg/Kg	PFFA (1998)	Hidrocarburos totales del petróleo HTP 100mg/L	Buoncore (1996)
Etilbenceno 500 mg/Kg	Buoncore (1996), Edo. De Massachusetts		
Metilterbutileter 100 mg/Kg	Buoncore (1996), Edo. De Massachusetts		
Naftaleno 100 mg/Kg	Buoncore (1996), Edo. De Massachusetts		

5.4 Áreas y volúmenes contaminados

Con los datos de HTP , hierro, plomo y zinc obtenidos de las muestras de suelo, se alimentó el programa RockWorks para obtener las curvas de isoconcentraciones y con estas curvas calcular las áreas y los volúmenes de suelo con concentraciones por arriba del valor permisible 2 000 mg/kg (PFFA, 1998), a fin de conocer el volumen del suelo afectado. Es importante mencionar que se consideró un espesor de 2.48 m para calcular el volumen

contaminado. En la tabla 5.7 se presentan las áreas y volúmenes de suelo que sobrepasan el valor permisible.

Tabla 5.7 Áreas y volúmenes de HTP que sobrepasan 2 000 ppm

Áreas y Volúmenes de HTP que sobrepasan 2 000 mg/kg		
Concentración	Área	Volumen (h=2.48m) m ³
2 001-10 000	1 142	2 832
10 001-20 000	1 181	2 929
20 001-30 000	568	1 408
30 001-40 000	280	693
40 001-50 000	106	263
> 50 000	12	30
Total	3 289	8 155

En la figura 5.4 se observan claramente las isoconcentraciones que indican los niveles de HTP's, demostrando que el área de mayor contaminación es la zona noroeste con niveles de 50 000 mg/kg a 10 000 mg/kg de HTP's. (puntos de muestreo 1,2,3 y 4) a pesar de ser una zona que no presenta contaminación superficial (Figura 5.3), y que actualmente se encuentra como área verde en la parte trasera de los laboratorios.



Figura 5.3 Área de mayor contaminación

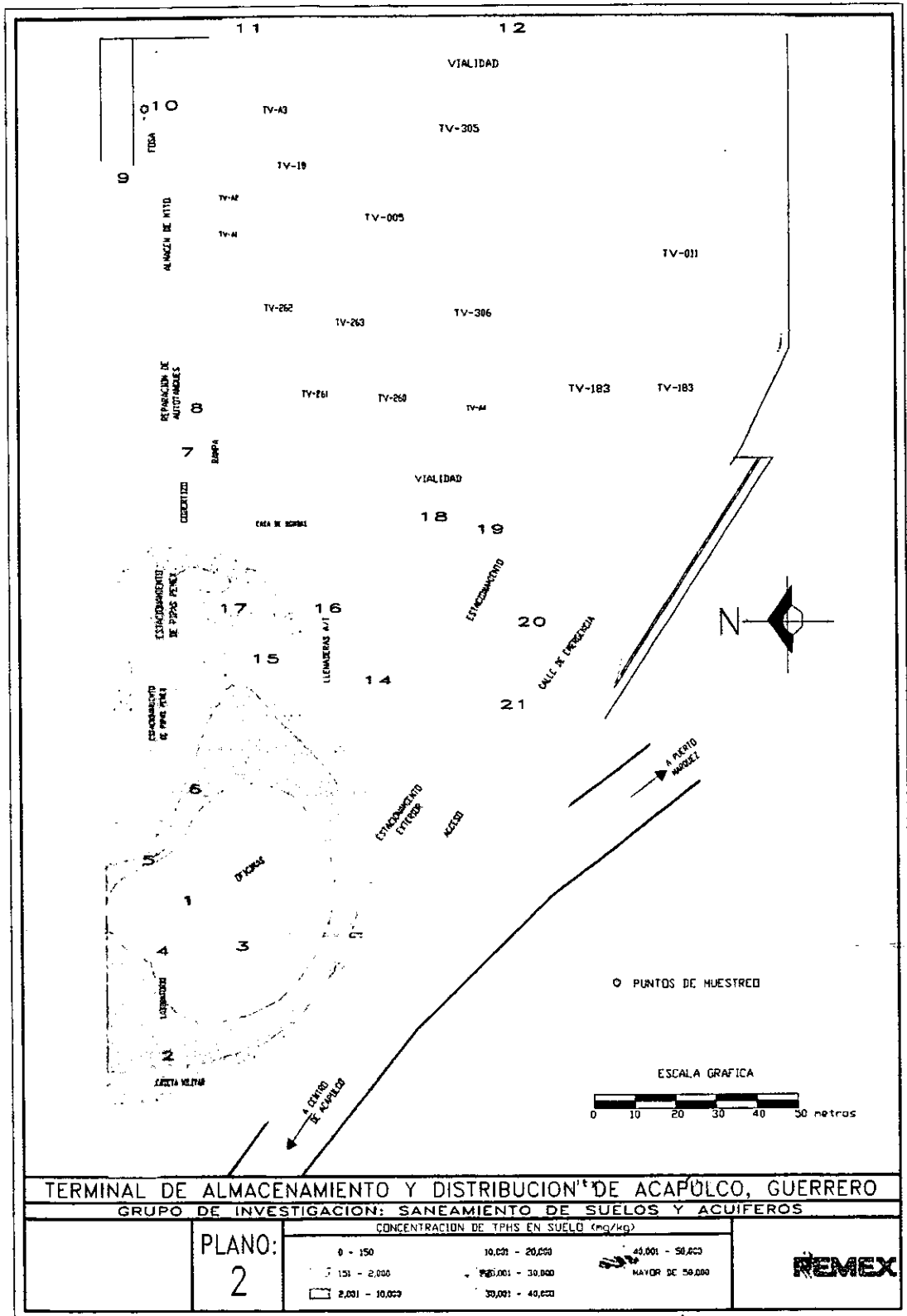


Figura 5.4 Isoconcentraciones de TPH

5.5 Análisis de resultados y niveles de limpieza

Los resultados de los análisis de suelo (tabla 5.2), demuestran que el suelo de la TAD no está contaminado con BTEX o aditivos de la gasolina, pero se detectó naftaleno en el punto de muestreo 16. Por su parte en el agua subterránea no se detectaron BTEX, aditivos de gasolina ni HPA (hidrocarburos poliaromáticos), pero sí se detectó hierro y zinc. Y en ambos medios se detectaron HTP (hidrocarburos totales del petróleo).

De acuerdo con los resultados de los análisis del suelo se identificaron dos zonas con las mayores concentraciones de HTP, la de recarga (llenaderas) y la zona noroeste de la TAD. El punto de muestreo 1 presenta la mayor concentración de HTP (59,213 mg/kg) y se ubica sobre el área verde, al norte de las oficinas. Los puntos 2 y 4, junto al tratamiento de efluentes y cercanos al punto 1, también presentan altas concentraciones. En cuanto a metales en el suelo, los resultados no indican niveles que sobrepasen los límites permisibles.

Aun cuando el valor de HTP en la zona de recarga (llenaderas), punto 16, está dentro de los valores permisibles (2,000 mg/kg), este es el único punto en el que se encontró un compuesto aromático policíclico (Naftaleno, 0.99 mg/kg).

Con lo que respecta a los resultados de vapores en el suelo, el sitio con concentraciones más altas coincide con la zona noroeste, en los puntos 1, 2, 4 y 5. En el resto del TAD no se registraron valores altos de vapores de hidrocarburos en el suelo. Sin embargo, en los pozos de monitoreo 3 y 5 si se obtuvieron valores elevados de vapores de hidrocarburos (tabla 5.5).

En los muestreos de agua subterránea se obtuvieron valores altos de hidrocarburos disueltos en los pozos de monitoreo 3 y 5, lo que coincide con los resultados para vapores.

Los niveles de limpieza que se establecen para el suelo y agua subterránea, deberían cumplir con la normatividad mexicana en materia de contaminación de suelos y acuíferos pero como no existen en México, se deberán comparar los parámetros internacionales (como los de la U.S. EPA) con las concentraciones existentes del sitio.

Para el caso del agua subterránea, en México se tienen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-/89) que son un antecedente de la aplicación de hidrocarburos monoaromáticos y polinucleoaromáticos como parámetros indicadores. Así mismo existe la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, que establece los niveles permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano para diversos parámetros físicos y químico entre los que se encuentran el plomo y hierro.

En la tabla 5.8 se comparan las concentraciones promedio encontradas en el agua subterránea de la TAD Acapulco, con los parámetros de calidad, de acuerdo con la requerida para su uso o aprovechamiento (CE-CCA-001/89) y con las concentraciones máximas permisibles en agua potable (NOM-127-SSA1-94)

Tabla 5.8 Comparación de la concentraciones máximas de contaminantes en agua

Comparación de las concentraciones máximas de contaminantes encontrados en los pozos de con los criterios ecológicos de calidad del agua, la NOM-127-SSA1-1994 y los valores límites obtenidos la evaluación del riesgo a la salud.				
Compuesto	Concentración límite			Concentraciones máximas encontradas en los pozos de monitoreo de la TAD (mg/L)
	CCE-CCA-001/89 (mg/L)	NOM-127-SSA1-94 (mg/L)	Riesgo (mg/L)	
Hierro	0.3	0.3	NA	8.4
Naftaleno	EN	EN	31	ND
Plomo	0.05	0.025	NA	ND
Zinc	5	5	24	0.133

NE = No existe

NA = No aplica

ND = No detectado

Las celdas sombreadas indica que se ha excedido la concentración límite. Tabla 5.6

De acuerdo con esta tabla únicamente se tiene problema con la concentración de hierro.

Para el caso del suelo, en México existen los Criterios Internos de Restauración de Suelos (CIRS), establecidos por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 1998), y aunque no tienen la categoría de Norma Oficial Mexicana, son los únicos parámetros que existen para establecer los niveles de limpieza en un suelo contaminado. Es por ésto que se compararon las concentraciones promedio de los contaminantes en el suelo con los valores establecidos por los CIRS para un uso de suelo industrial y tipo de

contaminante de residuos aceitosos. También se buscaron parámetros internacionales que establecieran concentraciones máximas permisibles en el suelo. En la tabla 5.9 se comparan las concentraciones máximas encontradas en el suelo de la TAD Acapulco, con los CIRS y las concentraciones de comparación establecidas en la normatividad de la U.S.EPA.

Tabla 5.9 Comparación de las concentraciones máximas de contaminantes en suelos

Comparación de las concentraciones máximas de contaminantes encontradas en los suelos con los criterios Internos de Restauración de Suelos; Criterios Internacionales y los valores Límite obtenidos en la evaluación del riesgo a la salud.				
Compuesto	Concentración límite			Concentraciones máximas encontradas en los puntos de muestreo de la TAD acapulco (mg/kg)
	CIRS (mg/kg)	CINT (mg/kg)	Riesgo (mg/kg)	
Hierro	EN	25 000 (b)	NA	20 930
Naftaleno	EN	3 100 (a)	15 000	0.99
Plomo	EN	400 (a) ©	NA	46.95
Zinc	EN	20 000 (a)	5 300	80.7
HTP	2000	NE	NA	59 213

CIRS = Criterios Internos de Restauración de Suelos

CINT = criterios Internacionales

(a) criterios internacionales de la U.S.EPA para sitios Superfund (Buonicore, 1996)

(b) Concentraciones de fondo promedio para suelos de Estados Unidos de acuerdo con la ASTM (Buonicore © U.S. EPA (1994)

NE = No existe

NA = No aplica

ND = No detectado

Las celdas sombreadas indica que se ha excedido la concentración límite. Tabla 5.6

En la tabla se observa que únicamente se rebasa la concentración límite establecida para los HTP, de acuerdo con lo establecido en los CIRS (PFPA, 1998), por lo que será necesario aplicar tecnologías de saneamiento para reducir las concentraciones máximas detectadas de 59,213 mg/kg a 2,000 mg/kg para cumplir con los valores permisibles establecidos por los CIRS.

5.6 Volúmenes del suelo a sanear

Suelo

De acuerdo con la tabla 4.6, el volumen de suelo contaminado es de 8 155 m³ en la zona noroeste de la TAD, ésto se obtuvo considerando un espesor de 2.48 m. Es importante destacar que el 70 por ciento del volumen contaminado tiene una concentración de HTP < 20,000 mg/kg.

Dadas las condiciones geohidrológicas de la zona, el tipo de suelo contaminado, la alta permeabilidad, el bajo contenido de material arcilloso y los resultados del estudio de riesgo a la salud se considera que el suelo con concentraciones por debajo de 10,000 mg/kg se rehabilite por atenuación natural; y para el suelo con concentraciones por arriba de 10,000 mg/kg se considera la opción de aplicar una tecnología de saneamiento, con lo que se reduce el volumen de suelo a tratar a 5,323 m³. El volumen de suelo con concentraciones entre 2,000 y 10,000 mg/kg puede dejarse por atenuación natural, con un monitoreo periódico para conocer la tasa de reducción de las concentraciones con el tiempo.

Agua

Para el caso del agua en cinco de los seis pozos de monitoreo se rebasa el nivel máximo permisible propuesto para el agua potable (NOM-127-SSA1-94) para el hierro que es de 0.3 mg/L. Debido a que el contenido de hierro en el agua puede ser un problema regional, es necesario conocer los niveles de hierro en el agua subterránea, ya que es probable que estas concentraciones no se deban a una contaminación por la operación de la TAD.

5.7 Selección de la tecnología de saneamiento

El suelo posee un potencial de restauración natural. Este potencial es evidente cuando los contaminantes penetran e impregnan el suelo y se degradan o transforman en compuestos no peligrosos. Sin embargo, esta capacidad de autorrestauración es limitada y cuando se sobrepasa, es necesario aplicar una técnica de rehabilitación (Saval, 1995). La selección de la estrategia y la tecnología de rehabilitación dependerán de las condiciones del sitio, del tipo de contaminante y del control de las fuentes de contaminación. No existe una fórmula definitiva para la selección de la tecnología de rehabilitación adecuada.

Las tecnologías de tratamiento se dividen en: físicas, químicas, biológicas y térmicas. El objetivo de los tratamientos físicos es separar los materiales peligrosos de los menos peligrosos, sin alterar su composición química. Entre los procesos físicos se encuentran: la separación, purificación, filtración, centrifugación, flotación, destilación, evaporación, extracción por solventes, osmosis inversa, intercambio iónico, adsorción por carbón activado,

decantación e inmovilización por solidificación (Bannetten, 2000). Este tipo de técnicas son ocasionalmente utilizados como una opción de tratamiento final para cualquier material contaminado.

El tratamiento químico altera la composición química de los contaminantes, ciertos tipos de productos químicos o materiales contaminantes pueden separarse o hacerse menos peligrosos a través de procesos de tratamiento químico, de forma que los compuestos tóxicos se conviertan en compuestos menos tóxicos. (Madrigal, 1998). Los productos de las reacciones químicas presentan un menor grado de dificultad para ser removidos del suelo y son más fácil de tratarlos. entre los procesos químicos se encuentran: las paredes reactivas, precipitación química, uso de metales de valencia cero, rehabilitación electrocinética.

El tratamiento biológico, desde el punto de vista costo-beneficio es una alternativa viable para los contaminantes orgánicos, ya que los transforman en elementos no tóxicos como el agua, dióxido de carbono y otros productos inicuos mediante el uso de microorganismos; pero es muy sensible a los cambios en la composición y concentración orgánica de los contaminantes (Iturbe. *et. al* , 1998).

El tratamiento térmico, emplea calor para destruir o transformar los contaminantes. En este tratamiento se controlan la temperatura y el oxígeno disponible para transformar los materiales peligrosos en dióxido de carbono y otros productos de combustión.(USNAVY, 2000) Este tratamiento es aplicable a contaminantes que contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos.

La selección de la técnica involucra las características físicas y químicas del material contaminante, condiciones ambientales, equipos requeridos, regulaciones ambientales, aspectos de seguridad, salud pública y los tiempos y requerimientos económicos globales.

El primer paso para seleccionar adecuadamente la tecnología de saneamiento es examinar el costo efectivo así como si la excavación y/o transportación se justifica. En el siguiente diagrama se ilustra el procedimiento.

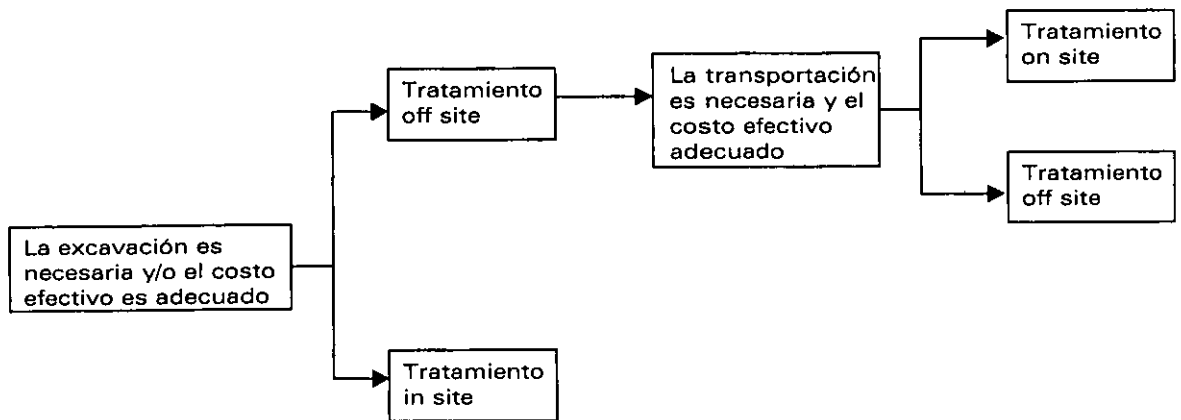


Figura 5.5 primer paso para la selección de la tecnología

Para el caso de la TAD de Acapulco, se propone un tratamiento off site porque la profundidad de la pluma de contaminación es menor de 2.5 y el costo efectivo resulta adecuado, por otro lado los tratamientos off site son más rápidos y tienen un mejor control, además no existe ningún impedimento técnico u operacional para excavar el suelo contaminado.

El segundo paso es determinar si la tecnología seleccionada se basará en un proceso físico, químico, biológico o térmico.

Los procesos químicos, físicos y térmicos se utilizan generalmente cuando:

- Los contaminantes presentes en el suelo son inorgánicos
- Los contaminantes se encuentran intemperizados
- La concentración de los contaminantes es muy alta que inhibe la actividad biológica
- Los contaminantes son tóxicos.

Estos procesos tienen la ventaja de ser muy rápidos en el tratamiento, pero generan desechos que requieren un tratamiento posterior, por lo que su costo se eleva, además el ecosistema del sitio contaminado generalmente se altera.

Las técnicas térmicas tienen la desventaja de ser lentas cuando se aplican a suelos arenosos, además en México los permisos para operar sistemas de incineración para el tratamiento de residuos peligrosos están suspendidos por

el Instituto Nacional de Ecología, por lo que no es una técnica recomendable para el saneamiento de la TAD de Acapulco.

Entra las técnicas físicas que no se puede utilizar se encuentran las paredes reactivas y/o barreras, ya que no constituyen una técnica de restauración de suelos contaminados, sino un control hidráulico que disminuye la migración del agua subterránea contaminada hacia cuerpos de agua. Está técnica puede usarse como complemento de otras.

El bombeo y tratamiento es una técnica física que es útil para la remoción de hidrocarburos ligeros que flotan sobre el manto freático y no remueven hidrocarburos adsorbidos o depositados en la zona no saturada, por lo que su empleo no es viable en la TAD.

La estabilización/solidificación es un método que se recomienda para contaminantes orgánicos e inorgánicos con altas concentraciones o muy tóxicos. Actualmente PROFEPA no la acepta por experiencias anteriores con malos resultados, por lo que también queda descartada.

Una técnica que podría funcionar es el lavado de suelos con surfactantes, ya que las soluciones usadas para lavar los suelos, incrementan la solubilidad y/o movilidad de los contaminantes (ROOTE, 1997), además acelera una o más reacciones geoquímicas que alteran la concentración del contaminante en el agua subterránea como: adsorción, desorción, oxidación-reducción, ácido-base, solución-precipitación y biodegradación. El problema de esta técnica es que los lixiviados generados requieren un tratamiento posterior, lo que incrementa de forma importante los costos de la rehabilitación.

La biorremediación es un proceso que utiliza microorganismos para convertir sustancias complejas a productos simples, reduciendo su toxicidad para el ambiente. La biorremediación puede ser una alternativa eficiente para el tratamiento de contaminantes en estado líquido, vapor o sólido.

Los procesos biológicos son eficientes para degradar compuestos orgánicos como los hidrocarburos, solventes no clorados, algunos compuestos aromáticos.

Para el caso de la TAD de Acapulco, por las características geohidrológicas de la zona (nivel freático somero, alta permeabilidad), tipo de suelo contaminado (arena con bajo contenido de material arcilloso) y tipo de contaminante (HTP), se considera la opción de aplicar una tecnología biológica.

Las técnicas biológicas que existen para tratar suelos contaminados de forma eficaz y económica son:

- Biofiltros
- Barreras biológicas
- Biopilas
- Bioremediación intrínseca o atenuación natural
- Bioventeo
- Biolabranza
- Fitorremediación
- Tratamiento con hongos

Los biofiltros son una tecnología aerobia que se utilizan para tratar contaminantes como compuestos orgánicos no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y volátiles. La biofiltración se limita a tratar gases por lo que su empleo en la TAD no aplica.

Las barreras biológicas son un tratamiento *in situ*, que se limita a tratar agua subterránea contaminación compuestos orgánicos, por lo que su aplicación en la TAD de Acapulco queda descartada.

Una de las técnicas nuevas de biorrestauración de suelos, son las biopilas, las cuales consisten en un proceso biológico controlado donde, los contaminantes biodegradables son convertidos en agua y dióxido de carbono. El suelo se excava y se prepara para formar una pila que debe contar con un sistema de aireación para que la biodegradación se lleve a cabo en condiciones aeróbicas, así como la adición de nutrientes para mantener las relaciones adecuadas de carbono, nitrógeno y fósforo también es necesario mantener bajo control el contenido de humedad y pH. Por lo que su aplicación en la TAD de Acapulco es viable.

Los bioreactores se utilizan principalmente para tratar agua subterránea contaminada, así como aguas residuales domésticas, por lo que su aplicación en la TAD de Acapulco no es adecuada

La atenuación natural puede emplearse para sanear agua subterránea, suelo y sedimento, se un tratamiento *in situ* para contaminantes orgánicos. La atenuación natural no es igual que "ninguna acción", ya que los procesos naturales como dilución, volatilización, biodegradación, adsorción y las reacciones químicas que se llevan a cabo permiten reducir las concentraciones del contaminantes a los niveles de limpieza aceptados. El inconveniente es que es un proceso muy largo de 2 a 10 años. Por lo que su aplicación en la TAD de Acapulco queda limitado a emplearlo como un tratamiento complementario.

El bioventeo es una tecnología *in situ* que se utiliza sobre todo para tratar compuestos orgánicos no halogenados como los hidrocarburos del petróleo, así como algunos plaguicidas, su duración es de 6 meses a 5 años. Si se emplea para degradar compuestos orgánicos volátiles, debe asegurarse que los contaminantes se degraden antes de volatilizarse. Su aplicación se limita debido a la heterogeneidad de la subsuperficie, ya que interfiere con la aireación, también la presencia del agua subterránea reduce la efectividad del bioventeo y su costo varía de \$13.09 a \$65.46 dólares por m³. Podría emplearse como tecnología de saneamiento en la TAD de Acapulco, pero su inconveniente es el tiempo de saneamiento, lo que hace que los costos se eleve, otro problema para su aplicación es el tipo de contaminante, ya la TAD de Acapulco está contaminada con hidrocarburos ligeros.

La biolabranza es un tratamiento *ex situ* que se aplica a suelos contaminados con bajas concentraciones, menores de 30,000 ppm de HTP, el tratamiento consiste en labrar el suelo periódicamente para airearlo. Sus principales desventajas y por lo que no se aplica en la TAD de Acapulco, es que requiere de grandes extensiones para poder colocar el suelo contaminado, y la segundo es por el tipo de contaminante como so hidrocarburos ligeros, al ararlos se provoca que se volatilicen y que no se degraden.

La fitoremediación se puede utilizar para tratar una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos, se ha probado para remover nitratos y amonio del agua. Su aplicabilidad en la TAD de Acapulco se limita porque

requiere un área grande de tratamiento , así como baja profundidad de la pluma de contaminación, menor de 1 m. Otra desventaja es e largo período de saneamiento de 2 a 20 años. Su costo varia de \$75.00 a \$150.00 dólares por hectárea.

El tratamiento biológico con hongos lignocelulósicos, consiste en mezclar el suelo contaminado con hongos y un sustrato como la viruta de la madera. El tratamiento consiste en mezclar el suelo contaminado con el hongo y el sustrato , ya que este tiene la capacidad de y mineralizar compuestos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, bifenilos policlorados y pentaclorofenoles. Entre sus limitantes y por lo que no se aplica en la TAD de Acapulco, es porque su efectividad todavía se está demostrando a nivel laboratorio.

Finalmente se selecciona la o las tecnologías que puedan aplicarse al sitio que se desea sanear. Para la TAD de Acapulco las únicas que podrían funcionar so la biopilas y la atenuación natural, está ultima como tecnología complementaria.

La efectividad de la biopila se relaciona directamente con la disponibilidad de los microorganismos para degradar los hidrocarburos del petróleo presentes en el suelo y alcanzar los niveles de limpieza deseados. La información necesaria para el diseño de la biopila se obtiene de los estudios de tratabilidad, dicha información no es una garantía absoluta pero reduce la incertidumbre sobre los parámetros de diseño que pueden ajustarse para garantizar la efectividad de la biopila. La tabla 5.10 contiene los criterios de selección y las pruebas requeridas para asegurar la factibilidad de la biopila.

Tabla 5.10 Pruebas requeridas para la factibilidad de la biopila (Fahnestock and Wicramanayake 1998).

Parámetros medidos	Propósitos y comentarios	Criterios de selección	Criterio por arriba del límite	Criterio por debajo del límite.
HTP y concentración	Determinación de las concentraciones de los contaminantes que serán tratados	HTP < 50 000 mg/KG, baja concentración de compuestos recalcitrantes, compuestos clorados, HPA's y BPC's	Mezclar con suelos menos contaminados o agentes texturizantes	N.A.
Densidad de MO degradadores de HTP	Indica la presencia de microorganismos capaces de degradar los contaminantes	Microorganismos degradadores > 1 000 UFC/g de suelo seco	N.A	Verificar los parámetros como nutrientes, contenido de humedad, oxígeno disponible, concentración de metales tóxicos < 250 mg/kg y considerar la adición de microorganismos exógenos por medio de una bioaumentación
pH	Verificar si es necesario modificar el pH	pH entre 6 y 9	Ajustar con compuestos ácidos como el azufre	Ajustar con compuestos básicos como los fertilizantes
Contenido de Nitrógeno	Determinar si es necesario ajustar el contenido de nutrientes	C:N = 100:15	N.A.	Agregar fertilizantes o compuestos como nitrógeno
Contenido de fósforo	Determinar si es necesario ajustar el contenido de nutrientes	C:F = 100:1	N.A.	Agregar fertilizantes
Contenido de humedad	Determinar si es necesario ajustar el contenido de humedad	Del 70% al 95% de la capacidad de campo	Secar el suelo utilizando el sistema de aireación	Agregar agua para alcanzar al menos el 70% de la capacidad de campo.
Distribución y tamaño de las partículas	Determinar si es necesario ajustar el tamaño de las partículas	Bajo contenido de arcillas y limos < 25% del volumen total de suelo.	Agregar agentes texturizantes	N.A.

N.A. No aplica

Los parámetros de la tabla anterior deben compararse con las características y condiciones de contaminación del suelo, si los valores son coherentes, la tecnología de la biopila se considera adecuada, en caso contrario, los parámetros que no se encuentren dentro de los límites se ajustarán. La factibilidad de los parámetros ajustados se verifica con los estudios de tratabilidad, comparando la degradación de los hidrocarburos bajo condiciones aerobias antes y después de los ajustes

5.8 Selección del sitio para el saneamiento

El sitio donde se construirán las biopilas para el saneamiento del suelo debe ser accesible, seguro, plano, libre de inundaciones, y lejos de un área residencial.

La USEPA recomienda que las instalaciones existentes que se encuentren dentro del sitio pueden reducir los costos del tratamiento, ya que pueden ser utilizadas, como por ejemplo las zonas pavimentadas o asfaltadas como el estacionamiento, caminos y los servicios de luz, agua, así como las áreas cubiertas.

Durante el proceso de selección del sitio deben consultarse las normas oficiales existentes, y cuestionar a la autoridad correspondiente si el sitio seleccionado es el adecuado.

Una vez que el sitio se ha seleccionado, se realizará una visita de campo para identificar las instalaciones y servicios que pueden ser utilizados, así como las características del mismo.

Para la selección del sitio es importante considerar los siguientes puntos:

- Seleccionar un sitio para el manejo del suelo.
- Área suficiente
- Evitar las distancias largas para el movimiento de tierras.
- Es deseable que el sitio presente una pendiente natural para aprovecharla en el drenaje.
- Seleccionar el sitio cercano a servicios tales como energía, agua, etc.

En la siguiente tabla se presenta una guía para la selección del sitio.

Tabla 5.11 Guía para la selección del sitio (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

PARÁMETRO	DEFINICIÓN	RECOMENDACIONES
Geografía	Localización y condiciones naturales del sitio	Seleccionar un área plana con buen drenaje, libre de inundaciones, a una distancia > de 450 m de las zonas residenciales. Las instalaciones existentes del sitio podrían ser utilizadas.
Accesibilidad	Aprovechar los accesos existentes.	Los caminos de acceso principales y secundarios pueden construirse con grava, asfalto o concreto, dependiendo de la capacidad de carga requerida y de la maquinaria necesaria para el movimiento de tierras. Es deseable que el sitio para el saneamiento se encuentre cerca del suelo contaminado.
Espacio requerido	Se requiere un área para las instalaciones necesarias durante la operación del proceso.	Al considerar el área requerida deben incluirse: El área de acceso, los caminos principales y secundarios, el área de almacenamiento, el área de preparación del suelo, el área de las biopilas, el área para la maquinaria, el área para el tanque de almacenamiento y la zona de amortiguamiento.
Instalaciones	Servicios como electricidad y agua.	Es deseable que se cuente con servicios como electricidad y agua.
Logística del proceso	Transporte, manejo y almacenamiento del suelo.	Se requiere de caminos principales y secundarios así como de un espacio adecuado para que los camiones maniobren, durante el movimiento de tierras. Para el manejo del suelo debe considerarse el área para la instalación de los equipos de mezcla y trituración del suelo. Las áreas de preparación y almacenamiento del suelo deben ser impermeables y estar protegidas contra las inclemencias del tiempo.
Seguridad.	Control de los accesos y plan de emergencias	El sitio debe estar bardeado y contar únicamente con una puerta de acceso, y caseta de vigilancia. Las áreas de almacenamiento y cuarto de máquinas deben encontrarse bajo llave.

En la TAD de Acapulco, las biopilas se puede construir dentro de las instalaciones de la misma, debido a que se cuenta con espacio suficiente, disponible y localizado cerca del suelo contaminado, aproximadamente a 240 metros por lo que los movimientos de tierra serán mínimos y se reducirán los costos del tratamiento, también será posible utilizar las áreas pavimentadas para caminos internos.

El área donde es posible construir las biopilas la proyectada para el estacionamiento de pipas particulares ubicado en la parte suroeste de la TAD, muy cerca del acceso principal (Figura 5.6), actualmente está designada como área verde. En la figura 5.7 se localiza la zona donde se construirán las biopilas y la zona donde se encuentra el suelo contaminado.

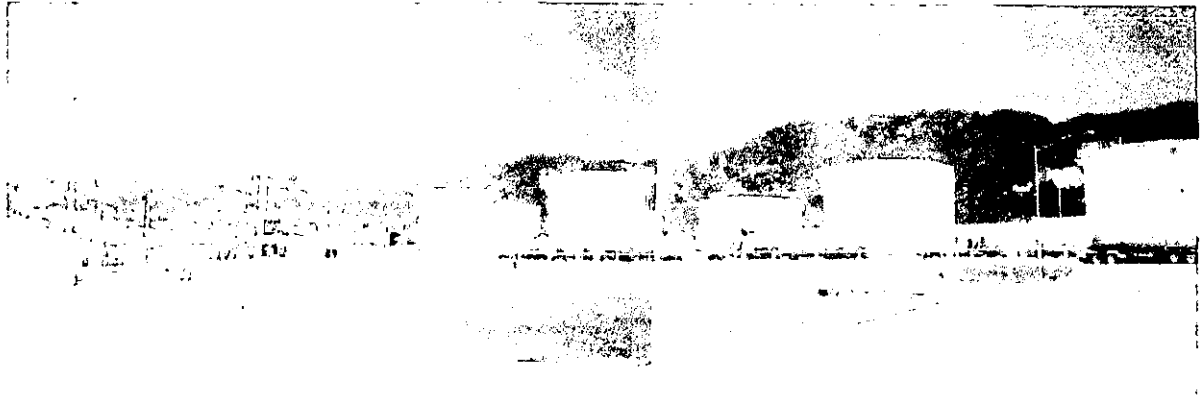


Figura 5.6 Área disponible para las biopilas.

Es importante mencionar que esta área se seleccionó por las siguientes razones:

- Se encuentra cerca del suelo contaminado.
- El acceso principal está relativamente cerca.
- Cuenta con comunicación a los caminos internos.
- No interfiere con la buena operación de la TAD.
- Es el área más grande de la TAD para ser utilizada.
- Requiere de trabajos simples durante la preparación del sitio.

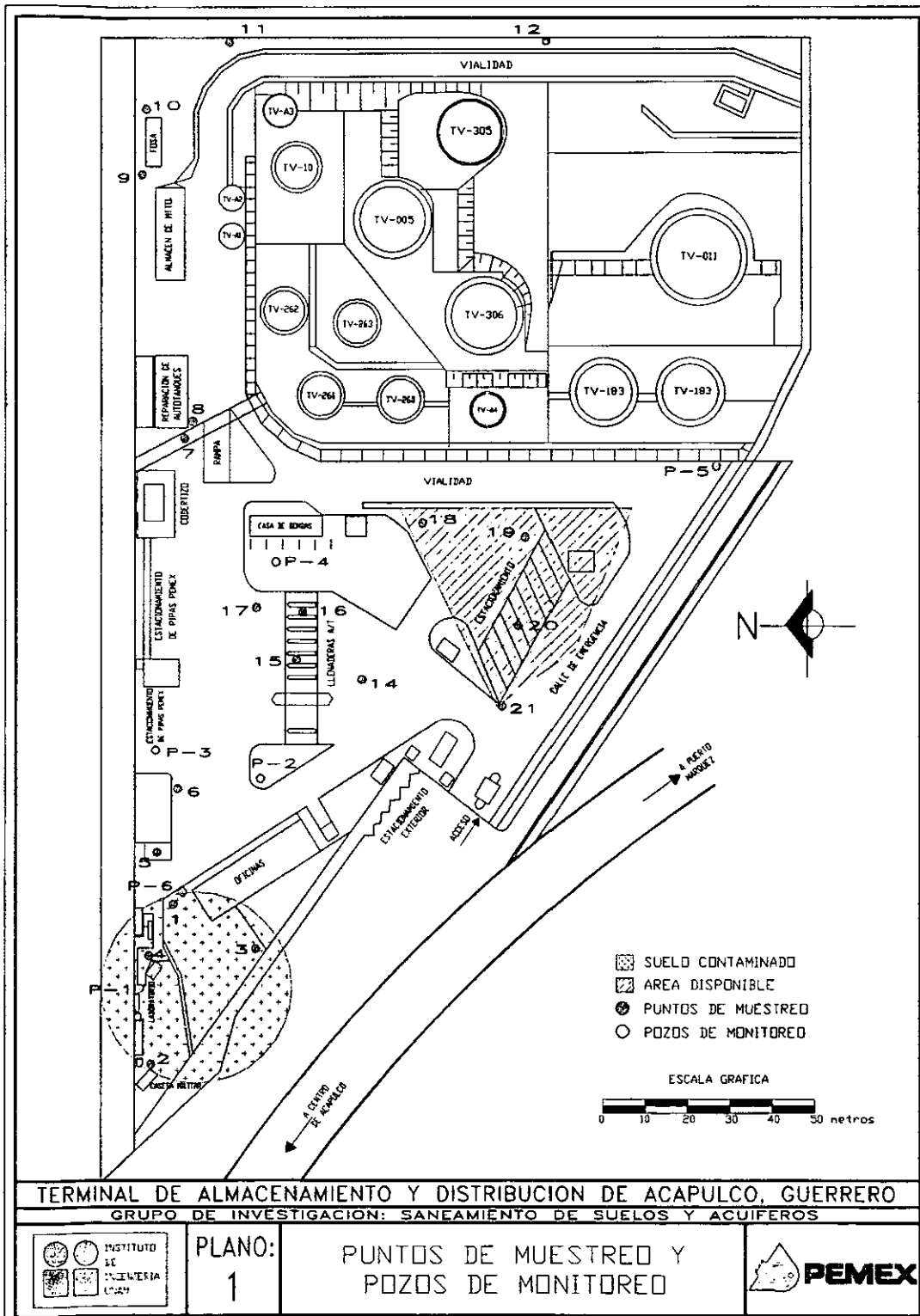


Figura 5.7 Localización del suelo contaminado y área disponible

Capítulo 6

Diseño de la biopila

La información necesaria para el diseño de la biopila, se agrupa en las categorías de:

1. Caracterización física del sitio.
2. Muestreo y análisis del suelo.
3. Estudios de tratabilidad (de campo y laboratorio).
4. Prueba piloto y/o demostración en campo.

En la caracterización física del sitio se obtiene información sobre:

- Topografía del terreno
- Geohidrología
- Condiciones climatológicas

En el muestreo y análisis del suelo se determinan datos sobre:

- Concentración de los contaminantes
- Tipo de contaminantes
- Concentración de nutrientes
- Contenido de materia orgánica
- Toxicidad
- Estructura química del contaminante
- Volatilidad
- Concentración de metales
- pH
- Temperatura
- Contenido de humedad

Los estudios de tratabilidad de campo y laboratorio son necesarios para identificar (Baker and Herson, 1994):

- El potencial tóxico de la degradación de los productos
- El potencial de degradación
- El porcentaje de reducción de la concentración de nutrientes
- Evaluación de la seguridad

-
- Determinación de los volúmenes de excavación y movimiento de tierras

Para elaborar el diseño de la biopila, se revisan y calculan:

- Las características (físicas, químicas y biológicas) del suelo que será tratado.
- Los resultados de los estudios de tratabilidad.
- Las normas que regulen el sitio.
- Los planes de monitoreo y seguridad.
- Los requerimientos de nutrientes, humedad y aireación
- La necesidad de modificar las características del suelo.
- El volumen necesario de material para la construcción de la base.
- El número aproximad de biopilas requerido y su tamaño.
- El número de ciclos del tratamiento.
- El calendario de actividades

6.1 Estudios de tratabilidad

Según Baker and Herson, 1994 los estudios son deseables cuando la toxicidad afecta la actividad biológica. Estos estudios proporcionan datos como:

- Tipo y concentración de hidrocarburos
- Densidad de población heterotrófica y/o microorganismos degradadores de hidrocarburos.
- pH, contenido de humedad, fósforo, nitrógeno, tamaño de la partícula, distribución de la contaminación en el suelo.
- Biodegradabilidad de los contaminantes
- Demanda de oxígeno
- Cinética de degradación de los microorganismos nativos

Si los estudios de laboratorio no demuestran efectividad deberán hacerse pruebas piloto en campo o proponer otras alternativas de saneamiento (Baker and Herson, 1994).

Los objetivos de éstos estudios son:

- Determinar el tipo y concentración de los contaminantes.

-
- Evaluar las concentraciones iniciales presentes, para establecer los límites de limpieza.
 - Determinar si los nutrientes (nitrógeno y fósforo) se encuentran presentes en concentraciones suficientes y disponibles para los microorganismos.
 - Evaluar los parámetros que inhiban el crecimiento microbiano (concentraciones tóxicas de metales, pH)
 - Determinar si el proceso de biorremediación para el saneamiento del sitio es adecuado.
 - Obtener datos para la planeación del tamaño, optimización del proceso y selección del equipo.

También establecieron que existen dos tipos de estudios de biotratabilidad utilizados para demostrar la efectividad de la biopila:

1. Estudios por lotes o simples
2. Estudios en conjunto o profundos

Los estudios por lotes son sencillos y económicos, se emplean para determinar la biodegradación de los contaminantes en agua o suelo utilizando para ello una mezcla diluida de agua y suelo. Estos estudios como no son precisos deben repetirse varias veces para evaluar la efectividad de la biopila, generalmente se utilizan para evaluar las tecnologías de biorremediación que se efectúan en medios acuosos.

Los estudios en conjunto por su parte utilizan muestras inalteradas de suelo para analizarlo en condiciones similares a las del sitio contaminado.

Tanto los estudios por lotes como en conjunto miden la degradación de los contaminantes a través de la reducción de sus concentraciones y de los cambios en la población microbiana. Ambos tipos de estudios empiezan con una caracterización físico-química del suelo contaminado. Los parámetros que se analizan se resumen en la tabla 6.1

Tabla 6.1 Parámetros físico-químicos para los estudios de tratabilidad (Baker and Herson, 1994)

parámetros	Propiedades medidas
Toxicidad del suelo	Tipo y concentración de los contaminantes y de los metales presentes.
Textura del suelo	Tamaño de las partículas del suelo, contenido de arcillas, humedad, porosidad, permeabilidad y densidad.
Biodegradabilidad de los contaminantes.	Concentración de carbono orgánico total, volatilidad y estructura química.

Los estudios de biotratabilidad independientemente si es por lotes o en conjunto incluyen:

- Estudios de control; miden las condiciones bajo las cuales las bacterias existentes degradan los contaminantes en condiciones aeróbicas, sin añadir nutrientes.
- Ajuste de nutrientes, se calcula la cantidad de nutrientes necesaria para tener la relación óptima de C:N:P
- Inoculación, si el conteo de bacterias indica que la población microbiana nativa es muy baja, será necesario inocular microorganismos exógenos capaces de degradar los contaminantes.

Las pruebas piloto evalúan con mayor precisión la efectividad de la tecnología de saneamiento, pero se incrementan los costos, por lo que únicamente se recomiendan cuando se presentan condiciones extraordinarias o inusuales en el sitio. Si las condiciones específicas del sitio justifican la prueba piloto y el presupuesto lo permite pueden realizarse, pero por lo general no son necesarios y pueden extrapolarse resultados de sitios con condiciones similares de contaminantes y concentraciones para obtener información. Las pruebas de tratabilidad también se utilizan para determinar las condiciones óptimas de operación.

6.2 Cálculos de diseño

Una vez verificada la efectividad de la biopila como tecnología de saneamiento, se puede diseñar el sistema.

6.2.1 Criterios de diseño

En seguida se mencionan los criterios principales a considerar en el diseño de la biopila

El área o espacio requerido se puede determinar, dividiendo el volumen de suelo que será tratado entre la altura propuesta para las pilas. Adicionalmente debe considerarse un área alrededor de las pilas para las pendientes de los lados de las pilas, las zanjas y los accesos. El largo y ancho de la pila no se restringe, a menos que el sistema de aireación sea pasivo, en este caso se recomienda que el ancho no exceda de 2.5 m (EPA, 1994).

El arreglo o configuración de las pilas se determina de acuerdo al espacio disponible en el sitio. Los arreglos o sistemas de biopilas pueden ser simples o múltiples.

El sistema de aireación puede ser mecánico, utilizando sopladores o ventiladores conectados a una red de tuberías, o manual mediante volteo mecánico de las pilas.

Los escurrimientos, inundaciones y el lavado del suelo en las áreas de tratamiento, son controlados por medio de zanjas que interceptan y desvían el flujo fuera del área de tratamiento donde son tratados o descargados al alcantarillado si cumple con las normas correspondientes.

La erosión del suelo debido al agua y al viento puede controlarse cubriendo las pilas con una cubierta de plástico o con una capa de grava de ½ pulgada.

Los métodos para ajustar el pH, humedad y nutrientes, pueden emplearse en forma sólida, mezclando el suelo con fertilizantes, cal y/o azufre mientras se construye la biopila, o en forma líquida inyectando al mismo tiempo nutrientes, agua y soluciones ácidas o alcalinas durante la operación de la biopila. El tipo de nutrientes, y soluciones para el ajuste del pH se determinan durante los estudios de tratabilidad. (Baker and Herson, 1994)

La seguridad del sitio es necesaria para evitar que personas ajenas al personal que labora entren al área de tratamiento, los mecanismos de seguridad utilizados pueden ser cercas, bardas y casetas de vigilancia.

El control de las emisiones de gases es necesario, si los contaminantes presentes en el suelo son volátiles. Para cumplir con las normas de calidad del aire las emisiones de los orgánicos volátiles deben de estimarse basándose en la concentración inicial de los HTP.

6.3 Diseño de las pilas en la TAD

Las pilas de la TAD de Acapulco se diseñarán una para un volumen de 800 m³ y otra para 500m³ con una concentración de HTP de 21,957.10 mg/kg, el contenido de humedad del suelo es de 20.4%, lo cual represente el 28.5% de la capacidad de campo, el suelo es relativamente uniforme con un contenido mínimo de limos, arcillas y materia orgánica, el pH del suelo es de 6.9 y la relación C:N=8:1, el Nitrógeno total N(%)= 0.18, el carbono orgánico es 1.49%, la materia orgánica presente es 2.57% y el fósforo disponible es 149.75 ppm, las UFC heterótrofas son 6.35x10⁶, la porosidad n=0.39, la densidad aparente es 2.64 y las densidad real es de 4.327 g/m³. Los datos anteriores se obtuvieron en campo y laboratorio.

De acuerdo con los criterios de selección, el uso de la biopila como alternativa de saneamiento resulta óptima. tabla 6.2

Tabla 6.2 Criterios de selección	
Requeridos	Presentes
HTP ≤ 50 000 mg/kg	HTP = 21 957.10 mg/kg
Bacterias heterotróficas ≥ 1000 UFC/g de suelo seco	Bacterias heterotróficas = 6.35x10 ⁶ UFC/g de suelo seco
pH entre 6 y 9	pH entre 6.9
Contenido de agua entre el 70% y 95% de la capacidad de campo	Contenido de agua 47.85% de la capacidad de campo
Bajo contenido de limos y arcillas	Bajo contenido de limos y arcillas
Relación C:N:P:K 100:15:1:1	Relación C:N:P:K 100:8:1
Metales tóxicos ≤ 2 500 mg/kg	Metales tóxicos ≤ 2 500 mg/kg

Nota: Los criterios sombreados son los que se ajustarán

La concentración de HTP se estimó con la media ponderada de las concentraciones y los volúmenes contaminados respectivamente.

Cálculo de la media ponderada:

Intervalo	Marca de clase	Frecuencia	fx
10001 - 20000	15000.5	2929	43936464.5
20001 - 30000	25000.5	1408	35200704
30001 - 40000	35000.5	693	24255346.5
40001 - 50000	45000.5	263	11835131.5
> 50000	55000.5	30	1650015
		5323	116877661.5

$$x = \frac{116877661.5}{5323} = 21957.1034 \text{ mg/kg}$$

6.3.1 Dimensiones de la biopila

Antes de iniciar el cálculo del tamaño de las biopilas es importante considerar la superficie que se tiene disponible en el sitio, el tiempo necesario para el tratamiento y el volumen total de suelo a tratar.

El volumen total de suelo a sanear es 5323 m³, el área o superficie disponible en el sitio es 2268.36 m², con un perímetro de 203.45 m. La altura propuesta de las pilas para asegurar una buena aireación es 1.5 m. Con estos datos se pueden proponer diferentes capacidades para las pilas.

Para la TAD de Acapulco se proponen dos capacidades 500 m³ y 800 m³ con una pendiente de 1.25:1 para los taludes de las pilas, ya que estas pendientes disminuyen la probabilidad de deslaves y facilita la formación de la pila.

Para calcular las dimensiones de la pila, se establecen los parámetros de:

- Capacidad de la pila (volumen)
- Altura de la pila.
- Pendiente de los taludes de los lados de la biopila

En este caso se establecieron dos volúmenes de suelo, de 500 m³ y 800 m³, una altura de 1.5 m y una pendiente de 1.25:1

En la figura 6.1 se observa la geometría de la biopila.

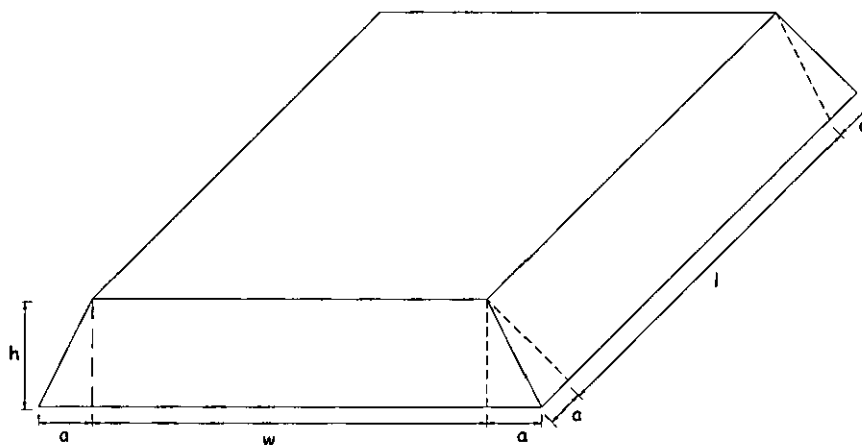


Figura 6.1 Geometría de la pila

Con esta configuración geométrica, el volumen de la biopila se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$V = \frac{1}{6}h(B_1 + 4M + B_2) \dots\dots(6)$$

donde:

V = volumen de la pila

h = altura de la pila

B₁ = área de la base mayor

B₂ = área de la base menor

M = área de la sección media de la biopila.

Se tiene que :

$$B_1 = (l + 2a)(w + 2a) = lw + 2aw + 2al + 4a^2 \dots\dots(7)$$

$$B_2 = lw \dots\dots(8)$$

$$M = \left(l + 2\left(\frac{a}{2}\right)\right)\left(w + 2\left(\frac{a}{2}\right)\right) = lw + aw + al + a^2 \dots (9)$$

sustituyendo (7), (8) y (9) en 6

$$V = \left(\frac{h}{6}\right)\left((lw + 2aw + 2al + 4a^2) + lw + 4(lw + aw + al + a^2)\right) \dots (10)$$

agrupando términos:

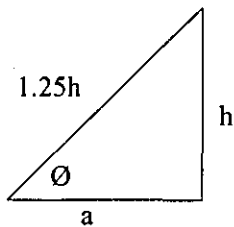
$$V = \left(\frac{h}{6}\right)\left(6lw + 6aw + 6al + 8a^2\right) \dots (11)$$

$$V = h(lw + aw + al + 1.33a^2) \dots (12)$$

$$V/h = (l + a)w + (al + 1.33a^2) \dots (13)$$

Despejando w, obtenemos.

$$w = \left[\frac{V/h - (al + 1.33a^2)}{l + a} \right] \dots (14)$$



Para la pendiente se ti

Suponiendo la pendiente de 1.25:1

$$\sin \theta = \frac{h}{1.25h} = 0.8$$

$$\theta = 53.13^\circ$$

$$\tan \theta = \frac{h}{a} = \frac{5}{4}$$

Con las fórmulas anteriores, se propone uno de los lados de la biopila para obtener las demás dimensiones.

En este caso como se diseñarán dos pilas una de 500 m³ y otra de 800 m³, se proponen dos lados uno de 25 m y otro de 31 m respectivamente, con una pendiente de 1.25:1 y una altura de 1.5 m para ambas pilas. Aplicando las fórmulas y a través de iteraciones, se obtienen las dimensiones óptimas. Tabla 6.3

Tabla 6.3 DISEÑO DEL TAMAÑO DE LA BIOPILA							
Número	Volumen	Altura	L	a	l	w	W
1	500	1.5	25	1.13	22.75	12.82	15.07
2	800	1.5	31	1.13	28.75	16.71	18.96

6.3.2 Configuración del sitio.

La configuración o arreglo de las pilas en el sitio se realizó teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- El área requerida por las pilas.
- El área disponible en el sitio.
- El área que ocuparán las instalaciones durante la construcción y operación del proceso incluyendo: accesos, caminos principales y secundarios, área para la preparación y almacenamiento del suelo, área para las maniobras de los equipos, área para la ubicación de bombas, tuberías y la zona de amortiguamiento

En la TAD de Acapulco, la superficie disponible donde se construirán las biopilas, es el área proyectada para el estacionamiento de pipas particulares ubicado en la parte sudoeste de la TAD, muy cerca del acceso principal (figura 6.2.). Esta zona se considera apropiada ya que cuenta con comunicación a los accesos principales y a los caminos secundarios, así como una ligera pendiente natural que puede aprovecharse para el drenaje.

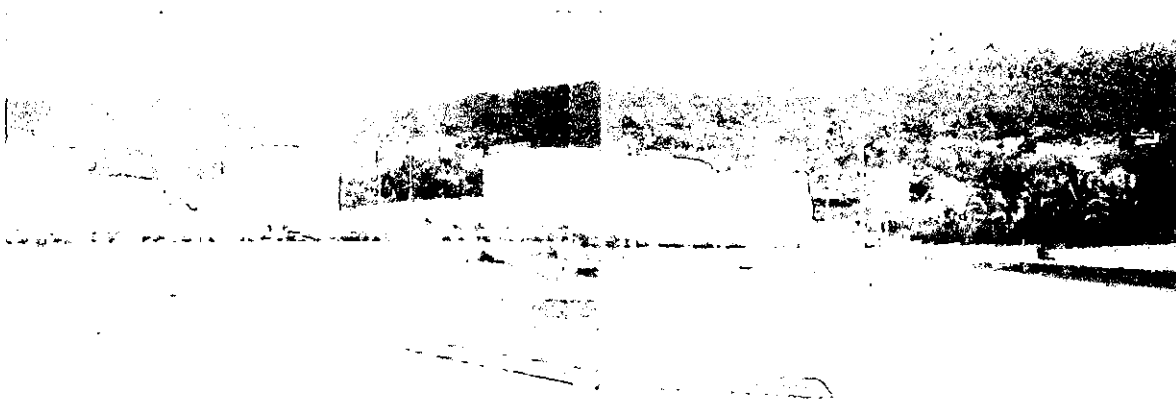


Figura 6.2. Área de tratamiento

El área requerida por las pilas se calcula con las dimensiones obtenidas:

Para la pila de 500 m³

$$(25)(15.07) = 376.77 \text{ m}^2$$

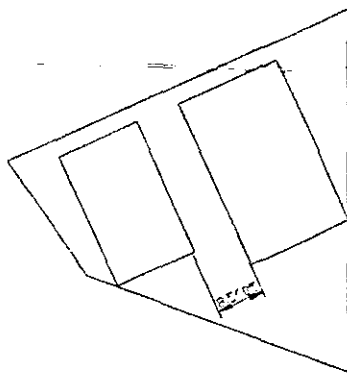
Para la pila de 800 m³

$$(31)(18.96) = 587.76 \text{ m}^2$$

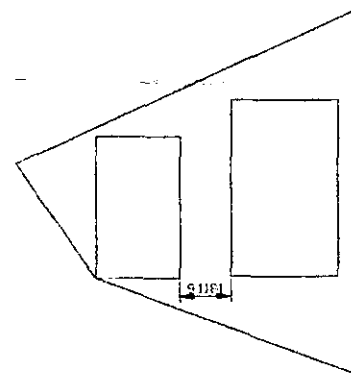
El área disponible en el sitio es de 2,268.36 m² y el área que ocupan las pilas es 964.53 m² por lo que se tiene un área para las instalaciones necesarias de 1,303.83 m²

Se propusieron dos diferentes configuraciones de las pilas en el sitio. Es importante destacar que el sistema de biopilas propuesto es múltiple.

Se propone un sistema múltiple con una pila de 25x15x1.5 metros con una capacidad de 500 m³ y otra de 31x19x1.5 con una capacidad de 800 m³, siendo la capacidad del sistema 1,300 m³. El área que ocupan las pilas es 964.53 m² y el área disponible para las instalaciones de operación y mantenimiento es 1,303.83 m². El sistema se configura de dos formas, orientando las pilas en diferentes ángulos. (Figura 6.3)



Opción 1
 1 pila de 25x15x1.5 = 500 m³
 1 pila de 31x19x1.5 = 800 m³
 Total = 1 300 m³



Opción 2
 1 pila de 25x15x1.5 = 500 m³
 1 pila de 31x19x1.5 = 800 m³
 Total = 1 300 m³

Figura 6.3 Configuración de las pilas

De las configuraciones anteriores, la más adecuada es la primera ya que de esta forma el área necesaria para la ubicación de los equipos, almacenamiento y preparación del suelo así como la zona de amortiguamiento se ubicarán en el lado sur con un área disponible de 534.46 m² lo que permite un mejor aprovechamiento del espacio disponible; por el contrario, en la segunda opción las biopilas quedan más separadas y en la parte norte del área de tratamiento, se desperdicia un espacio que podría utilizarse durante el proceso.

6.3.3 Contenido de nutrientes requeridos.

Tomando en cuenta que la concentración de carbono orgánico presente en el suelo es el 80% de la concentración de HTP, se calcula la cantidad de nutrientes necesaria para que la relación C:N:P sea óptima.

Para el nitrógeno se tiene lo siguiente:

$$\text{Carbono orgánico} = 21,956.60 \times 0.8 = 17,565.28 \text{ ppm}$$

$$N(\text{necesario}) = (17,565.28 \text{ mg / kg}) \times \left(\frac{15}{100}\right) = 2,634.79 \text{ mg / kg}$$

$$N(\text{disponible}) = 1,800 \text{ mg / kg}$$

$$\text{Volumen del suelo a tratar} = 5,325 \text{ m}^3$$

$$\text{densidad del suelo} = 2622.95 \text{ kg / m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{masa total del suelo} &= (5325 \text{ m}^3) \times (2622.95 \text{ kg / m}^3) \\ &= 13,961,967 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$N(\text{requerido}) = 2634.95 \text{ mg / kg} - 1800 \text{ mg / kg} = 834.79 \text{ mg / kg}$$

Total de nitrógeno

$$(13,961,967) \times (834.79 \text{ mg / kg}) \times \left(\frac{1 \text{ kg}}{1,000,000 \text{ mg}}\right) = 11,655.31 \text{ kg de N}$$

En la tabla 6.4 se observa la composición y porcentaje de nutrientes que contiene cada compuesto y que puede utilizarse.

Tabla 6.4 Composición y porcentaje de nutrientes.

Nombre	Compuesto	Peso molecular	Porcentaje
Urea	$\text{Cl}(\text{NH}_2)_2$	60.03	46:0:0
Superfosfato	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	234	0:27:0
Sulfato de potasio	K_2SO_4	174	0:0:45
Fosfato diamónico	$(\text{NH}_4)_2$	129	22:24:0

El nitrógeno se agregará en forma de urea:

La cantidad de Urea requerida/kg de suelo es:

$$(834.79 \text{ mg / kg}) \left(1 \text{ mg urea} / 0.46 \text{ mg N} \right) = 1,814.76 \text{ mg urea / kg suelo}$$

$$= 1.8147 \text{ k urea} / 1000 \text{ kg suelo}$$

Aplicación de nutrientes:

Como la densidad del suelo es 2,622.45 kg/m³, la cantidad necesaria de nutrientes por unidad de volumen es:

$$(1.814 \text{ kg} / 1000 \text{ kg suelo}) \left(2622.95 \text{ kg} / \text{m}^3 \right) = 4.75 \text{ kg urea} / \text{m}^3 \text{ suelo}$$

Para el fósforo se tiene

$$P(\text{necesario}) = (17,565.28 \text{ mg} / \text{kg}) \times \left(\frac{1}{100} \right) = 175.65 \text{ mg} / \text{kg}$$

$$P(\text{disponible}) = 175.65 \text{ mg} / \text{kg}$$

$$P(\text{requerido}) = 175.65 \text{ mg} / \text{kg} - 149.75 \text{ mg} / \text{kg} = 25.90 \text{ mg} / \text{kg}$$

$$\text{masa total del suelo} = (5325 \text{ m}^3) \times (2622.95 \text{ kg} / \text{m}^3)$$

$$= 13,961,967 \text{ kg}$$

Total de fósforo

$$(13,961,967) \times (25.90 \text{ mg} / \text{kg}) \times \left(\frac{1 \text{ kg}}{1,000,000 \text{ mg}} \right) = 361.61 \text{ kg de N}$$

El fósforo se agregará en forma de superfosfato, de la tabla 6.4

La cantidad de Superfosfato requerida/kg de suelo es:

$$(25.90 \text{ mg / kg}) (1 \text{ mg urea / } 0.27 \text{ mg N}) = 95.925 \text{ mg sup erfosfato / kg suelo}$$

$$= 0.09592 \text{ kg sup erfosfato / } 1000 \text{ kg suelo}$$

Aplicación de nutrientes:

Como la densidad del suelo es $2,622.45 \text{ kg/m}^3$, la cantidad necesaria de nutrientes por unidad de volumen es:

$$(0.09592 \text{ kg / } 1000 \text{ kg suelo}) (2622.95 \text{ kg / m}^3) = 0.2516 \text{ kg Ca(H}_2\text{PO}_4) / \text{m}^3 \text{ suelo}$$

Los nutrientes pueden añadirse en estado sólido o líquido; en el primer caso se aplican cuando la pila se construye y en el segundo caso cuando el sistema de irrigación empieza a operar.

6.3.4 Contenido de agua requerido

El contenido de humedad varía durante el proceso de saneamiento, ya que en la biodegradación se convierten los hidrocarburos en CO_2 y H_2O . La U.S. EPA recomienda que el contenido de humedad debe encontrarse entre el 40% y 85% de la capacidad de campo del suelo, aunque recomienda que para climas cálidos el contenido de humedad se encuentre entre el 70% y 95% de la capacidad de campo.

Las características de humedad del suelo de la TAD de Acapulco son las siguientes:

- El contenido del agua del suelo es de 20.4%
- La capacidad de campo del suelo es de 30%
- La humedad requerida es del 95% de la capacidad de campo.
- El contenido de agua presente en el suelo es 68% de la capacidad de campo:

$$\left(\frac{\theta}{C.C_s} \right) \times 100 \dots\dots (15)$$

$$\left(\frac{20.4}{30} \right) \times 100 = 68\%$$

donde:

θ = contenido de agua

C.C_s = Capacidad de campo del suelo

Para alcanzar la humedad requerida del 95% de la capacidad de campo, la cantidad de agua que se requiere agregar es :

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Humedad} & \longrightarrow & \text{C. Campo} \\
 20.4\% & \longrightarrow & 68\% \\
 x & \longrightarrow & 95\% \\
 x = 28.5\% & \text{de la capacidad de campo} &
 \end{array}$$

Como la humedad presente en el suelo es 20.4%

1000 g de suelo contienen 204 g H₂O y 796 g de suelo seco

condición inicial

$$\text{por lo que } 204 \text{ g H}_2\text{O} \longrightarrow 796 \text{ g suelo seco}$$

Condición final

$$285 \text{ g H}_2\text{O} \longrightarrow 715 \text{ g suelo seco}$$

$$796 \text{ g} - 715 \text{ g} = 81 \text{ g H}_2\text{O}$$

$$\begin{array}{rcl}
 81 \text{ g H}_2\text{O} & \longrightarrow & 715 \text{ g} \\
 x & \longrightarrow & 1000\text{g} \\
 x = 113.26 \text{ g H}_2\text{O} & &
 \end{array}$$

La cantidad de agua por volumen es.

$$(2622.95 \text{ kg} / \text{m}^3) (0.11326 \text{ kg} / \text{H}_2\text{O}) = 297.07 \text{ kg H}_2\text{O} = 297.07 \text{ l} / \text{m}^3$$

6.3.5 Índice de degradación

Las pruebas de respirometría se realizan para calcular el índice de degradación de los HTP en la biopila del suelo. En estas pruebas se miden los niveles de O₂ ya que este parámetro regula la degradación de los HTP. Las lecturas se toman hasta que las concentraciones de oxígeno bajan al 7% o hasta que la concentración no decrece más. Se considera que con una concentración

superior al 12% de O₂ se tiene una buena aireación y se asegura que la biopila trabaje bajo condiciones aerobias.

La ecuación estequiométrica proporciona la relación entre el consumo de oxígeno y la degradación de los HTP. Para el caso de la TAD de Acapulco, como el principal contaminante es gasolina, se tomó como compuesto representativo a los octanos, ya que de acuerdo con la composición de la gasolina son los que se encuentran en mayor número (Palencia, 1998). La ecuación es la siguiente:



El primer paso es expresar el porcentaje de O₂ en el suelo en mg O₂/kg de suelo. Para ello se emplean las propiedades de O₂ y del suelo. Una mol de aire del volumen de vacíos del suelo a una temperatura de 300°K ocupará un volumen de 24.6 L y suponiendo que la concentración de oxígeno en el aire del suelo así como la del aire del ambiente es del 20.9%, solo 5.14L de 24.6 L/mol de aire del suelo son ocupados por el oxígeno :

$$(24.6L/mol \text{ de aire del suelo})(20.9\%O_2)=5.14 \text{ L de } O_2/mol \text{ de aire del suelo}$$

Para determinar la masa de los 5.14 L O₂/mol de aire del suelo se requiere la densidad del O₂. Porque 1 mol de O₂ tiene una masa de 32g y ocupa un volumen de 24.6 L, por tanto, la densidad del oxígeno será:}

$$32g / 24.6L \text{ de } O_2 = 1.300 \text{ g / L de } O_2$$

$$1.300g / L \text{ de } O_2 \times 1000 \text{ mg / g} = 1300mg / L \text{ de } O_2$$

Este valor multiplicado por 5.14 L /mol de aire del suelo producirá 6,682 mg O₂ /mol de aire del suelo ó 271.6 mg/O₂ / L de aire del suelo:

$$1300mg / L \text{ de } O_2 \times 5.14L \text{ de } O_2 / mol \text{ de aire del suelo} = 6682 \text{ mg } O_2 / mol \text{ de suelo}$$

$$6682 \text{ mg } O_2 / mol \text{ de aire del suelo} \div 24.6 \text{ L / mol de aire del suelo} = 271.6 \text{ mg } O_2 / L \text{ de aire del suelo}$$

Una vez que la relación se ha establecido, se determina qué cantidad de oxígeno existirá en el volumen de vacíos de 1 kg de suelo. Como la densidad del suelo es 2622 kg/m³:

$$1,000L / m^3 \div 2622kg / m^3 = 0.381388 L / kg$$

1 kg de suelo ocupará un volumen de 0.381388 L/Kg

Si el volumen de vacíos en el suelo es 39%, el volumen que ocupará el aire en 1 Kg de suelo es:

$$0.381388 L / kg \times 39\% \text{volumen de vacíos} = 0.148741 L \text{ de aire} / Kg \text{ de suelo}$$

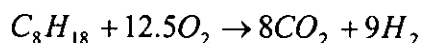
Para expresarlo en mg de O₂/kg de suelo, se multiplica por el factor de conversión calculado anteriormente (271.6 mg O₂/L de aire del suelo), puede determinarse que 40.398 mg/de O₂ estarán presentes en 1 kg de suelo con una concentración de 20.9%

$$0.148741 L \text{ de aire del suelo} / Kg \text{ de suelo} \times 271.6 mg O_2 / L \text{ de aire del suelo} = 40.398 mg O_2 / kg \text{ de suelo}$$

Pero como la concentración mínima de oxígeno para evitar condiciones anóxicas y anaerobias es del 12%, se realiza el ajuste:

$$40.398 mg O_2 / kg \text{ de suelo} \times 0.88 = 35.55 mg O_2 / kg \text{ de suelo}$$

Con los valores obtenidos anteriormente puede determinarse las masa de hidrocarburos que teóricamente pueden degradarse. De la estequiometría se obtiene:



$$C_8H_{18} = 12 \times 8 + 18 = 114$$

$$12.5O_2 = 12.5 \times 16 \times 2 = 400$$

$$\frac{400}{114} = 3.508$$

Por lo tanto para degradar 1 mg HTP /kg de suelo, se requieren 3.5 mg O₂/kg

y con $35.55 \text{ mg O}_2 / \text{kg de suelo}$ se degradan $10.1572 \text{ mg HTP} / \text{kg de suelo}$, pero como se tienen $21957.10 \text{ mg HTP} / \text{kg}$:

$$21957.10 \text{ mgHTP} / \text{kg} - 10.1572 \text{ mgHTP} / \text{kg} = 21946.94 \text{ mg} / \text{kg HTP}$$

Con este valor se calcula el flujo de aire de la pila para asegurar una buena aireación

El flujo de aire para la pila de 500 m^3 es el siguiente:

$$\frac{[\text{HTP mg} / \text{kg}](\text{Volumen m}^3)(\text{Densidad del suelo kg} / \text{m}^3)}{\text{Tiempo}}$$

$$\frac{(21946.94 \text{ mgHTP} / \text{kg})(500 \text{ m}^3)(2622 \text{ kg} / \text{m}^3)}{90 \text{ d}^*} = 319693759.33$$

$$= 319.6937 \text{ kg HTP/d}$$

*Suponiendo que el aireador trabaja durante 3 meses

Esto se pasará a libras de O_2 , para ello se multiplica por el factor de conversión y por 3.5 de acuerdo a la estequiometría.

$$319.6937 \text{ kgHTP} / \text{d} \times 2.205 \text{ lb} / \text{kg} \times 3.5 \text{ kgO}_2 / \text{kg HTP} = 2467.2365 \text{ lb} / \text{d}$$

Para obtener con el gasto neto de oxígeno se requiere ajustarlo para dosificar, el aire atmosférico que contiene 21% de oxígeno y este porcentaje no puede ser menor de 12%, para asegurar una buena aireación y evitar zonas anaerobias.

$$\frac{2467.2365 \text{ lbO}_2 / \text{días}}{(0.21 - 0.12) \times 0.075 \times 1440} = 253.83091 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

que es el flujo de aire necesario en la pila de 500 m^3 .

El flujo de aire para la pila de 800 m³ es el siguiente:

$$\frac{[HTP \text{ mg / kg}](\text{Volumen } m^3)(\text{Densidad del suelo } kg / m^3)}{\text{Tiempo}}$$

$$\frac{(21946.94 \text{ mgHTP / kg})(800 \text{ m}^3)(2622 \text{ kg / m}^3)}{90d *} = 511510014.933 \text{ mg / d}$$

$$= 511.510015 \text{ kg HTP/d}$$

*Suponiendo que el aireador trabaja durante 3 meses

Esto se pasará a libras de O₂, para ello se multiplica por el factor de conversión y por 3.5 de acuerdo a la estequiometría.

$$511.51 \text{ kgHTP / d} \times 2.205 \text{ lb / kg} \times 3.5 \text{ kgO}_2 / \text{kg HTP} = 3947.578 \text{ lb / d}$$

Para obtener el gasto neto de oxígeno se requiere ajustarlo, el aire atmosférico tiene 21% de oxígeno y este % no puede ser menor de 12%, para asegurar una buena aireación y evitar zonas anaerobias.

$$\frac{3947.578 \text{ lbO}_2 / \text{días}}{(0.21 - 0.12) \times 0.075 \times 1440} = 406.12 \text{ ft}^3 / \text{min}$$

que es el flujo de aire necesario en la pila de 800 m³.

Con los flujos de aire anteriores se calcula la capacidad de del equipo necesario ,...para esto se emplea el programa PILEFLOW, desarrollado por Calvin A. Kodres U.S. Naval Facilities Engineering Service Center.

6.3.6 Decisión entre temporal y permanente

Las biopilas pueden construirse con instalaciones temporales o permanentes, la principal diferencia entre estas dos opciones, es la forma de almacenar el suelo y la base sobre la cual se construye la biopila. Para el caso de instalaciones temporales, la base puede construirse sobre una capa de asfalto o concreto existente en el sitio o sobre una superficie de arcilla; mientras que para las permanentes se construye una base de concreto específicamente para

la biopila. Ambas bases deben ser capaces de soportar el peso propio de la biopila así como el equipo necesario para el movimiento de tierras.

En la mayoría de los casos las instalaciones para las biopilas temporales son suficientes; sin embargo, si se va a operar el sitio por más de cinco años se recomienda que las instalaciones sean permanentes para asegurar el buen funcionamiento de las mismas.

Otro factor importante para decidir entre instalaciones temporales o permanentes son los resultados de los estudios costo-beneficio.

En la TAD de Acapulco, de acuerdo con el volumen contaminado, dimensiones y la configuración de las biopilas, las instalaciones necesarias para la construcción y operación del sistema de tratamiento pueden ser temporales, ya que para tratar todo el volumen de suelo contaminado (5323 m³) será necesario repetir el proceso a lo más cuatro veces y si se considera que cada ciclo tarda entre tres y seis meses, el tiempo máximo estimado para el saneamiento del sitio no será mayor de dos años, por lo tanto no es necesario que las instalaciones sean permanentes.

Capítulo 7

Construcción de la biopila

Los procedimientos y métodos para la construcción de las biopilas varían con las condiciones presentes en el sitio, por lo tanto durante la caracterización física del sitio se determinan los factores que afectan su proceso constructivo, aunque las etapas involucradas en su construcción son básicamente las mismas:

- Preparación del sitio
- Construcción de la base
- Formación de la pila
- Instalación del sistema de recolección del lixiviados
- Instalación del sistema de aireación
- Adición de nutrientes
- Adición de humedad

Cada una de las etapas anteriores dependerá del tiempo de operación de las instalaciones de la pila. Asimismo es necesario tener presente si el diseño de la biopila es un sistema simple o múltiple.

7.1 Preparación del Sitio.

El sitio donde se construirán las biopilas deberá ser un área plana, libre de obstáculos y con una resistencia capaz de soportar cargas como el peso propio de la pila, el peso de las instalaciones adicionales, así como el de la maquinaria utilizada para el movimiento de tierras y formación de la pila.

El primer paso para la preparación del sitio es determinar la distancia entre el material contaminado y el área de tratamiento, identificar las entradas y salidas, las medidas de seguridad existentes así como identificar de manera general el tipo de instalaciones existentes en el sitio que pueden utilizarse.

Las actividades que tienen lugar antes de la construcción de la biopila son:

- Elaboración del programa de actividades de la construcción.
- Determinar el estado de las instalaciones existentes en el sitio que pueden utilizarse.
- Realizar una visita de campo para evaluar las condiciones del sitio.
- Limpieza de los alrededores y de las áreas de tratamiento y almacenamiento.
- Instalación de las medidas de seguridad, (bardas, puertas de acceso y señalización).
- Si los estudios de tratabilidad indican que es necesario preparar el suelo (mezclarlo con agentes texturizantes, triturarlo, lavarlo) deberá instalarse el equipo necesario.

La limpieza del terreno consiste en dejar libre de escombros, basura y desperdicios las áreas de tratamiento y almacenamiento. Si en el sitio existe una superficie de asfalto o de concreto, ésta puede utilizarse como sub-base, en caso contrario será necesario construirla utilizando una capa de arcilla limpia y compacta.

Otra de las actividades dentro de la preparación del sitio es la instalación de la infraestructura adecuada como: caminos, suministro de energía y agua.

Para la TAD de Acapulco, el área donde se construirán las biopilas se encuentra libre de obstáculos, escombros y basura (figura 7.1) y con una ligera pendiente que puede aprovecharse para el drenaje del sistema, por lo tanto la limpieza del terreno será prácticamente nula.

Por otra parte como el área de saneamiento se encuentra dentro de las instalaciones, el suministro de servicios como energía y agua no representan mayor problema. La distancia entre el material contaminado y el área de tratamiento, es aproximadamente de 240 m.

La terminal cuenta con medidas de seguridad propias como vigilancia y señalamientos, por lo que únicamente será necesario colocar señalamientos en el área de trabajo.

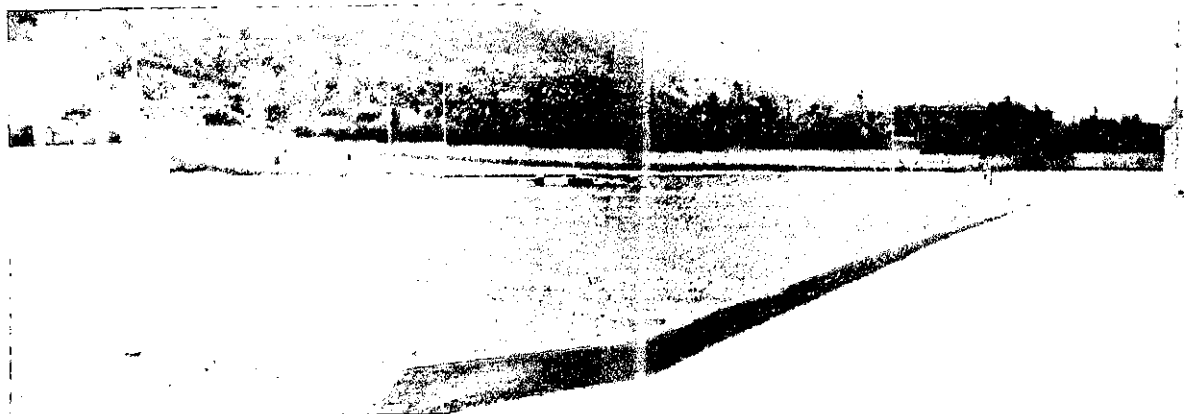


Figura 7.1 Área de tratamiento

Durante la visita de campo, se determinó que los caminos internos pueden utilizarse para el traslado del material, así como las guarniciones en el área verde para limitar el área de trabajo.

7.2 Construcción de la base de la pila.

La base para la biopila consta de una sub-base de suelo o arcillas, una capa impermeable, una capa compactada de suelo limpio y a los lados, zanjas o canales para la conducción del exceso de agua fuera del área de tratamiento (Fahnestock and Wicramanayake, 1998)

Sobre el terreno natural limpio se coloca una capa de suelo la cual se compacta y nivela para formar la sub-base, si el material con el que se construye es arenoso, este deberá compactarse del 85 al 90% de su densidad relativa, y para arcillas y suelos mejorados al 90% de la prueba Proctor (Lambe and Whitman, 1991) para esto se puede emplear un rodillo vibratorio, sin embargo si la arena se encuentra en estado denso, la aplicación de la vibración provocará que la arena se afloje; por lo que se recomienda verificar el peso volumétrico "*in situ*" antes de elegir el equipo de compactación. Es importante que el material para formar la sub-base no contenga partículas mayores de 1.25 cm ya que pueden causar protuberancias o perforaciones en la capa impermeable que se coloca sobre la sub-base. El espesor óptimo de la sub-base es de 15 a 25 cm (SEDUE, 1998)

Sobre la sub-base se coloca una membrana o capa impermeable, (geomembrana HPDE de polietileno de alta densidad de 40-60 mil). La geomembrana debe extenderse 90 cm más allá del ancho de la biopila para cubrir los canales y las zanjas. La colocación de la geomembrana o membrana debe evitarse durante la presencia de vientos con velocidades mayores de 24 km/h, debido a que con éstas velocidades la geomembrana se vuela y es imposible su manejo el junteo debe realizarse a la temperatura especificada por el fabricante y requiere un traslape de 15 a 25 cm.

Las membranas sintéticas se deterioran con los rayos ultravioletas, por lo que deben cubrirse lo más pronto posible con una capa de arena cuyo espesor varía entre 15 y 30 cm (SEDUE, 1998), para posteriormente compactarla. La base es ligeramente plana con una pendiente de 2 a 3% para obtener un buen escurrimiento y evitar encharcamientos en el área de tratamiento.

Si en el sitio existe una capa de asfalto, concreto o un área de estacionamiento, no es necesario la construcción de la sub-base ya que sobre el asfalto se coloca la membrana y luego la capa de arená.

En cualquier caso, la membrana debe extenderse hasta las zanjas o canales, ya que ahí es donde fluirá el agua en exceso. Las paredes de los canales o zanjas pueden construirse con vigas o polines de madera tratada de secciones 4"x4", unidas con remaches, o cubriendo la base de los canales con una capa de arcilla y las paredes con una malla y una capa de mortero en proporción 1:8, para de esta forma evitar el deslave y arrastre de los materiales (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

En la TAD de Acapulco será necesario remover toda la materia vegetal que cubre el área de tratamiento (figura 7.1) y sobre el terreno natural se colocará una capa de arcilla limpia y compacta para formar la sub-base. Sobre ésta se colocará la membrana de polietileno e inmediatamente se colocará una capa de arena que la cubra. Esta capa será aproximadamente de 15 cm de espesor, procurando mantener una pendiente del 2% al 3%

Durante la construcción de la base, también se realizará la excavación de las zanjas que servirán como canales, a los cuales se les colocará una capa de arcilla en la base y una capa de mortero en sus paredes.

Una vez terminada la base, se coloca un marco de madera que sirve de contención y posteriormente para el aseguramiento de la cubierta.

7.3 Sistema de aireación.

La aireación de la pila, como anteriormente se mencionó puede ser a través de inyección o extracción de aire. Se prefiere la inyección porque el compresor no requiere de un sistema de tratamiento de gases.

Cuando el sistema se opera a través de inyección, los tubos de aireación son colocados sobre la base del suelo limpio (figura 7.2) y el sistema de tratamiento de gases es opcional.

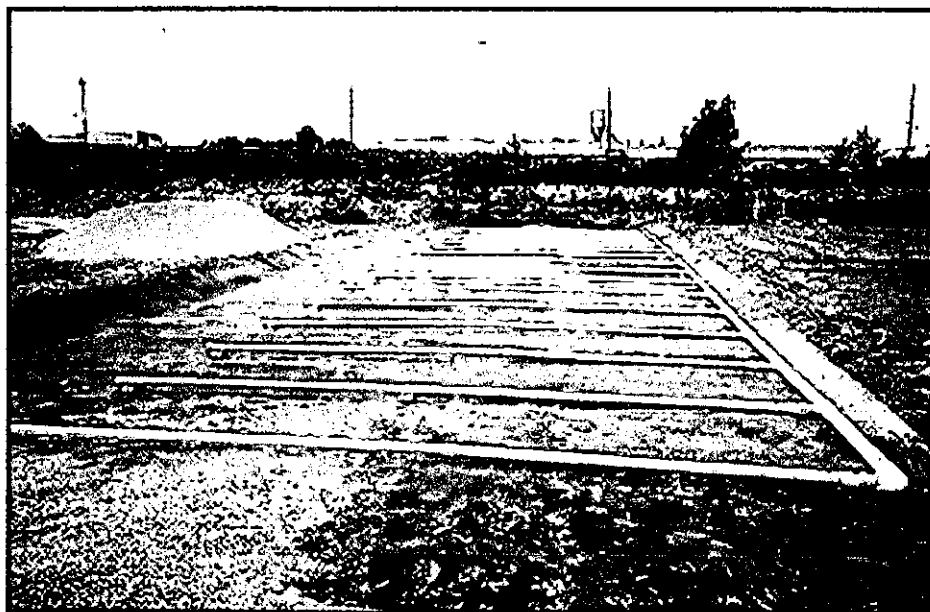


Figura 7.2 Colocación del sistema de aireación

En general el sistema consta de un tubo principal, conectado a la bomba, del cual salen varios ramales, el flujo de aire en los ramales se controla por medio de válvulas ubicadas en la entrada de cada ramal a la pila (Figura 7.3).

Cuando el sistema de aireación opera por medio de extracción, el sistema de tratamiento de gases es indispensables para un buen funcionamiento.

Para el tratamiento de los gases, se utilizan filtros de carbón activado, los cuales preferentemente se instalan en serie para remover los COV y asegurar que el tratamiento de los gases sea continuo. Esto se verifica monitoreando los puntos colocados entre los filtros.

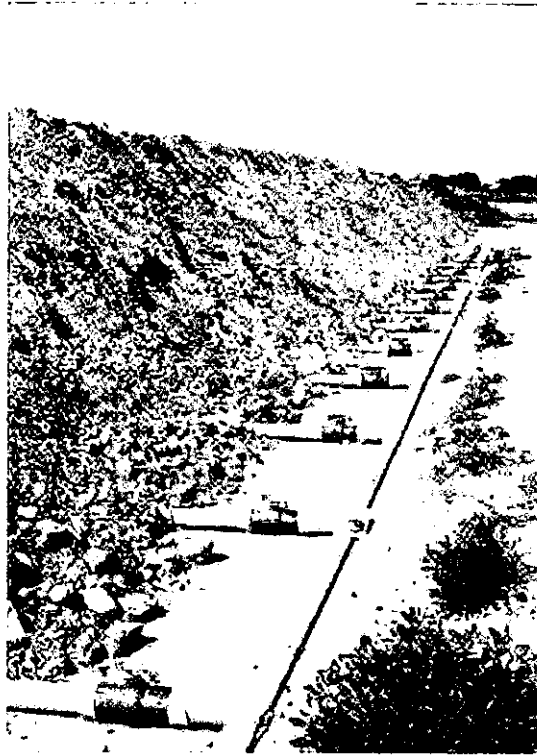


Figura 7.3 Ubicación de las válvulas

Si el tratamiento de gases no es necesario, el sistema de aireación opera sin el sistema de carbón activado y, en este caso es necesario que la pila este cubierta adecuadamente.

El diámetro de los tubos de aireación varía de 2" a 4" (5.1 a 10.2 cm) la distancia entre los tubos o ramales varía de 3 a 5 metros y su longitud depende del tamaño de la biopila. Los ramales constan de cuatro partes fundamentales: la válvula, el tubo liso, la unión y el tubo flexible ranurado.

La válvula regula el flujo del aire que entra por los ramales, el tubo liso se une a la válvula y por lo general tienen una longitud de 3 m. La unión entre el tubo liso y el flexible es de hule y su instalación es importante ya que una mala colocación puede ocasionar pérdida en la eficiencia del funcionamiento de la

bomba. Por último la longitud del tubo flexible ranurado depende del tamaño de la biopila. En la figura 7.4 se observa la configuración del sistema

El flujo de aire a través de la pila, independientemente si opera por inyección o extracción, se genera utilizando una bomba o compresor. La bomba o compresor debe colocarse sobre una base de concreto. Los requerimientos de voltaje de electricidad son de 110/220V, pero esto depende de las especificaciones del fabricante del aireador. Para asegurar un mejor funcionamiento se recomienda proteger los equipos de bombeo contra las inclemencias del clima.

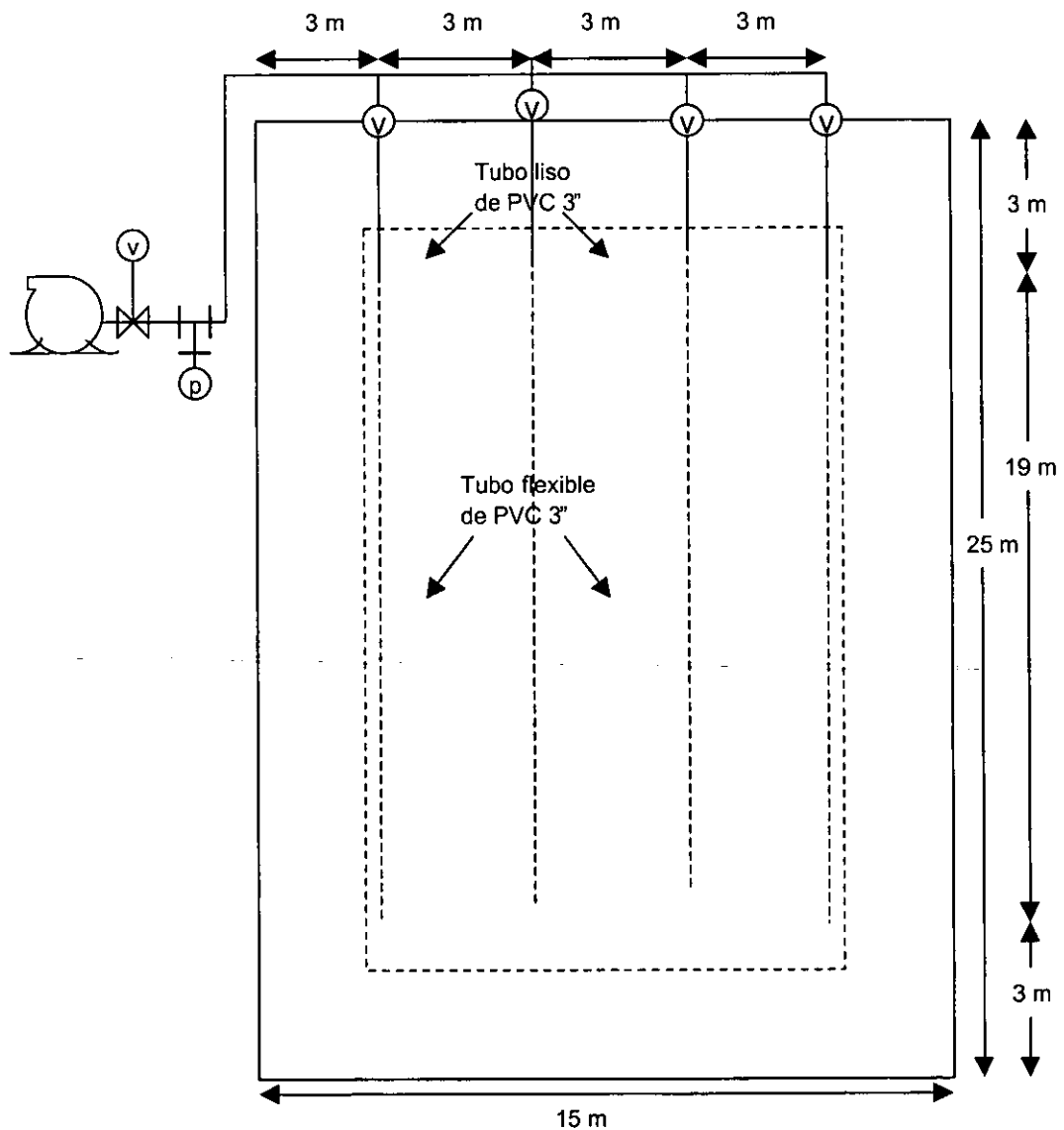


Figura 7.4 configuración de la biopila 500 m³.

En la TAD de Acapulco se construirán pilas de diferentes tamaños una de 500 m³ (15x25x1.5 metros) y otra de 800 m³ (19x31x1.5 metros). Para la pila de 500 m³ se requieren 4 ramales formados por una sección de tubo liso y otra de tubo flexible (figura 7.4), la longitud del tubo flexible es de 19 m y la del tubo liso de 3 m. El diámetro de los tubos es de 3" y la válvula es del mismo diámetro.

Para la pila de 800 m³ se requieren 5 ramales como se observa en la figura 7.5, la longitud del tubo flexible es de 25 m y la del tubo liso de 3 m. El diámetro de los tubos es de 3" y la válvula es del mismo diámetro.

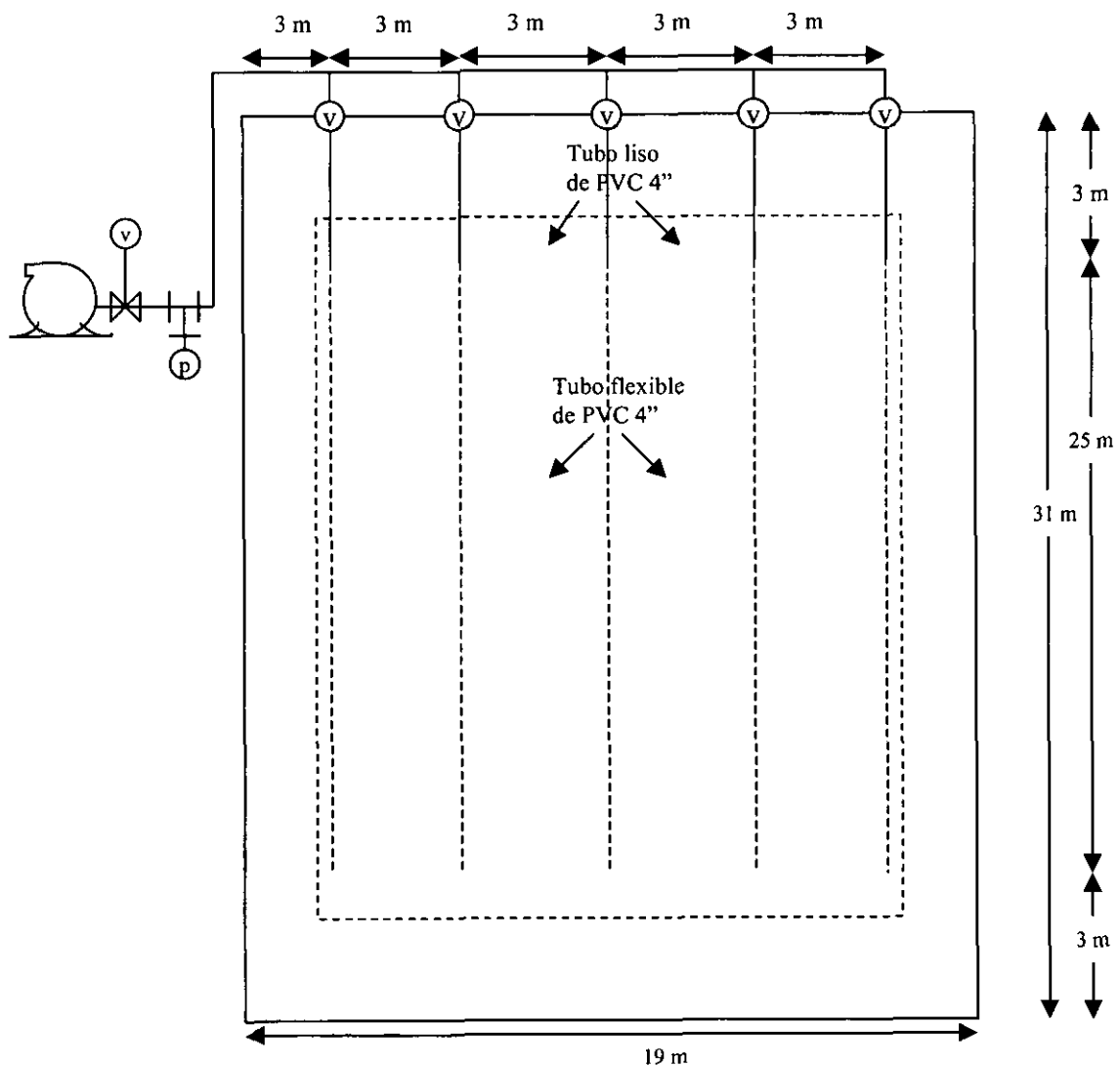


Figura 7.5 Configuración de la pila 800 m³

El sistema de aireación que se empleará para la aireación de ambas pilas será por inyección de aire, por lo que el tratamiento de gases no es necesario.

Para evitar que los orificios de los tubos flexibles se tapen o bloqueen, los tubos se cubren con una cama de 30 cm con grava de 1", evitando que las partículas finas del suelo tapen los orificios y permitiendo una buena circulación del aire a través de la pila.

Para determinar la capacidad de la bomba, y verificar si el diámetro y la separación de los tubos son correctos, se utilizó el programa PILEFLOW, desarrollado por Calvin A. Kodres U.S. Naval Facilities Engineering Service Center en 1996.

El programa tiene tres parámetros principales:

- 1) Flujo de aire a través de pila.
- 2) Presión del soplador.
- 3) Permeabilidad intrínseca del suelo.

El programa ocupa estos parámetros para dimensionar la pila y para diseñar y evaluar el sistema de aireación es decir:

- 1) Si ya se tiene un sistema de aireación, el programa se utiliza para determinar la forma y dimensiones de la pila, para la cual es adecuado el sistema de aireación.
- 2) Si se tiene el tamaño de la pila, con el programa se diseña el sistema de aireación y selecciona la bomba o compresor. (Como es el caso de la TAD de Acapulco)
- 3) Si la pila se encuentra operando, con el programa se puede evaluar el comportamiento del sistema de aireación.
- 4) Se puede determinar con el programa, la permeabilidad del suelo en la pila y con ello diseñar sistemas de aireación óptimos para futuras biopilas.

Para utilizar el programa, se requieren los siguientes valores:

- Ancho de la parte superior de la pila.
- Ancho de la parte inferior de la pila.
- Altura de la pila
- Distancia entre ramales

- Longitud del tubo flexible perforado.
- Número total de ramales.
- Diámetro de los tubos.
- Permeabilidad intrínseca (en Darcy)
- Porosidad
- Saturación residual (capacidad de campo)
- Saturación actual (contenido de agua)
- Presión de la bomba en pulgadas de agua.
- Temperatura ambiente en grados Fahrenheit.

Los datos de las pilas se agrupan en la tabla 7.1

Tabla 7.1 Datos requeridos para el programa Pileflow

Volumen	500 m ³	800 m ³
Altura	1.5 m (5 ft)	1.5 m (5 ft)
Dimensión de la parte inferior paralela a los tubos de aireación.	22.75 m (74.64 ft)	28.75 m (95.83 ft)
Dimensión de la parte superior paralela a los tubos de aireación	25 m (82.02 ft)	31 (103.33 ft)
Distancia entre ramales	3 m (10ft)	3 m (10 ft-)
Longitud perforada de los tubos	19 m (62.34 ft)	25 m (83.33 ft)
Espesor de la cama de grava	0.45 m (1.5 ft)	0.45 m (1.5 ft)
Número de tubos	4	5
Diámetro de los tubos	3"	4"
Temperatura ambiente	25°C (77°F)	25°C (77°F)
Porosidad del suelo	39.1%	39.1%
Capacidad de campo	30%	30%
Contenido de humedad	20.5 %	20.5 %
permeabilidad	0.1 cm/seg (104 Darcy)	0.1 cm/seg (104 Darcy)

El programa calcula las presiones y velocidades con la profundidad de la pila. Otros datos que el programa proporciona son el flujo de aire en la parte superior de la pila, el flujo de aire en los lados o bordes de la pila, y el flujo de aire de la bomba. En el anexo 1 se encuentran los resultados de la corrida del sistema de aireación. En el anexo 2 se encuentra la tabla de conversión de unidades para la permeabilidad.

Con el flujo de aire en ft^3/min que se calcula con el programa, se selecciona la bomba o soplador, para esto es necesario consultar las gráficas de eficiencia que proporciona cada fabricante. La tabla 7.2 contiene las especificaciones de las bombas seleccionadas para las biopilas de 500 m^3 y 800 m^3 .

Tabla 7.2 Especificaciones de las bombas.

Volumen		500 m^3	800 m^3
Flujo requerido	Calculado	253.83 scfm	394.1693 scfm
	Programa	254.254 scfm	393.81 scfm
Flujo de la bomba		300 scfm	400 scfm
Modelo		DR707K9X	DR8AY72W
No. de parte		036794	036871
Tipo de motor		TEFC	TEFC
HP		3	7.5
Voltaje		115/230	230/460
Frecuencia		60 Hz	60 Hz
Peso		63 kg	120 kg
Fase		3	3
Máxima presión (in H_2O)		55	106
Flujo mínimo		245 scfm	230 scfm

Es importante mencionar que puede elegirse cualquier marca para las bombas siempre y cuando cumpla con los flujos requeridos y que sus especificaciones de operación puedan cumplirse. En este caso se utilizaron bombas de la marca EG&G Rotron, Saugerties, N.Y. En el anexo 3 se presentan las gráficas de eficiencia para estas dos bombas

7.4 Sistema de recolección de lixiviados

La pila se diseña para que la generación de lixiviados sea mínima, por lo que la construcción de un sistema recolector de lixiviados no es necesario, a menos que las condiciones lo requieran. Los lixiviados se recolectan utilizando zanjas o canales.

Sin embargo, cuando es necesario el sistema recolector, éste se construye siguiendo la pendiente de la base y utilizando tubos de PVC de 2" de diámetro que conduzcan los lixiviados hacia las zanjas, éstas deben estar cubiertas por una capa impermeable.

El sistema recolector requiere de una bomba para transferir los lixiviados de la zanja, al tanque de almacenamiento. El tamaño del tanque varía con el volumen de suelo a tratar, pero por lo general varía entre 1800 y 5600 L (500 a 1500 gal).

Los drenes pueden construirse excavando y formando zanjas con anchos de 0.20 a 0.30 m, para que el flujo pueda escurrir con una pendiente similar a la de la base 2% y un borde libre de 0.30 m (Crezpo, 1991). La práctica usual en México es construir zanjas en forma de "V" con un tirante de 30 a 60 cm, talud de 1:3 y con la misma pendiente del terreno. Para evitar deslaves las zanjas se cubren con mortero de cemento en proporción 1:8. En los canales debe evitarse tener velocidades de 0.60 m/s o mayores, ya que provocan que el material que cubre las zanjas se deslave. Tabla 7.3

Tabla 7.3 Velocidad de deslaves (Crezpo, 1991).

Material	Velocidad
Arena	0.60 a 0.90 m/s
Limo	0.60 a 1.10 m/s
Grava	1.50 a 1.80 m/s

El sistema de recolección de lixiviados puede requerirse en sitios con fuertes vientos, debido a que los vientos extremadamente fuertes dañan la cubierta de la pila y el agua de lluvia al saturar el suelo de la pila produce una lixiviación en exceso. Cuando el sistema colector de lixiviados y el sistema de irrigación de la biopila se instalan, los lixiviados pueden reciclarse para irrigar nuevamente a la biopila.

En la TAD de Acapulco, para el sistema recolector de lixiviados se construirán zanjas o canales alrededor de la pila con una base de arcillas compactas y una pendiente del 2%, las paredes del canal se cubrirán con mortero para evitar deslaves. La profundidad de la zanja será de 20 cm y el ancho de 30 cm.

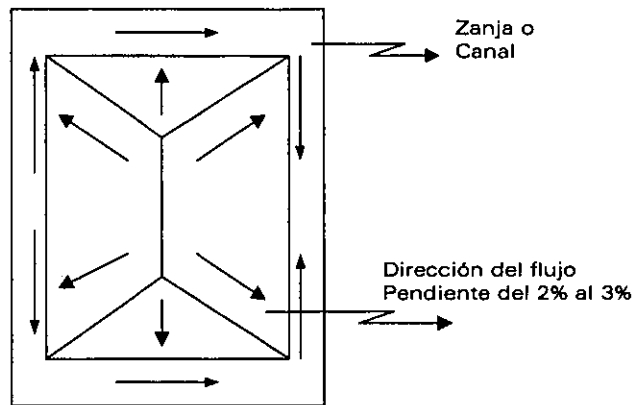


Figura 7.6 Dirección del flujo de lixiviados.

El agua de las zanjas se conducirá hacia fuera del área de tratamiento siguiendo las direcciones del flujo (Figura 7.6).

El agua recolectada puede reutilizarse, debido a que contienen nutrientes (en bajas concentraciones) que no se absorbieron. También pueden descargarse hacia el alcantarillado, verificando si cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. La reutilización dependerá de los requerimientos de humedad, nutrientes y del volumen de lixiviados recolectados.

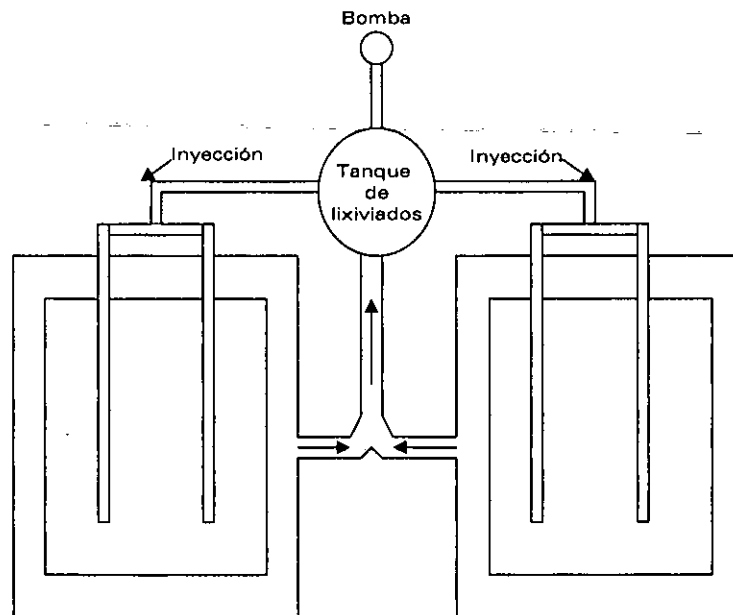


Figura 7.7 Reutilización de los lixiviados

Para la TAD de Acapulco se proyectaron las dos posibilidades, reutilizar y descargar el agua al alcantarillado, para ello es necesario un tanque, para almacenar los lixiviados que se reutilizarán. (figuras 7.7 y 7.8).

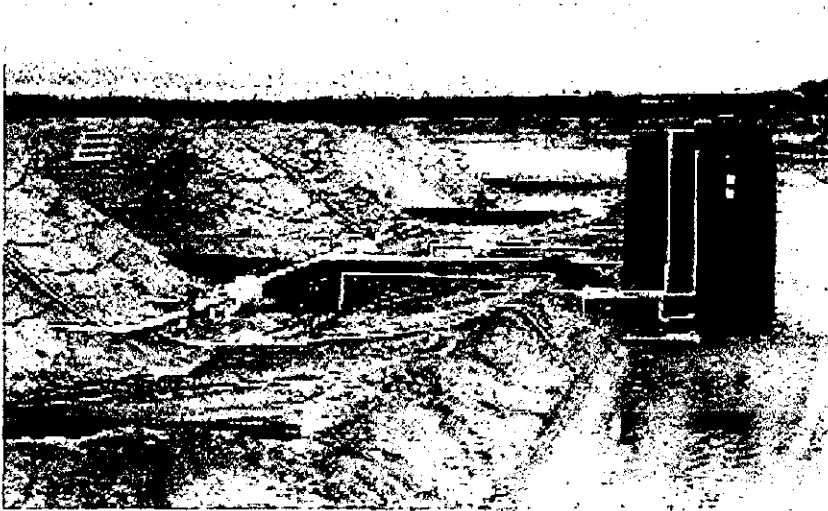


Figura 7.8 Sistema de bombeo de lixiviados

7.5 Adición de nutrientes.

Los nutrientes (fósforo, nitrógeno, potasio) se venden comercialmente como fertilizantes. Los nutrientes pueden añadirse disueltos en agua, rociarse sobre el suelo o mezclarse en forma sólida durante la operación.

Si el suelo no requiere pretratamiento, los nutrientes pueden añadirse durante la construcción de la pila, si se añaden en forma de solución se procura que el suelo absorba los nutrientes lo más que se pueda para evitar lixiviaciones o escurrimientos. Para los suelos con baja absorción, la adición de nutrientes en forma seca resulta más efectiva.

El contenido de nutrientes se controla calculando los requerimientos para las condiciones y tipo de suelo. Cuando los nutrientes se aplican en forma de solución se utiliza el sistema de irrigación para la adición de humedad, o mediante un sistema de aspersión.

Cuando los nutrientes se aplican en estado seco, esto se hace utilizando cucharones o palas.

Los nutrientes puede agregarse antes o después de la construcción de la pila, si se agregan cuando la pila empieza a formarse, pueden mezclarse en estado sólido con el suelo, o en solución, irrigando el suelo con una solución de nutrientes disueltos.

En la TAD de Acapulco se requiere nitrógeno en mayor cantidad que fósforo. El nitrógeno se aplicará en forma de urea, la urea contiene 46% de nitrógeno. La cantidad requerida es 1,814.76 mg de urea/kg de suelo es decir 4.75 kg de urea/ m³ de suelo y se aplicará en solución disolviendo los 4.75 kg de urea en 297.07 L de agua. Por su parte el fósforo se aplicará en forma de superfosfato (Ca(H₂PO₄)) que contiene 27% de fósforo, la cantidad requerida es 95.93 mg superfosfato/kg de suelo, es decir 0.2516 kg Ca(H₂PO₄)/m³ suelo.

La adición de agua y nutrientes será de manera simultánea, durante la construcción de la pila, colocando una capa de suelo de aproximadamente 20 cm, para posteriormente adicionar el agua y nutrientes y así sucesivamente hasta que se complete la altura final de la pila (1.5 m), de esta forma se asegura que todo el suelo que forma la biopila se impregne de la solución y que los nutrientes se absorban con mayor rapidez.

7.6 Adición de agua.

El contenido de agua en la pila (70% a 95% de la capacidad de campo) es uno de los factores críticos para una biodegradación exitosa de los contaminantes. En climas cálidos las biopilas pierden entre el 1% y 2% de su contenido de agua dependiendo de la temperatura ambiente

Si el suelo cuenta con un contenido de humedad óptimo antes de construir la pila, el sistema de hidratación no será necesario.

El agua puede agregarse de tres formas:

- Durante el almacenamiento del suelo (antes de la construcción de la pila)
- Durante la construcción de la pila (como es el caso de la TAD de Acapulco).
- Después de la construcción de la pila por medio de un sistema de irrigación ubicado en la parte superior de la biopila, este mismo sistema puede utilizarse para agregar los nutrientes. (Figura 7.9 y 7.10)

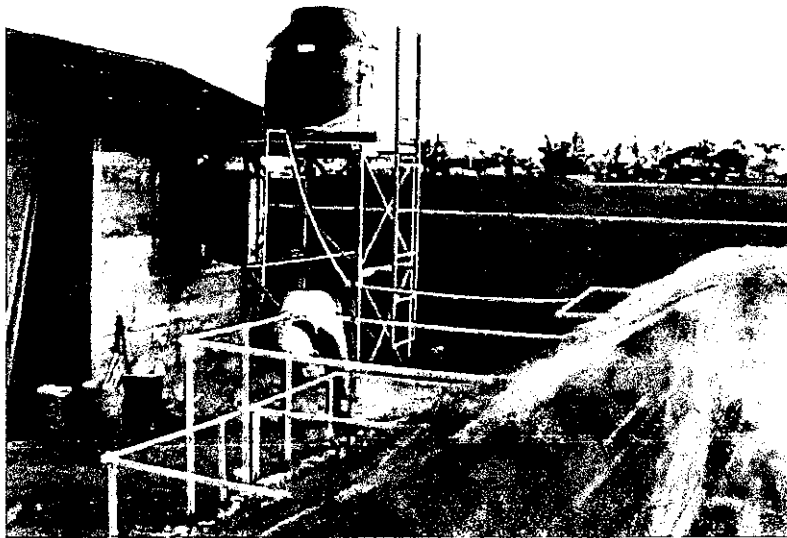


Figura 7.9 Sistema de irrigación

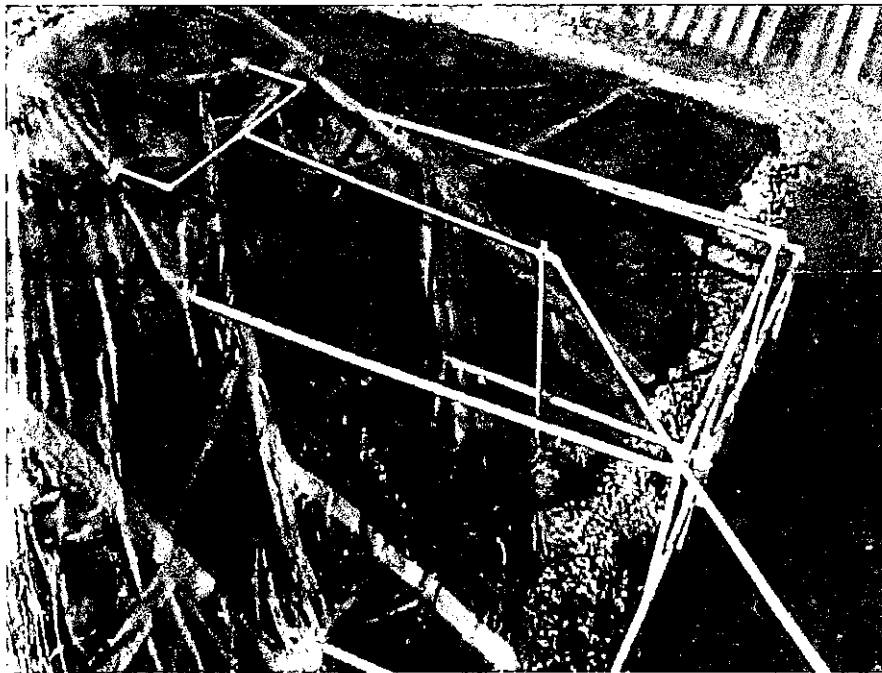


Figura 7.10 Vista en planta del sistema de irrigación

Agregar el agua cuando la pila se empieza a construir puede ser un método muy efectivo, pues se asegura que el agua penetre en todo el suelo que formará la biopila. Si el suelo se prepara antes de formar la pila, el agua se

agrega por lotes de suelo procesado, permitiendo que el agua penetre en todo el suelo.

El contenido óptimo de agua sostenida o capacidad de campo, varía entre el 70% y 95%. Para la determinación de la capacidad de campo en este estudio se empleó la técnica del manual de laboratorio para el manejo físico de suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo (Anexo 4)

En la mayoría de los sitios no es necesario hidratar el suelo antes de la construcción de la pila. Por lo general después que la pila se ha formado, se agrega el agua, utilizando un sistema de irrigación. Para evitar encharcamiento y escurrimiento del agua en exceso, se recomienda utilizar el sistema de goteo en línea o sistema de aspersión ya que se diseñan para que el agua atraviese la pila con un mínimo de escurrimiento (Means and Porcher, 1996) Una vez que la pila alcanza el contenido de agua deseado, el sistema de irrigación se cierra por medio de válvulas y se abren nuevamente cuando sea necesario agregar agua.

El sistema de irrigación por goteo tiene cuatro ventajas:

- Es un método efectivo para agregar agua a la biopila después de que se ha construido.
- Se minimiza el escurrimiento del agua en la biopila.
- El sistema puede operarse sin supervisión.
- La irrigación puede alcanzar una buena distribución.

Y tiene las siguientes desventajas.

- El costo inicial es alto.
- Si el tubo se rompe puede causar un encharcamiento.
- Se requiere de instalaciones especiales

El contenido de agua en las biopilas de la TAD Acapulco, se agregará durante la construcción de la pila, debido a que es una de las formas más efectivas y menos costosa y para asegurarse que todo el suelo se hidrate de forma homogénea.

7.7 Formación de la biopila.

La construcción o formación de la pila consiste en los siguientes pasos.

- a) Limpiar el área de construcción. La base debe tener una pendiente que permita drenar y coleccionar el agua de lluvia.
- b) Excavar el suelo contaminado. (para la TAD de Acapulco, se excavará hasta 2.48 m)
- c) Cargar los camiones de volteo con el suelo contaminado
- d) Trasladar el suelo contaminado hasta el sitio donde se construirán las pilas
- e) Descargar el suelo contaminado
- f) Construcción de la base de la pila con una pendiente del 2%
- g) Construcción de las zanjas de tierra, alrededor de la pila para prevenir el deslave de la biopila y la infiltración de los lixiviados, si la zanja se construye con tierra, esta debe cubrirse con una capa de polietileno o plástico grueso para protegerla de la erosión.
- h) Formación de la pila en capas y adición de nutrientes
- i) Antes de la construcción de la pila se instala el sistema de aireación con todos sus accesorios.
- j) Colocación de la cubierta.
- k) Conexión de la tubería de aireación al equipo
- l) Muestreo de la biopila cada semana durante 1 mes y después de este período 1 vez al mes

La dificultad de la excavación del material contaminado, depende del tipo de material es decir si es un suelo blando o duro.

El equipo requerido para la construcción de la biopila puede ser un cargador frontal, un trascavo y camiones de volteo para el movimiento de tierras. Figura

7.11

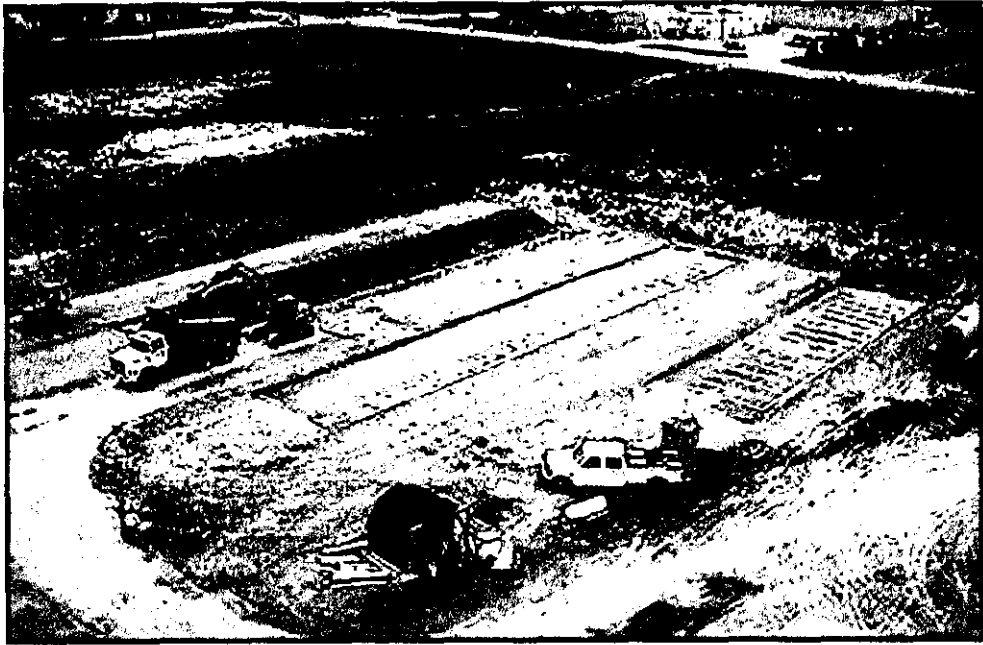


Figura 7.11 Formación de la pila y equipo necesario

El cargador frontal o trascavo se emplea para excavar y transportar el material de un sitio a otro. También puede emplearse una retroexcavadora.

Para el movimiento de tierras a corta distancia se emplean hojas topadoras que trasladan el suelo hasta una distancia de 120 m. Para el caso de distancias mayores a 120 m se utilizan volquetes de autodescarga que requieren trabajar conjuntamente con máquinas cargadoras, como cargadores frontales, palas mecánicas, entre otras. (Lambe and Whitman, 1991)

En la TAD de Acapulco la distancia entre el suelo contaminado y el sitio de saneamiento es aproximadamente de 240 m, por lo que será necesario utilizar camiones de volteo.

En la TAD de Acapulco las pilas se formarán colocando capas de suelo de aproximadamente 0.30 m de espesor y agregando agua con los nutrientes disueltos hasta alcanzar la altura deseada de 1.5 m. Las capas se colocarán de atrás hacia delante, empezando de un lado y moviéndose hacia el otro hasta la altura deseada. La parte trasera se considera el lado donde se ubica el sistema de aireación y el frente se refiere al lado opuesto. Es importante mencionar que sobre el frente no deberá pasar el cargador sin previamente compactar el suelo, para no dañar los tubos de aireación y los canales o zanjas. Del lado

opuesto del sistema de aireación puede removerse el tubo o ramal principal para que el cargador no pase directamente sobre él. Otra alternativa, es construir una rampa temporal para que el cargador pase sobre la zanja o canal sin dañarlos.

Para la formación de la pila es importante determinar el ángulo de reposo o inclinación que tiene el suelo (figura 7.12) para evitar que la pila se destruya o desmorone. Este ángulo depende principalmente de la compacidad, granulometría, densidad y porosidad del suelo. El valor del ángulo se incrementa con un incremento en la angularidad del grano. Su valor varía entre 29° y 48°. Si se trabaja con arenas se recomienda estimar el valor del ángulo a 30° si su compacidad es baja y 35° si es alta. No siempre aumenta la estabilidad del talud a medida que se reduce la pendiente, por lo tanto es común encontrar que un talud de 0.5:1 sea más inestable que uno de 0.25:1 ó aún más que el perfectamente vertical. En la tabla 7.4 se observan los ángulos de inclinación adecuados para cada tipo de suelo (Lambe and Whitman, 1991).

Tabla 7.4 Ángulos de inclinación (Lambe *et al*, 1991)

Clasificación	Ángulo de talud natural	
	Inclinación(°)	Talud (vert. a hor.)
Limo (no plástico)	26 a 30	1:2 a 1:1.75
Arena uniforme fina o media	26 a 30	1:2 a 1:1.75
Arena bien Graduada	30 a 34	1:1.75 a 1:1.50
Arena y Grava	32 a 36	1:1.60 a 1:1.40



Figura 7.12 Ángulo de reposo o inclinación del suelo

El talud con la que se construirán las biopilas en la TAD de Acapulco es 1:1.25. De acuerdo con la granulometría del suelo, se tiene una arena uniforme de fina a media y según la tabla 7.4, el talud recomendado es de 1:2 a 1:1.75 (vert-hor) con una variación de ángulos de 26° a 30° por lo que se considera que el talud es apropiado. También se puede determinar el ángulo en campo, aunque la prueba no es muy precisa, ya que es muy difícil obtener muestras de una arena sin variar su porosidad.

La parte superior de la pila debe ser lo más plano posible para evitar la acumulación del agua de lluvia.

Cuando el suelo se empieza a apilar sobre la base, el operador del cargador frontal dejará un espacio de 0.30 a 0.60 m entre la pila del suelo y la zanja para evitar que el suelo de la pila se derrumbe sobre la zanja.

La cubierta debe ser de plástico impermeable, aproximadamente de 1.2 a 2.0 mm de ancho y lo suficientemente resistente para evitar que se dañe por los efectos del viento, clima y por la operación de los equipos mecánicos. (Fahnestock and Wicramanayake, 1998). La cubierta preferentemente debe ser negra porque absorbe el calor y mantiene la temperatura óptima, el blanco es el menos preferido. Pero en climas cálidos el color es indistinto, e incluso la cubierta puede ser no necesaria. (Figura 7.13)

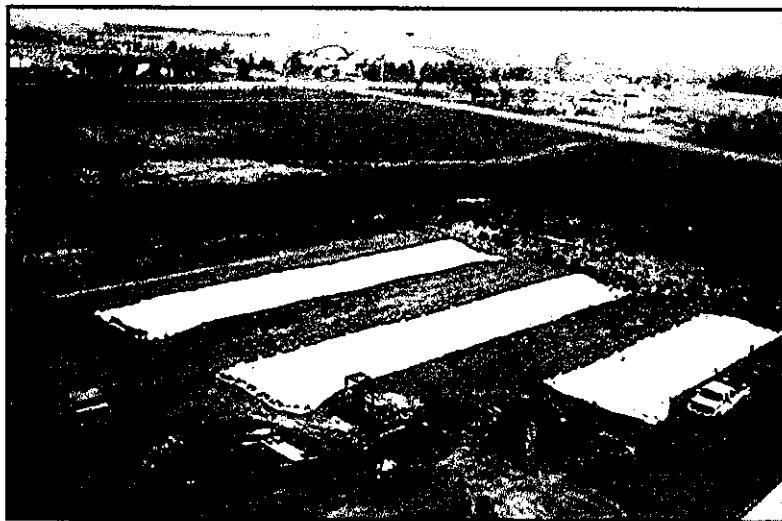


Figura 7.13 Instalación de la cubierta (EPA, Office of uderground storage tanks, 1994)

Antes de cubrir la pila deberá asegurarse que los puntos de monitoreo se encuentren localizados y señalados perfectamente para que las muestras sean fáciles de tomar (Fahnestock and Wicramanayake, 1998). Todo tipo de objetos filosos o cortantes como alambres, varillas o rocas angulosas, deberán retirarse de la pila para evitar cualquier rasgadura a la cubierta durante su instalación y se verificará que no exista ninguna perforación por pequeña que sea, ya que permitirá que el agua de lluvia penetre a la pila y provoque problemas con los lixiviados.

Una vez que la cubierta se coloca y se extiende sobre los cuatro lados, se asegura en las vigas de madera que forman el marco de contención a manera de sandwich (Fahnestock and Wicramanayake, 1998). (Figura 7.14)

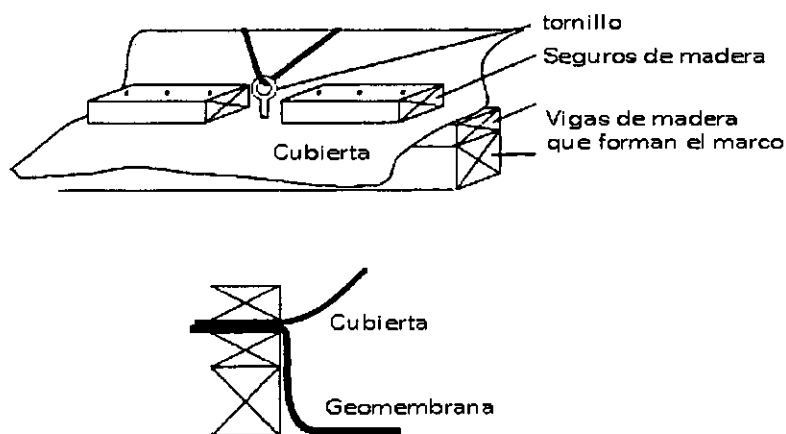


Figura 7.14 fijación de la cubierta

La cubierta debe extenderse perfectamente para evitar que se dañe por los fuertes vientos que puedan existir. Para esto, se ata la cubierta con cuerdas de plástico que crucen toda la superficie de la pila en forma de "V" (Figura 7.15).

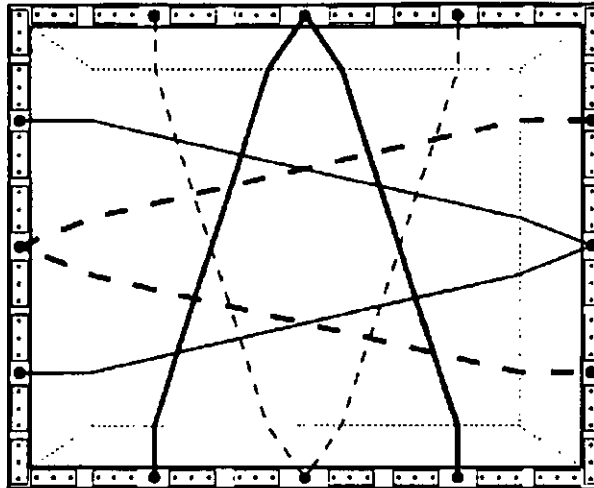


Figura 7.15 Amarres de la cubierta

Terminada la biopila se realiza el muestreo para establecer las condiciones iniciales de operación, midiendo la actividad microbiana mediante la degradación de los HTP, así como la variación del contenido de humedad durante el tratamiento. El muestreo debe realizarse en el suelo y en los vapores generados (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Las muestras de suelo se toman utilizando un muestreador manual, se recomienda tomar una muestra por cada 76.5 m^3 (100 yd^3), pero si los contaminantes y las propiedades del suelo se desconocen, deberá tomarse una muestra por cada 38.2 m^3 (50 yd^3). Las muestras de suelo se transportan al laboratorio para analizarlas y determinar la concentración inicial de HTP, BTEX, contenido de humedad, pH, densidad microbiana y concentración de metales (si no son previamente conocidos) (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

El muestreo de vapores se realiza succionando el gas en los puntos de muestreo colocados durante la construcción de la pila. (Figura 7.16)



Figura 7.16 Puntos de muestreo

El muestreo del suelo evalúa la efectividad del sistema de aireación y mide la actividad microbiana mediante las pruebas de respirometría, ya que la concentración relativa del O_2 indica una buena aireación. Una concentración de oxígeno entre 15 y 20% indican un flujo de aire suficiente. La prueba de respirometría determina la actividad microbiana, la cual se relaciona con los índices de degradación de los HTP midiendo el decrecimiento de la concentración de O_2 y el incremento en la concentración de CO_2 . Mientras mayor sea el decrecimiento de O_2 mayor actividad microbiana existirá, porque los microorganismos aerobios requieren de O_2 para degradar los HTP y la cantidad de O_2 consumido por unidad de tiempo se relaciona con la degradación de los HTP (Fahnestock and Wicramanayake, 1998).

Capítulo 8

Operación y Mantenimiento

La tecnología de biopilas requiere de un período de operación y mantenimiento antes de alcanzar los niveles de limpieza establecidos. La biopila puede operar hasta 6 meses sin requerir mantenimiento, después de este período es necesario elaborar un programa de mantenimiento para asegurar una buena calidad en el proceso, seguridad y costos efectivos.

8.1 Operación

Antes de iniciar la operación del proceso la autoridad correspondiente (PROFEPA, en México) debe conocer los volúmenes de suelo a tratar, así como el tipo de contaminante y concentración. Para esto, se elabora el plan de manejo y operación del suelo contaminado y tratado, así como una bitácora para trabajar de forma ordenada y minimizar el tiempo de almacenamiento del suelo, para que el nuevo lote de suelo contaminado se coloque inmediatamente después de remover el lote que ya ha sido tratado, sin embargo deberá existir una holgura en todo el proceso para amortiguar los imprevistos que puedan presentarse, los cuales pueden deberse a una variación en el índice de la biodegradación, cambio en las condiciones climáticas, retrasos en los resultados de los análisis del suelo, o resultados que indiquen que no se han podido alcanzar las concentraciones deseadas. Es importante mencionar que estos factores incrementan la incertidumbre en la planeación del proceso.

Una vez instalada la biopila, ésta operará de manera flexible haciendo óptima la destrucción biológica de los contaminantes y disminuyendo la evaporación de los compuestos volátiles. Es importante mantener un monitoreo periódico para medir el comportamiento del sistema y ajustarlo cuando sea necesario. Para facilitar esta tarea, puede apoyarse en el formato 3 (anexo 5), que contiene los aspectos que debe inspeccionarse en el sistema de biopilas (Fahnestock and Wickramanayake, 1998)

8.1.1 Manejo Operacional

El primer paso en la operación de la biopila es verificar el sistema de arranque con pruebas piloto, es deseable que todas las partes que integran el sistema se verifiquen por separado. Ésto puede realizarse de forma más eficiente utilizando las formas 1 y 2 (anexo 5) que son una guía para el sistema de arranque de la biopila.

La inspección inicial y las pruebas de arranque se realizan para asegurar que todos los componentes del sistema de las biopilas han sido instalados correctamente y su operación es apropiada.

En las formas se registra la fecha, nombre del técnico, temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica así como la inspección visual de las zanjas, cubierta, amarres, bombas, tubos de drenaje, etc. (Fahnestock and Wickramanayake, 1998). Los instrumentos deben estandarizarse para las condiciones de campo.

También deberá asegurarse que la entrada y salida de las líneas del aireador no se encuentren obstruidas pues operar el aireador con un escaso flujo provoca que el sistema requiera una mayor demanda en la presión del aireador. El flujo de aire se ajusta *a priori* de la siguiente manera (EPA, 1994):

1. Abrir completamente las válvulas de control para cada uno de los ramales.
2. Encender el aireador y lentamente ajustar el flujo de aire en cada ramal de tal forma que exista el mismo flujo en cada uno de ellos

El flujo de todos los ramales debe mantenerse dentro de los intervalos establecidos en el diseño. Cuando uno de los ramales posea mayor flujo, éste se ajusta para no alterar el sistema.

Para evitar errores de lectura se toma el promedio de tres lecturas como el flujo del ramal principal, la discrepancia que existe entre las lecturas se debe a la baja presión en los ramales. Una vez calibrado el flujo en los ramales, el aireador se apaga y el suelo que formará la pila se coloca sobre los ramales, después, se prende nuevamente el aireador y se leen las concentraciones de O₂ en cada uno de los puntos de muestreo. El monitoreo deberá ser continuo hasta que la concentración en cada punto sea estable, cuando se logra esto,

las válvulas de control se ajustan para tener 15% de la concentración de O₂ en cada punto de monitoreo (Fahnestock and Wickramanayake, 1998)

Los requerimientos de operación para el tratamiento de los gases, dependen del tipo de contaminantes y del cumplimiento de las normas correspondientes, así como de las recomendaciones del fabricante de los equipos de control utilizados.

8.1.2 Sistemas de Control

El operador verificará cualquier tipo de ruido u olor inusual dentro del área de tratamiento, un ruido en el sistema de aireación puede indicar que existe agua en el sistema u otra condición indeseable. Los olores también indican que la biopila no se encuentra aireada de forma adecuada.

Con la inspección semanal del sistema de drenaje se verifica que el efluente cumpla con las normas correspondientes complementándose con una inspección exhaustiva realizada cada mes (Fahnestock and Wickramanayake, 1998), esto se realiza de forma más eficiente utilizando en la forma 5 (anexo 5).

De acuerdo con el estado de Wisconsin, la inspección incluye las siguientes actividades:

- Anotar fecha y hora de las mediciones, número de la muestra, nombre de quien tomó la muestra y temperatura ambiente.
- Medir las concentraciones de O₂, CO₂, HTP y temperatura en cada punto
- Medir el flujo de aire a la entrada de los ramales y registrarlo.
- Medir el flujo de aire a la salida de los ramales y registrarlo.
- Medir el flujo de aire y la presión en cada ramal y registrarlo.
- Realizar las pruebas de respirometría.

Si los registros mensuales indican que la concentración de O₂ en los ramales de aireación se encuentran entre el 5% y 8%, el flujo deberá incrementarse, si por el contrario la concentración O₂ en los ramales de aireación es del 20%, el flujo deberá decrecerse, el objetivo es que la concentración de O₂ durante al operación de la biopila se encuentre entre el 15% y 20% (State of Wisconsin, 1996)

8.1.3 Prevención de derrames y contingencias.

La operación de la biopila puede generar pequeñas cantidades de solución acuosa debido a la lixiviación de la solución que contiene a los nutrientes. Para reducir este riesgo, en la forma 4 (anexo 5), se describen las recomendaciones y controles para prevenir un derrame accidental.

8.2 Mantenimiento

La operación de la biopila es simple y confiable pero no inmune al uso y desgaste, a continuación se describe el mantenimiento necesario para asegurar una operación continua.

8.2.1 Ajuste del flujo aire

El flujo de aire en ocasiones se desarrolla principalmente en los bordes de la biopila, esta condición se llama "*corto circuito*" y causa una inadecuada aireación en el centro de la pila por lo que deberá corregirse, ésta se presenta cuando (Reisinger and Mountain, 1998):

- La presión en los puntos de monitoreo cerca de los bordes laterales de la biopila son más bajos que en los bordes superiores de la biopila.
- El contenido de oxígeno en los puntos de monitoreo cerca de los bordes es más alto que el de los puntos localizados a la misma profundidad pero en el centro de la pila

La condición de "*corto circuito*" puede corregirse agregando una capa de suelo limpio alrededor de los bordes de la pila y compactándolo suavemente, o ajustando la aireación de los ramales por medio de válvulas, reduciendo el flujo de aire que penetra a la pila.

8.2.2 Mantenimiento de los equipos y accesorios

Cubierta

Las perforaciones en la cubierta de la pila pueden causar un exceso de humedad debido a la precipitación pluvial. La EPA recomienda que los daños en la cubierta pueden repararse, si las perforaciones son pequeñas, de lo

contrario deberá remplazarse por una nueva. Si la cubierta es de geomembrana, puede recubrirse (parcharse) sin ningún problema, para ello el área a reparar deberá estar libre de polvo y humedad.

Tuberías

Por medio de inspecciones visuales se pueden detectar los daños en las válvulas y en los tubos del sistema de aireación. Las perforaciones pequeñas en los tubos de plástico pueden repararse utilizando coples, sin embargo para daños mayores en tubos de plástico o metal se recomienda cambiar toda la pieza.

Aireador

Cuando existe una obstrucción en los ramales de aireación que no permitan el flujo del aire, éste deberá remplazarse, pues operar el aireador con los tubos bloqueados produce un cierre en la válvula y eventualmente un daño al aireador. Los ramales bloqueados se detectan (NFESC, 1998):

- Por medio de una observación visual o por la producción de un sonido inusual en el aireador.
- Disminución en la presión de vacío.
- Disminución en el flujo de aire.
- Disminución en la presión de salida del aireador.

Sistema de tratamiento de gases

El mantenimiento se realiza siguiendo las especificaciones del fabricante. Los contenedores de acero inoxidable llamados también "canísteres" que se comercializan comúnmente son recipientes de forma esférica o cilíndrica, dependiendo de la marca de fabricación, provistos de una válvula de aguja, y deben ser reemplazados después de haber cumplido su vida útil (Lopez, 1997).

8.3 Muestreo y Análisis

Los puntos de muestreo de la biopila se ubican dentro de un arreglo o malla cuadrada sobre la pila. Los parámetros que se analizan son: humedad, contenido de nutrientes, tipo de contaminante, concentración, presión inicial, temperatura, concentración de O₂, CO₂ y vapores de TPH.

Muestreo de suelos

El muestreo del suelo se realiza siguiendo la degradación del contaminante para verificar, si se han alcanzado los niveles de limpieza y para conocer la concentración del sistema.

Existe una gran variedad de métodos disponibles para el muestreo de suelos, sin embargo los muestreadores manuales son los más recomendados para las biopilas porque aseguran la integridad de la muestra minimizando las alteraciones de los COV y su distribución en el suelo. Para asegurar la calidad del muestreo, éste debe duplicarse cada 15 muestras.

El muestreo se realiza de la siguiente manera (Fahnestock and wickramanayake, 1998):

1. Trazar una malla dentro del área de muestreo e identificar los puntos de muestreo, como mínimo se recomienda tomar al menos una muestra por cada 75 m³.
2. Ensamblar el muestreador manual al tamaño deseado.
3. El muestreador se penetra aproximadamente hasta 0.3 metros.
4. Se desliza suavemente hacia adentro tratando de obtener una muestra del centro de la biopila.
5. Se extrae el muestreador.
6. Se remueve la cubierta de metal del muestreador y se extrae la muestra.
7. Se etiqueta la muestra con todos los datos necesarios, para ello puede utilizarse la forma 6 (anexo 5)
8. Se completa la cadena de custodia y se coloca la muestra en refrigeración. Para la cadena de custodia puede utilizarse la forma 7 (apéndice 5)
9. Se transportan las muestras al laboratorio.

Muestreo de gases.

El muestreo de gases se toma de los puntos de monitoreo instalados previamente.

Muestreo de lixiviados

El muestreo de lixiviados se realiza en garrafones o contenedores de vidrio limpios y lo primero que se analiza son los compuestos orgánicos volátiles.

La tabla 8.1 describe los parámetros de prueba para cada matriz y lista los métodos analíticos asociados para cada prueba.

Tabla 8.1 Parámetros para cada matriz y métodos analíticos (Fahnestock and wickramanayake, 1998).

Matriz	Característica	Análisis	Método	Objetivo
Suelo	físicas	Clasificación del suelo	ASTM D 2488	Determinar el tipo de suelo en base al Sistema de Clasificación de Suelo Unificado (USCS) basado en una observación visual.
		Distribución del tamaño de partícula	ASTM D 422	Determinación de la distribución del tamaño de las partículas, cribando muestras de suelo seco.
		Densidad	ASTM D 4531	Determinación del peso por unidad de volumen en muestras secadas al horno.
		Porosidad	ASTM D 2434	Se determina dividiendo su densidad entre la densidad de la partícula.
		Contenido de Humedad	ASTM D 2216	Determinación del peso del agua libre en porcentaje
		pH	EPA SW-846 Método 9045	Determinación del pH del suelo en un medio acuoso.
	Contaminación	Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP)	EPA SW-846 Método 3510 EPA método 503	Determinación de aceites y grasas por extracción de líquido. El análisis de los compuestos orgánicos volátiles se realiza por métodos gravimétricos y se analizan los hidrocarburos pesados incluyendo los asfaltos
	Nutrientes	Nitrógeno total Kjeldahl	EPA Método 351.4	Determinación del nitrógeno a través de la digestión
		Fósforo en todas sus formas.	EPA Método 365.2	Determinación de las formas específicas del fósforo.
		Potasio.	EPA Método 200.7/6010	Determinación del potasio a través de la digestión ácida
	Biológicos	Degradación de los hidrocarburos	Métodos Estándar	
Suelo	Contaminantes	HTP	EPA Método TO-3 modificado	Determinación de los microorganismos degradadores de hidrocarburos.
Gases	Biológico (respiración)	Oxígeno	Monitoreo en el sitio	Determinación de la concentración en porcentaje del oxígeno
		Dióxido de carbono	Monitoreo en el sitio	Determinación de la concentración en porcentaje del dióxido de carbono
lixiviados	Contaminantes	HTP	EPA SW-846 método 3510 EPA método 503	Determinación de aceites y grasas por extracción de líquido. El análisis de los compuestos orgánicos volátiles se realiza por métodos gravimétricos y se analizan los Hidrocarburos pesados incluyendo los asfaltos

Tabla 8.2 Cronograma de actividades para el muestreo (Reisinger and Mountain, 1998).

Muestreo	Intervalo
Muestreo de suelo	Durante la construcción de la pila y posteriormente cada dos semanas
Muestreo de gases	Al inicio, una semana después de empezar y después mensualmente.
Pruebas de respirometría	De 24 a 48 horas después de arrancado el aireador, una semana después y posteriormente cada mes
Muestreo en el aireador	Semanalmente y hasta que el suelo lo permita.

8.4 Clausura del Proyecto

Una vez tratado todo el suelo contaminado es necesario comprobar y documentar estadísticamente que los niveles de limpieza establecidos se han alcanzado.

Las pruebas de respirometría son el primer indicador para el monitoreo de la biopila. Los muestreos se realizan hasta alcanzar el 90% del nivel de limpieza establecido, lo cual es suficiente para demostrar estadísticamente la validez de los datos. El costo de los muestreos y análisis del suelo representan una partida importante en el costo total del tratamiento, por lo que los muestreos deberán ser los indispensables para obtener un costo efectivo.

Los resultados de la prueba de respirometría determinan cuando se debe tomar el último muestreo, pues indirectamente proporcionan los niveles de limpieza alcanzados, ya que a medida que avanza el proceso, los contaminantes se degradan y los índices de respiración microbiana decrecen (N. Y. Department of Environmental, 1998). Cuando la tasa de respiración en el suelo contaminado es cero, los niveles de limpieza se han alcanzado y se toma el último muestreo. Otros factores como el bajo contenido de humedad, mala distribución en el flujo de aire, contenido insuficiente de nutrientes y baja temperatura reducen la concentración de los contaminantes y decrecen la tasa de respiración microbiana.

La tasa de respiración decrece a medida que la concentración de los contaminantes disminuye y se aproxima a los niveles de limpieza establecidos

de 500 a 2,000 mg/kg para la TAD de Acapulco 2000 mg/kg (PROFEPA, 1999). Si la tasa de respiración se aproxima a cero, pero los análisis demuestran que las concentraciones no han alcanzado los niveles de limpieza, el proceso deberá analizarse y corregirse.

La causa más probable de los bajos índices de biodegradación es el bajo contenido de humedad.

Análisis del suelo

Para la mayoría de los suelos contaminados, los niveles de limpieza se establecen en términos de la concentración de los contaminantes en el suelo. Se puede realizar una comparación directa de las condiciones iniciales si las muestras se toman en los mismos puntos.

Si los contaminantes presentes son diferentes se podrán establecer diferentes niveles de limpieza.

N.Y. Department of Environmental, 1998 establece algunos criterios para determinar si es necesario realizar muestreos adicionales:

- Costo del muestreo.
- Niveles de la tasa de respiración
- Contenido de humedad y nutrientes en la pila

Muestreo de Vapores

Los resultados de esta prueba determinan el índice de actividad microbiana.

Se sugieren entre 6 y 8 puntos de monitoreo por cada 380 m³ (500 yd³) de suelo (Fahnestock and wickramanayake, 1998). Los puntos de monitoreo deben distribuirse de una forma geométrica dentro de la pila, por ejemplo colocar puntos en esquinas diagonalmente opuestas, en el centro, sobre el ramal de aireación, entre los ramales de aireación y uno ó dos más cerca de los bordes.

Las muestras se toman a las 2, 4, 6 y 8 horas después de haber iniciado la prueba y después entre 4 y 12 horas, dependiendo de la concentración de oxígeno. Si el oxígeno disminuye rápidamente, se requiere un monitoreo más frecuente y menos si el oxígeno no disminuye. Si la concentración de oxígeno

no decrece más del 10% después de 5 días, se considera que la prueba ha terminado.

Durante el monitoreo, existe el riesgo de liberar los vapores a la atmósfera, debido a que los puntos de muestreo se ubican cerca de los bordes de la pila.

Prueba de respiración por cierre.

La prueba es muy sencilla, porque el sistema de aireación opera por extracción. Idealmente la prueba de respirometría debe realizarse una vez al mes para monitorear los índices de degradación. La prueba debe arrancar 24 ó 48 horas después de haber puesto en marcha el sistema de aireación, la segunda prueba se realiza 1 semana después, y subsecuentemente la prueba deberá realizarse una vez al mes.

La prueba de respiración por cierre del sistema consiste en apagar el sistema de aireación una vez que el oxígeno se ha estabilizado. Los resultados de esta prueba se utilizan para calcular la tasa de biodegradación.

Cuando se han alcanzado los niveles de limpieza en la pila, el suelo que la forma se encuentra limpio y se coloca en la superficie del suelo. Para el caso de la TAD de Acapulco, el suelo se apilará cerca del área contaminada, para posteriormente colocarlo en donde se encontraba antes de ser tratado.

Capítulo 9

Consideraciones Económicas

La finalidad de este capítulo es desglosar los costos requeridos en un proyecto de saneamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, utilizando la tecnología de Biopilas, para entender lo complejo del problema y la necesidad de progresar en esta materia; sin embargo, no se pretende que con la información contenida tal y como está, se puedan elaborar estimaciones de costos para otros proyectos, ya que existen un sin fin de variaciones en los procesos constructivos, materiales equipo y mano de obra, pues estos dependen de la localidad, condiciones y características del sitio.

Realizar un desglose de los costos de un proyecto de saneamiento, es necesario, ya que permite entender lo complejo del problema y la urgente necesidad de progreso que tiene México en esta materia.

Un proyecto de saneamiento abarca tres etapas principales: la caracterización, las pruebas de tratabilidad y la conceptualización del proceso de tratamiento; es decir, el diseño, adecuación y arranque del mismo. En este capítulo se analizará únicamente la última etapa del proyecto, la conceptualización.

9.1 Proyecto de planeación y manejo

El proyecto de inversión es un plan al cual se le asigna un determinado monto de capital y se le proporcionan insumos de varios tipos. Su evaluación tiene por objeto conocer su rentabilidad económica y social.

Para tomar una decisión sobre un proyecto es necesario que sea sometido a un análisis multidisciplinario de diferentes especialistas. A toda actividad encaminada a tomar un decisión de inversión sobre un proyecto se le llama "Evaluación de Proyectos" (Halpin, 1991). La evaluación es la parte fundamental del estudio, debido a que es la base para decidir sobre el proyecto.

La realidad económica, política y social de la entidad donde se realizará el proyecto, marca los criterios que se seguirán para la evaluación del mismo, independientemente de la metodología empleada. La estructura general de la metodología de evaluación de proyectos puede representarse en la figura 9.1

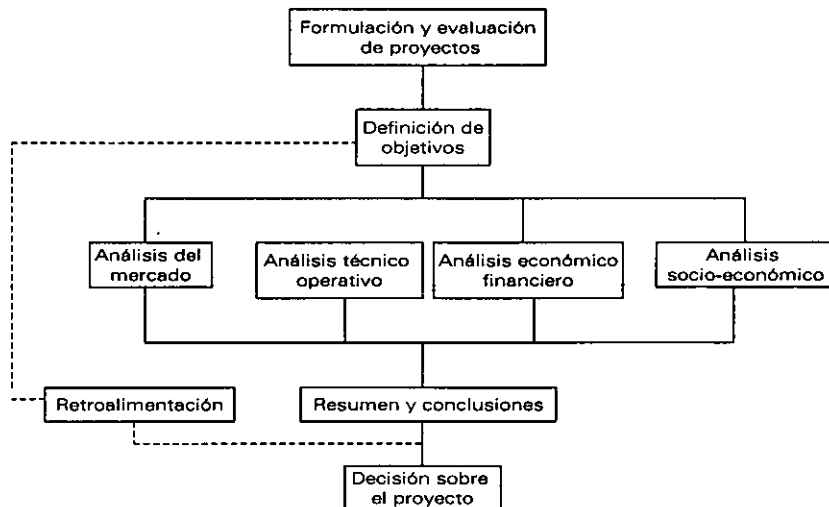


Figura 9.1 Estructura general de la evaluación de proyectos. (Baca, 1995)

Baca, 1995 propone tres niveles en una evaluación de proyectos. Al más simple se le llama "perfil", "gran visión" o "identificación de la idea", el cual se elabora a partir de la información existente, el juicio común y la opinión que da la experiencia. En términos monetarios solo se presentan cálculos globales de la inversiones, costos e ingresos.

El siguiente nivel es el estudio de prefactibilidad o anteproyecto, donde se profundiza la investigación, se detalla la tecnología que se empleará, se determinan los costos totales y la rentabilidad económica del proyecto.

El nivel más profundo y final es el "proyecto definitivo" contienen toda la información del anteproyecto, pero como mayor detalle.

Los objetivos de la evaluación de proyectos, son básicamente tres (Suárez, 1997):

- Verificar que el proyecto sea viable y operativo.
- Demostrar que tecnológicamente es posible.
- Demostrar que es económicamente rentable.

Baca, 1995 divide a todo proyecto en tres. La primera parte de todo proyecto, es una presentación formal del mismo, con sus objetivos y limitaciones.

La segunda parte es el estudio técnico que puede dividirse en cuatro partes: determinación del tamaño óptimo, determinación de la localización, ingeniería del proyecto y análisis administrativo. La determinación del tamaño óptimo es fundamental en esta parte del estudio. Para la localización óptima es necesario tomar en cuenta factores cuantitativos como los costos de transporte de insumos y cualitativos como apoyos fiscales, el clima. La ingeniería de proyecto se refiere a las diferentes tecnología que pueden utilizarse en el proyecto. El análisis administrativo se refiere al marco legal al cual se encuentra sujeto.

El estudio económico tiene como objetivo ordenar y sistematizar la información de carácter monetario y elaborar los cuadros analíticos que sirven de base para la evaluación económica. El estudio comienza con la determinación de los costos totales y de la inversión inicial, cuya base son los estudios de ingeniería, ya que tanto los costos como la inversión inicial dependen de la tecnología seleccionada. Los aspectos que sirven de base para la siguiente etapa son: la determinación de las tasas de rendimiento mínima aceptable y el cálculo de los flujos netos efectivos.

La cuarta etapa es la evaluación económica, que describe los métodos que se toman en cuenta, el valor del dinero a través del tiempo, como son la tasa interna de rendimiento y el valor presente neto. Esta parte es muy importante, pues es la que permite decidir la implantación del proyecto.

Finalmente, en todo proyecto debe haber una conclusión general, en la que se declaren cuales son las bases cuantitativas que llevan a tomar la decisión de inversión en el proyecto estudiado.

El análisis económico o estudio económico determina el monto de los recursos económicos necesarios para realizar el saneamiento del suelo contaminado (Suárez, 1997).

El análisis económico se prepara antes de iniciar los trabajos de saneamiento para estimar el costo probable de un proyecto, es una estimación del costo real.

Las estimaciones pueden dividirse en varias categorías dependiendo de los fines para los cuales se preparan, estas categorías pueden ser: las estimaciones aproximadas y las detalladas; el primer tipo únicamente es una aproximación de costos, el segundo tipo, se elabora determinado los costos de los materiales, equipo de construcción, mano de obra, herramientas, trabajo de campo, trabajo de laboratorio, etc. (Peurifoy, 1980)

9.2 Factores Económicos

El presupuesto es el estudio por medio del cual se prevé o se presupone el importe de una obra con base en los volúmenes proyectados por los precios unitarios en cada concepto, se puede decir que es una suposición del valor de un producto para condiciones definidas a un tiempo inmediato, es el reflejo final de los balances y donde finalmente se puede averiguar la factibilidad de un proyecto (Suaréz, 1997).

El no existir dos procesos de saneamiento iguales por las características y condiciones del sitio y concentración de contaminantes, provocan que la evaluación del costo no sea exacta.

Las condiciones del presupuesto y las del antepresupuesto pueden variar durante el transcurso del proyecto, por lo que es conveniente cuantificar de manera sistemática los volúmenes de los trabajos del saneamiento para tener un mejor control sobre ellos.

Al preparar un presupuesto se deben incluir todas las actividades necesarias para llevar a cabo la rehabilitación. En el presupuesto es recomendable que las actividades aparezcan en el orden que se llevarán a cabo durante el saneamiento.

En el presupuesto influyen de forma directa la cantidad de material y sobre todo la mano e obra, la cual es variable y susceptible de modificarse según el

clima, altitud y longitud; esta sujeta a las condiciones propias de cada región y al medio ambiente circundante. Para determinar la cantidad de materiales es importante considerar los desperdicios del material utilizado (Peurifoy, 1980).

Para elaborar un presupuesto de biorremediación es necesario conocer todos los factores que intervienen en el proceso, para analizarlos a detalle, como son: la localización del proyecto, características del lugar, requisitos a los cuales se sujeta, especificaciones detalladas, materiales necesarios, elementos que la integran y sus dimensiones; tipo, concentración y características del contaminante.

Para facilitar la comprensión del presupuesto deben elaborarse los costos unitarios, es decir determinar por cada unidad los costos de materiales, mano de obra y equipo; las unidades designadas incluyen metros cuadrados, cúbicos, lineales, lote, pieza, lt, kg, toneladas, etc. Para agruparlos en capítulos con precios unitarios e importes totales.

Precios Unitarios

Para elaborar los precios unitarios es recomendable el uso de tarjetas para facilitar la obtención de datos como: tipo y cantidad de material, con sus características principales y rendimientos de mano de obra.

Los precios unitarios pueden ser de varios tipos: los que se hacen por unidad de medida es decir por metro cuadrado, cúbicos, etc. los que se hacen por piezas específicas, los que consideran por lotes y los que cuantifican por salida.

Para signar a un concepto la unidad correspondiente de peso, volumen, área o longitud se toma en cuenta la unidad del integrante dominante, así como la forma más fácil de llevar a cabo dicha medición.

El procedimiento para hacer los análisis de costo unitario es el siguiente: los trabajos se dividen por grupos, de cada grupo se realiza una investigación exhaustiva y para su elaboración se consideran: el salario mínimo aprobado por la Comisión Nacional de Salarios Mínimos, las tarifas del Instituto Mexicano del Seguro Social y los costos de los materiales (Suarez, 1997).

9.2.1 Factores que determinan el costo de la instalación

Los implementos que se requieren para ejecutar los diferentes trabajos de un proyecto son muy variados. De su uso correcto y del cuidado que se le dé, depende su duración, pero siempre debe tomarse en cuenta el desgaste que sufren y en consecuencia su depreciación (Alcantara, 1983).

Los materiales constituyen una pieza importante en la integración del presupuesto, por lo que para su estudio se clasifican en intrínsecos y auxiliares; al primer grupo pertenecen los materiales que constituyen la obra, por ejemplo para la biopila: arena, grava, válvulas, tubería, etc. Por su parte los auxiliares son aquellos que al cumplir su propósito se retiran del sitio, es decir no forma parte de la pila por ejemplo las rampas, la cerca, etc. (Suarez, 1997)

Los costos preliminares se integran con el equipo y los materiales cuya participación en el presupuesto es repetitiva, por lo que es conveniente su determinación previa, para hacer más fácil la integración en los costos finales en los que intervienen.

Los materiales deberán estar catalogados por separado de acuerdo con sus clasificaciones y costos unitarios. Sus costos base deben considerarse puestos en obra. Para calcular el costo de la mano de obra, es necesario conocer los salarios reales y el tiempo requerido para completar cada operación.

El costo final es la suma de materiales, mano de obra, equipo y costos preliminares para la realización de un trabajo. La importancia del análisis del costo final en la planeación del proyecto y el soporte técnico del mismo en base a sus especificaciones.

Para estimar los costos de un proyecto de remediación se deben considerar los siguientes rubros: equipo, trabajo de campo, laboratorio y gabinete (Saval, 1995).

Equipo.

Los gastos requeridos corresponden a inversión, operación del equipo durante las actividades de prospección y monitoreo:

- Prospección: perforación de pozos, toma de muestras, etc.

Trabajo de campo

Esto incluye lo siguiente:

- Reconocimiento del sitio con ayuda de planos de localización.
- Perforación de pozos para toma de muestras, para monitoreo o para procesos de extracción-tratamiento-inyección.
- Movimiento de materiales común en los procesos *ex situ*

Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio es de dos tipos analítico y de adecuación a las condiciones de campo:

- Análisis químicos para conocer el tipo y concentración de los contaminantes.
- Análisis fisicoquímicos para conocer las características del suelo.

Trabajo de gabinete

Es una actividad de tipo administrativo para integrar todas las actividades referentes al proyecto, a ésta corresponde:

- Calendarización
- Planeación
- Diseño

9.2.2 Factores que determinan el costo de la operación y mantenimiento

Los gastos indirectos se dividen en dos grupos, los gastos indirectos de operación y los gastos indirectos de cada una de las obras, los primero son la suma de gastos que por su naturaleza, son aplicables a todas las obras efectuadas en un lapso determinado, normalmente un año fiscal y los segundo son la suma de todos los gastos que por su naturaleza, son de aplicación a todos los conceptos de una obra en especial (Alcántara, 1983).

Para estimar los costos de operación y mantenimiento deben considerarse aspectos como equipo, trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete.

Los gastos generados por concepto del equipo corresponde a inversión, operación y desgaste del equipo con la consecuente necesidad de mantenimiento (Alcántara, 1983). El equipo se requiere para el monitoreo así como para la operación de la tecnología de remediación.

- Operación: Bombas, compresores, sistemas de extracción, mezcladoras, movimiento de materiales, reactores, centrífugas, filtros, etc.
- Monitoreo: Toma de muestras y análisis *in situ*, respirometría.

Los gastos generados por concepto del trabajo de campo durante la operación incluyen (Saval, 1995):

- Instalación de equipos de procesos auxiliares.
- Aplicación de nutrientes y agua.
- Operación y supervisión de todas las actividades.

El trabajo de laboratorio eroga los siguientes gastos

- Pruebas de tratabilidad para evaluar la capacidad y eficiencia de la eliminación de contaminantes.
- Pruebas de respirometría realizadas durante toda la operación de la tecnología.
- Análisis de las muestras de monitoreo, realizadas por lo menos una vez al mes, durante toda la operación del proceso de biorremediación; se analiza pH, concentración de nutrientes, contenido de agua, concentración de nutrientes, concentración de contaminantes.

El trabajo de gabinete es una actividad de tipo administrativo que produce las siguientes erogaciones:

- Gastos involucrados en el análisis e interpretación de resultados
- Elaboración del informe
- Personal involucrado (técnicos, Investigadores, Ingenieros, asesores).

9.3 Elaboración del presupuesto

Para elaborar el presupuesto del saneamiento del suelo contaminado con hidrocarburos en la TAD de Acapulco, las actividades se dividieron en 11 capítulos para su análisis, para esto se realizó un estudio mercado para cotizar

los materiales necesarios en la construcción, operación y mantenimiento de la pila. Los capítulos son:

- Preparación del sitio; que incluye los trabajos preliminares, limpieza del terreno y acarreo del desmonte.
- Construcción de la base; incluye todos los trabajos involucrados en la construcción como la colocación de la arcilla, compactación, impermeabilización, excavación de las zanjas para drenes, etc.
- Construcción de la pila; incluye la excavación del suelo contaminado, acarreo del mismo y la formación de la pila.
- Sistema de aireación; incluye el suministro y colocación de los tubos del sistema de aireación para las pilas de 500 m³ y 800 m³ así como las compresores correspondientes.
- Recolección de lixiviados, incluye el suministro y colocación del depósito de lixiviados, bomba y la tubería para la conducción hacia las zanjas.
- Adición de humedad, incluye el suministro y colocación del sistema de irrigación y el suministro del agua.
- Adición de nutrientes, incluye el suministro y adición de nutrientes.
- Cubierta; incluye el suministro y colocación de la cubierta.
- Muestreo; incluye la colocación de los puntos de muestreo y análisis.
- Monitoreo; incluye los trabajos de inspección semanal y mensual de todo el sistema.
- Mantenimiento, incluye todos los trabajos necesarios para mantener operando en óptimas condiciones los elementos que integran el sistema de biopilas.

Los capítulos mencionados anteriormente se dividen en subcapítulos y estos contienen a los conceptos que analizan con detalle cada una de las actividades necesarias para la construcción y operación del sistema de biopilas.

El presupuesto se elaboró utilizando el programa OPUS2000. El formato de presentación del presupuesto contiene seis columnas, la primera contiene las claves de cada uno de los conceptos. La segunda contiene la descripción de los conceptos, la tercera las unidades de los conceptos, la cuarta las cantidades o volúmenes, la quinta los precios unitarios y la última el importe total por concepto. En el presupuesto, al final de cada capítulo y subcapítulo se calcula su importe. Del presupuesto se obtiene que el capítulo más costoso

es la construcción de la pila y el del costo mínimo, es el capítulo de mantenimiento, con lo que se concluye que el sistema de biopilas es operable con un costo de mantenimiento mínimo.

Con el programa también es posible obtener la explosión de los insumos, es decir la cantidad de cada uno de los insumos que serán utilizados para la construcción y operación del sistema de biopilas. La explosión de insumos, también se obtienen utilizando el programa OPUS2000 de costos y precios unitarios. El formato que utiliza el programa para presentar la explosión de materiales contiene siete columnas, la primera contiene la clave de identificación de los insumos, la segunda la descripción de los insumos, la tercera la unidad de los insumos, la cuarta la cantidad total de los insumos, la quinta el precio unitario, la sexta el monto o importe total y la séptima y última el porcentaje que representa cada uno de los insumos en el costo total de la obra.

En la explosión se observa que los materiales representan el 20.23% del costo total de la obra, la mano de obra constituye el 41.77% del costo total, la herramienta representa el 6.30%, el equipo el 28.045% y los conceptos auxiliares, en donde se incluyen los análisis de laboratorio representa le 3.66% del costo total de la obra. Con lo anterior se puede concluir que el mayor peso lo representa el costo de la mano de obra seguido por el equipo para la operación y mantenimiento.

El monto total de la obra es \$3'721.044.83, por lo tanto el costo por m³ de suelo tratado, considerando un volumen de 5,323 m³ es de \$699.05. Este precio se compara con el de otros países en la tabla 9.1

Tabla 9.1 Costo de la tecnología de biopilas en diferentes países

COMPANIA	PAIS	PRECIO (m ³)	AÑO	OBSERVACIONES
NFESC Environmental Department Heap Pile Bioremediation	USA	52.17 Dólares	1992	La concentración tenía 683 ppm y se bajo a 56 pm
New York state Department of Environmental Conservation	USA	260.00 Dólares	1996	Incluye operación y mantenimiento
EPA Office of Underground storage tanks	USA	78.00-234.00 Dólares	2000	El precio depende de las condiciones del sitio y la concentración de HTP
Enviro Access / Technological fact sheet	USA	65.00 -169.00 Dólares	1995	El precio depende de las condiciones del sitio y la concentración de HTP
Bannett Environmental	USA	78.00- 260.00 Dólares	2000	El precio depende de las condiciones del sitio y la concentración de HTP

COMPANÍA	PAIS	PRECIO (m ³)	ANO	OBSERVACIONES
Remedial Investigations & Feasibility studies	USA	68.00-68.00 dólares	2000	No incluye el costo de operación y mantenimiento
Biopile Composting	USA	39.00 - 78.50 Dólares	1996	No incluye el costo de operación y mantenimiento.
Bioremediation	USA	131.00 - 262.00 Dólares	1997	El precio depende de las condiciones del sitio y la concentración de HTP
Aqua Terre	USA	39.00 Dólares	1994	No incluye el costo de operación y mantenimiento.
New Mexico state Department of Environmental Conservation	USA	78.00 - 234.00	1997	El precio depende de las condiciones del sitio y la concentración de HTP
Office of research and Development USA Environmental protection agency. Cincinnati Oh.	USA	78.00 - 260.00 Dólares	1997	El precio depende de las condiciones del sitio y la concentración de HTP
Inovative treatment technologies	USA	70.00 - 200.00	1996	El precio depende de las condiciones del sitio y la concentración de HTP
Federal remediation technologies	USA	35.00 Dólares	1994	No incluye mantenimiento
Fahnestock and Wicramanayake	USA	52.00 - 131.00	1998	No incluye mantenimiento
Department of trade and Industry biotechnology at work	UK	£10.00 - £40.00	2000	

En la tabla anterior los costos están dados en dólares por metro cubico de suelo tratado y para diferentes años, por lo que no se puede hacer una comparación, sino únicamente sirve para darnos una idea sobre el costo en otros países.

9.4 Programación del proyecto

El factor tiempo es muy importante y en toda obra se prevé fijando un programa de trabajo. Existe un procedimiento por medio del cual se puede controlar o delinear el curso de un proyecto, este procedimiento gráfico consiste en llevar sobre un sistema de coordenadas cartesianas, las cantidades de obra y los tiempos en que se realizan dichas cantidades. Esta grafica permite regular cada uno de los trabajos y por medio de ella se lleva un control del tiempo necesario para su realización.

Desde 1957 la programación y el control de un proceso producido se lleva a cabo, a base de "Diagrama de barras" o "diagrama de Gantt", el cual consiste en determinar las actividades principales, la duración y su representación a escala de manera que a cada actividad le corresponda un renglón de la lista, que generalmente establece el orden de ejecución de las actividades,

situándose la barra representativa de cada actividad a lo largo de una escala de tiempos efectivos. (Suarez, 1997).

Con base en el presupuesto definido, y conociendo la duración parcial de cada concepto, se obtiene la ruta crítica y un diagrama de barras o diagrama de Gantt.

El programa de obra es un informe gráfico donde se indican los tiempos de inicio, terminación y la duración de cada una de las actividades que forman el proceso en forma independiente.

La cuantificación de insumos permite programar las adquisiciones, el control, la selección de alternativas y la revisión de supuestos iniciales.

Con el programa de utilización de insumos se obtiene la cantidad de los insumos: materiales, mano de obra y equipos; necesarios por período para el saneamiento. Esta información puede auxiliar en el suministro de materiales, utilización del equipo y el manejo de los recursos humanos (Suarez, 1997).

El programa de obra se realizó con ayuda del programa OPUS2000 utilizando el método de diagramas de Gantt, de esta forma se observan por medio de las barras la duración de las actividades. El color verde representa a los grupos, el color azul a cada una de las actividades y el color rojo a las actividades críticas

El formato de presentación es el siguiente, en la primera columna se encuentra la clave de identificación del concepto, en la segunda la descripción del concepto, en la tercera el inicio de la actividad, en la cuarta la duración en días, la quinta, la fecha de terminación y en la siguiente sección se dibujan los diagramas, en la parte superior de esta sección se encuentran los meses del año y en la parte final de cada barra, aparece el monto total de cada actividad, también al final de cada mes se calcula el monto de gastos por mes, esto permite programar y optimar el capital disponible por mes.

El programa OPUS2000, permite obtener lo anterior para períodos de tiempo más cortos o más largos, por ejemplo días, semanas, quincenas, bimestres, trimestres, semestres, etc.

El programa de suministros es muy parecido al programa de obra, la diferencia radica en que lugar de actividades se en listan insumos (materiales, mano de obra, equipo, herramienta). Esto permite programar los pedidos y requisiciones de los insumos necesarios por mes de manera oportuna para no que no se presente un atraso por esta causa. Esto también programa el desalojo de los desperdicios, para no entorpecer las actividades de la TAD con los desperdicios producto de los trabajos de saneamiento. Los programas de obra y suministro se encuentran en el anexo 6.

El presupuesto y la explosión de insumos son los siguientes:

Capítulo 10

Conclusiones y Recomendaciones

Las conclusiones y recomendaciones que se presentan para el diseño, construcción y operación del sistema de biopilas como tecnología de saneamiento, se basan en los niveles de limpieza a alcanzar después de aplicar la técnica de restauración, que para un uso industrial es de 2,000 mg/kg HTP de acuerdo con los Criterios Internos publicados por la PROFEPA.

10.1 Conclusiones

Debido a las características de alta permeabilidad del subsuelo de la TAD ubicada en Acapulco, Gro., constituida principalmente por arena de media a gruesa y a que el nivel freático es muy somero, se considera la zona como vulnerable, por la alta probabilidad de contaminar el agua subterránea, por todo lo anterior se propone una tecnología fuera del sitio.

Como se observó la zona más contaminada de la TAD con HTP es la noroeste, en cuanto a los metales presentes como plomo, hierro y zinc no se rebasaron los límites permisibles.

De acuerdo, con el modelo RockWorks 3D, el volumen de suelo contaminado con HTP en la zona noroeste de la TAD, es de 8,155 m³, considerando un espesor de 2.48 m. Es importante destacar que el 70% del volumen contaminado tiene una concentración menor de 20,000 mg/kg de HTP.

Dadas las condiciones geohidrológicas de la zona, el tipo de suelo, la alta permeabilidad y el bajo contenido de material arcilloso, se consideró la opción de aplicar la tecnología de biopilas para el saneamiento de las áreas con concentraciones por arriba de 10,000 mg/kg de HTP, con los que se redujo el volumen de suelo a tratar a 5,323 m³.

Se encontró que la mejor zona para ubicar el sistema de biopilas es el área proyectada para el estacionamiento de pipas particulares, ubicado en la parte suroeste de la TAD.

En cuanto al tamaño, la mejor opción fue diseñar una pila de 800 m³ y otra de 500 m³, ambas con 21,956.60 mg/kg de HTP, con una capacidad de campo de 47.85%. Las dimensiones de las pilas son de 1.5x25x15 metros y 1.5x35x19 metros respectivamente.

En lo que se refiere a la aplicación de nutrientes, éstos se adicionarán de manera simultánea con el agua. Como se determinó, se requiere nitrógeno en mayor cantidad que fósforo, el nitrógeno se aplicará en forma de urea, se requieren 4.75 kg de urea/m³ de suelo, por su parte el fósforo se aplicará en forma de superfosfato CaH₂(PO₄), se requiere 0.2516 kg de CaH₂(PO₄)/ m³ de suelo.

Para alcanzar la humedad requerida del 95% de la capacidad de campo, la cantidad de agua que se adicionará es 297.07 L/m³.

Con respecto a la aireación, los flujos necesarios se calcularon utilizando dos métodos: la estequiometría y el programa Pileflow, obteniéndose valores muy semejantes por ambos métodos. Los flujos son 253.83091 ft³/min para la pila de 500 m³ y 406.12 ft³/min para la pila de 800 m³. Para el primer caso se requieren 4 ramales de 3" y un aireador de 3 HP marca EG&G Rotron, con una capacidad de flujo de 300 ft³/min. Para el segundo caso se requieren 5 ramales de 4" y un aireador de 7.5 HP, de la misma marca y con una capacidad de flujo de 400 ft³/min.

Para el caso de los lixiviados, se construirán zanjas, para conducir el agua hacia un depósito para su posterior reutilización, para esto se diseñó un sistema de aspersión que se colocará en la parte superior de las pilas.

Se determinó que la forma más sencilla para la construcción de la pila es colocando capas de suelo de aproximadamente 0.30 m de espesor y agregando agua con los nutrientes disueltos, hasta alcanzar la altura de 1.5 metros.

Se encontró que la mejor forma de controlar el proceso de saneamiento durante la operación, es mediante el monitoreo de los parámetros que rigen el proceso como la concentración de HTP, O₂, CO₂. Con respecto al mantenimiento se determinó que los elementos que requieren mayor

mantenimiento son: la cubierta, los ramales de aireación, la membrana impermeable y el aireador.

Finalmente el análisis económico demuestra que el costo de inversión debido principalmente a la construcción de la pila es el más alto, y por el contrario el costo del mantenimiento es el menor, con lo que se comprueba que la operación del sistema de biopilas es rentable.

También se observó que el costos de los materiales representa el 20.23%, la mano de obra el 41.77%, la herramienta el 6.30%, el equipo el 28.45% y los conceptos auxiliares el 3.66% del costo total de la obra, con lo que se concluye que el mayor peso en cuanto a costos los constituye la mano de obra seguida por la operación y mantenimiento.

Por último el monto total de la obra es \$3'721.044.83, por lo tanto el costo por m³ de suelo tratado considerando un volumen de 5323 es de \$699.05

10.2 Recomendaciones

El volumen de suelo con concentraciones entre 2,000 mg/kg y 10,000 mg/kg se propone sanearlo mediante atenuación natural, con un monitoreo periódico para conocer la tasa de disminución de la concentración con el tiempo.

Para determinar el volumen de suelo contaminado, se considera un espesor de 2.48 m, este puede ser menor en algunos sitios, por lo tanto el volumen de suelo a sanear puede disminuir.

Para el diseño de la pila se determinó, que la concentración promedio de HTP es de 21,956.60 mg/kg. Esta concentración puede variar debido a que la mancha de contaminación no es homogénea, y las pilas al construirse pueden variar esta concentración, dando como resultado que el tiempo sea mayor o menor, según la concentración, por lo que cada pila es diferente y no es conveniente automatizar el proceso de biorremediación.

Por otro lado los nutrientes propuestos, son la urea y el superfosfato, pero estos pueden sustituirse por otros que resulten más económicos y disponibles

en la localidad, con lo que respecta al contenido de agua, el intervalo varía de 70% al 95% de la capacidad de campo, para determinar cual es la cantidad óptima es necesario tomar en cuenta, las condiciones climatológicas como temperatura, humedad relativa, punto de rocío y precipitación pluvial.

Con respecto a la cubierta, ésta puede sustituirse por una capa de grava. Para decidir ésto es importante conocer la velocidad del viento, ya que si es mayores de 40 Km/h no es recomendable el uso de la cubierta de plástico , y por el contrario la capa de grava es la mejor opción.

Los costos pueden reducirse debido a que el volumen de suelo a tratar puede disminuir, así como el tiempo de operación. Ésto debido que el mayor costo del proceso lo representan la construcción de la pila y la mano de obra, por lo que reduciendo el volumen, disminuyen las actividades más costosas, así como el tiempo de operación del proceso.

Por otra parte en México no existe una legislación adecuada para prevenir y controlar la contaminación del suelo, por lo que se hace poco efectivo el saneamiento de los mismos, por lo tanto urge la creación de un reglamento en la materia, junto con su norma correspondiente.

También conviene resaltar que la evaluación y restauración del daño ambiental no deben considerarse como un requisito administrativo, sino como una necesidad técnica en las que no deben escatimarse costos.

Bibliografía

- ☐ Alcántara Vicente Vargas. 1983. "Análisis de precios unitarios de montaje industrial electromecánico". México. Tomo I, II y III.
- ☐ Alexander M. 1994. "Biodegradation and bioremediation". Academic Press. EUA.
- ☐ Ambiente cleaned naturally. 1999.
http://www.enr.H/english/notizie/reviste/ecos2_00/ec2_00_p68.html.
- ☐ Atlas R.M. 1991. "Microbial hydrocarbon degradation-bioremediation of oil spills". Tech Biotechnol. EUA.
- ☐ Baca Urbina Gabriel. 1995. "Evaluación de proyectos". McGraw Hill. México.
- ☐ Baker Katherine and Herson Diane. 1994. "Bioremediation" McGraw Hill. USA.
- ☐ Bennett-Environmental Inc. Noviembre 200. "Proposed Kirkland rete thermal oxidizer facility". Mississauga Ontario.
[Http://erb.nfesc.navy.mil/restoration/technologies/remed/bio/bio-03.asp](http://erb.nfesc.navy.mil/restoration/technologies/remed/bio/bio-03.asp).
- ☐ Biocell and Biopile Treatment or facilites. 2000. [Http://www.fuel-tanks.com/EPA%20publications.htm](http://www.fuel-tanks.com/EPA%20publications.htm).
- ☐ Biodyne, The viable alternative. <http://www.biodyne-srq.com/infbkbio.htm>.
- ☐ Biogenie-Europe <http://www.pollutec.com/exhibitions/2000/2/266.htm>.
- ☐ Biological remediation Technology. 2000. "Biopile / Composting".
<http://erb.nfesc.navy.mil/restoration/technologies/remed/bio/bio-03.asp>.
- ☐ Biopile / Composting technology.
<http://erb.nfesc.navy.mil/restoration/technologies/remed/bio/bio-03.asp>.
- ☐ Biopiles. [Http://www.srk.net/news/1997-sep/page3.html](http://www.srk.net/news/1997-sep/page3.html).
- ☐ Biorem. "Biopile remediation of styrene/Ethylbenzene contaminated soil".
http://www.bioremtechnologies.com/assests/field_studies_biopile2.html.
- ☐ Bioremediation of cantaminated soil biopile. http://envjro.nfesc.navy.mil/p2library/cgi-bin/p2g_datasheet.cfm?item.D=32.html.
- ☐ Boulding J. R. 1995. Soil vadose zone and groundwater contamination. "Assessment, prevention and remediation". Lewis Publishers. USA.
- ☐ Buitron G. And capdeville, B. 1993. Uptake rate and mineralization of hexadecane and naphtalene by a mixed aerobic. Culture water res. 27(5).

-
- ❑ Carmona Ma. 1998. "Legislación existente en materia de suelos en México". Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM. México.
 - ❑ Chang Z.Z. and Weaver. 1997. "Nitrification and utilization of ammonim and nitrate during oil bioremediation at different soil water potenciales. Journal soil contaminated. 6(2) 149-160.
 - ❑ Chang Z.Z Weaver R. And Rhykerd R.L. 1996 "Oil bioremediation in hig and low phosphorous soil". Journal. Soil contaminated 5(3): 215-224.
 - ❑ Consulta Nacional sobre Legislación Ambiental. Julio, 1995. Comisión de Ecología, Cámara de Diputados, México.
 - ❑ Costet J, Sanglerat G. 1975." Curso práctico de mecánica de suelos" Ediciones Omega S.A. Barcelona España.
 - ❑ Crezpo Villalaz Carlos.1 991"Mecánica de suelos y cimentaciones " Editorial Limusa, México.
 - ❑ Davis, J.B. 1967 "Petroleum Microbiology". Elgevier Publishing. Campany Amsterdam.
 - ❑ Deyta Teco Ana Laura. 1998. Tesis "Fundamentos de microbiología y bioquímica para bioremediación" Instituto de Ingeniería UNAM, México.
 - ❑ Domenico Patrick A. Scwartz Franklin W. 1997."Physical and Chemical Hydrogeology" Jonh Wiley and sons USA.
 - ❑ Drever James i. 1997"the Geochemistry of natural waters". Surface and Groundwater Environments. Pretice-Hall .USA.
 - ❑ Emsion newswire. NMRC Receives E.U. "Fungling to dvelop acelerated Bioremediation System for Reclamation of polluted land sites" http://www.nexus-emston.com/news/NMRC2_1000.html.
 - ❑ Enviro Access, "Mobile environmental remediation system". <http://www.enviroaccess.c/FICHES/fat-03-960.html>.
 - ❑ EPA, Office of Underground storage tanks. <http://www.epa.org/swerust1/cat/biopiles.htm>.
 - ❑ EPA, Office of Underground storage tanks. "How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tanks sites: A Guide for corrective action plan reviewers" (EPA 510-B-94-003 and EPA 510-B-945-007). <http://www.epa.gov/swerust1/plus/tums.htm>.
 - ❑ EPA, 1994. Technologyes fo bioremediation for soil contaminated with hydrocarbons" <http://www.epa.usace.army.mil/net/usace-docs/eng/pamphlets/epa200-1-10/c-4/pdf>.
 - ❑ Fahnestock and Wickramanayake. 1998. "Biopile desing, operation and maintenace, hanbook for treating hidrocarbon-contaminated soil". Battelle press. Columbus Ohio, USA.

-
- 📖 Full-scale bioremediation. <http://www.biofinders.edu.au/bioremed/html/full.html>.
 - 📖 George A. Olah and Arpad Molmarc. 1992. "Hydrocarbon Chemistry" Lewis publishers. USA.
 - 📖 Gray Murray, Fedporak Phil, Foght Julia, Pickard Mike. 2000. "Bioremediation Research" <http://www.valberta.ca/~gay/Bioremediation%20Research.htm>.
 - 📖 Halpin W. Daniel. 1991. "Conceptos financieros de costos en la industria de la construcción". Editorial Noriega. México.
 - 📖 Iain Thornton Ph. D. DS. 1991. "Metals in the global environment. Facts and misconceptions". Lewis publishers. USA.
 - 📖 INE. 1996. Propuesta de anteproyecto de Norma Oficial Mexicana. "Restauración de suelos contaminados: metodología para la determinación de criterios de limpieza en base a riesgos". Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, residuos y Actividades Riesgosas.
 - 📖 INE. 1997. Requisitos técnico administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contamiandos por materiales y/o residuos peligrosos, Instituto Nacional de Ecología. Dirección General de Materiales, Residuos y actividades Riesgosas. Febrero 1997.
 - 📖 Iturbe Argüelles Rosario, Castro Rodriguez A. Madrigal I. 1998. "Tecnicas de rehabilitación de suelos y acuíferos". Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
 - 📖 Joint Coordinating Committee for Environmental Systems. <http://www.jcces.fsu.edu/corps.htm>
 - 📖 Jorgensen Kirsten S. And Puustinen Jukka. 2000. "Bioremediation by composting in Biopiles" Environment Instiute Reserch Laboratory. Helsinki Finlad. <http://www.nessling.fi/symposio2/jorgensen.htm>.
 - 📖 Juárez Bdillo, Rico Rodríguez. 1997. "Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de mecánica de suelos". Noriega-Limusa. México.
 - 📖 Konx R.C., Sabatini D.A., Conter L.W. 1993. "Subsurface transport and fate processes". Lewis publishers. USA.
 - 📖 LaGrega D.M., Buckingham L.P. and Evans C.J. 1994. "Hazardous waste management". McGraw-Hill. USA.
 - 📖 Lambe William T. And Whitman Roberty V. 1991. "Mecánica de suelos". Limusa. México.
 - 📖 Lawrence H. Keith. 1998. "Principles of Environmental Sampling" American Chemical Sietetey. USA.

-
- ☐ López Villegaz María Tania. 1997.. "Determinación de hidrocarburos de tres y cuatro carbonos en el medio ambiente de la ciudad de México". Tesis Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México.
 - ☐ Madrigal Ismael. 1998. Tesis "Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México. Tesis de maestría. DEPMI, UNAM, México D.F.
 - ☐ Manual de rellenos sanitarios. 1998. Subsecretaria de Ecología, SEDUE. Dirección general de Contaminación Ambiental. México.
 - ☐ Muñoz Meza Juan M. 1998. "Criterios de limpieza en suelos contaminados". Curso sobre bioremediación de suelos y acuíferos. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
 - ☐ Naval Facilities Engineering. 2000. Service Center Point. Hueneme, California. <http://www.usece.army.mil/net/usace-docs/eng/pamphlets/ep2000-110/c.4.pdf>.
 - ☐ New York. Department of Environmental Conservation. Division of Environmental Remediation. 1998. <http://www.dec.state.ny.us/website/der/stars/pr6star2.pdf>.
 - ☐ New York, State, Department of Environmental Conservation/ENSR, Consulting and Engineering and Larsen Engineers. (Ex Situ Biovault) <http://www.clu-m.org/products/site/complete/democomp/nysdece.htm>.
 - ☐ NFESC. 1997. Biopiles a viable and cost effective method to remediate hydrocarbon contaminated soil <http://www.nfesc.navy.mil>.
 - ☐ NFESC. Environmental Department, Heap pile bioremediation. <http://enviro.nfesc.navy.mil/ps/projects/heap.htm>
 - ☐ Oxygen release compound, ORC "Study which show chemical on soil remediation applications (Biopiles). <http://www.regenesis.com/orc.tech/tb233.htm>
 - ☐ Palencia-Ramírez H. 1998 "Química de productos del petróleo" Curso sobre bioremediación de suelos y acuíferos. Instituto de Ingeniería UNAM. México.
 - ☐ Palmer M.C. 1996 "Principles of contaminant hydrogeology". Lewis publisher. USA.
 - ☐ Peurifoy Robert L. 1980. "Estimación de los costos de construcción" Editorial Diana. México.
 - ☐ PFPA. 1999. "Aportaciones del GDT a la gestión de suelos contaminados. <http://www.profepa.gob.mx/saa/audita63.htm>.
 - ☐ PFPA. 1999. Criterios de muestreo aplicables a la restauración de suelos contaminados. <http://www.profepa.gob.mx/saa/audita46.htm>

-
- ☐ PFPA. 2000. Actualización de las guías para la elaboración de evaluación de daños ambientales y propuesta de restauración.
<http://www.profepa.gob.mx/saa.audita42.htm>.
 - ☐ PFPA. 2000. Disposiciones y procedimientos para la caracterización y restauración de suelos contaminados. México. <http://www.profepa.gob.mx/saa>.
 - ☐ Programa de salud Ambiental. 1997. "Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Colombia.
 - ☐ Qualitative Guidelines for soil remediation applications. 2000. Biopiles.
<http://www.regenesis.com/ortech/tb232.htm>
 - ☐ R;E Means, J.V. Parcher. 1996. "Physical properties of soils". Merrill Books. Columbus Ohio. USA.
 - ☐ Reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente. Diario Oficial de la federación diciembre 13 1996. México.
 - ☐ Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación, enero 12 de 1999. México.
 - ☐ Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental. Diario Oficial de la Federación. Junio 12 de 1999. México.
 - ☐ Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, Diario Oficial de la Federación. Noviembre 23 de 1998. México.
 - ☐ Remedial Investigations & Feasibility studies.
<http://www.summite.com/services/feasibility.htm>
 - ☐ Resinger H. James and Mountain Stewart A. 1998. "Bioremediation of a major inland oil spill using a comprehensive integrated approach".
<http://www.integratedscience.com/publications/Biopile.htm>.
 - ☐ Ríos Patrón. 1997. Programa para el análisis del balance térmico de un horno de vaporización de petróleo crudo". Tesis, UNAM. México.
 - ☐ Roldán Escobedo Alejandro. 1998. "Alternativas para el tratamiento y control de los acuíferos contaminados con hidrocarburos alifáticos alognados". Tesis, UNAM. México.
 - ☐ Sahwabaum William Jesse. 1997. "Understanding ground water". Nova science. New York.
 - ☐ Sánchez Gómez J. 1997. Comunicación personal durante la reunión informativa sobre los requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados

- por materiales y/o residuos peligrosos. Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas. Instituto Nacional de ecología. México.
- ▣ Saval Bohorquez Susana. 1998. "La responsabilidad jurídica en el daño ambiental". Universidad Nacional Autónoma de México. Petróleos mexicanos. México.
 - ▣ Saval Bohorquez Suasana. 1995. "Propuesta de cambios a la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en lo referente al título IV, capítulo III: Prevención y control de la contaminación del suelo. México.
 - ▣ Saval Bohorquez Susana. 1995. "remediación y restauración ". PEMEX, Ambiente y Energía. Los retos del futuro. México, UNAM-Ptróleos Mexicanos.
 - ▣ SEDESOL-INE 1994. "Industria Petrolera". Informe de la situación general en materia del equilibrio ecológico y protección al ambiente. Secretaría de Desarrollo Social. Instituto nacional de Ecología. México, Capítulo 13.
 - ▣ SERDP'S National Environmental Technology test sites (NETTS) Transfer Emerging Cleanup Technologies to field-scale. 1998.
<http://www.serdp.org/general/public.january1998success.html>.
 - ▣ Shannon & Wilson. <http://www.shannonwilson.com/services/artic/environmental.html>
 - ▣ Siebe Grabach. 1998. "Química de suelos". Curso sobre bioremediación de suelos y acuíferos. Instituto de Ingeniería UNAM, México
 - ▣ Sleman Park. 1997 "Bioremediation of hydrocarbon impacted soils a composting. Technology demostration. USA.
 - ▣ Soto navarro Pedro. 1998. "Transporte de contaminantes en medios porosos". Curso sobre remediación de suelos y acuíferos. Instituto de Ingeniería. UNAM. México.
 - ▣ SRK News. 1997. "Subsúrfâce Contamination". Septiembre 1997 Nõ. 23
Contaminated soil remediation using. USA
 - ▣ State of Wisconsin. Department of Natural Resorces.
<http://www.dnr.state.wisc.org/aw/rr/archivies/pubs/4406.pdf>.
 - ▣ Suárez Salazar. 1997. "La determinación del presupuesto en la obra privada y pública" Noriega editores. México.
 - ▣ Testa M, Stephen and Winegardner Dvane L. 1991. "Restoration of petroleum-cantaminated aquifers". Lewis publishers. Michigan USA.
 - ▣ The biotechnology Gateway, B. Current Satate of the art of bioenvironmental technologies. <http://strategis.ic.gc.ca/ssg/bo0/032e.html>.

-
- ▣ Trejo Hernandez María del Refugio. 1998. "Biodegradación del petróleo en suelos contaminados". Conferencia en el curso sobre bioremediación. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
 - ▣ Vidal Manzo Alejandro. 1998. "Evaluación del riesgo". Cursos sobre bioremediación de suelos y acuíferos" Instituto de Ingeniería. UNAM. México.
 - ▣ Winagger Ionn W. and Torkenson Bruce E. 2000. "Petroleum hydrocarbon Fingerprinting- Numerical Interpretation Developments". Tolsa Oklahoma.

1.915	0.344	0.288	0.130
2.329	0.457	0.368	0.149
2.716	0.588	0.449	0.160
3.076	0.741	0.530	0.165
3.409	0.914	0.603	0.163
3.713	1.100	0.659	0.156
3.988	1.100	0.687	0.144
4.233	1.100	0.696	0.130
4.448	1.100	0.693	0.115
4.630	1.100	0.682	0.101
4.780	1.100	0.670	0.089
4.894	1.100	0.658	0.080
4.970	1.100	0.649	0.074
5.000	1.100	0.649	0.074

DEPTH (FT)	LOCATION #4	LOCATION #5	LOCATION #6
0.000	0.000	0.000	0.000
0.517	0.079	0.071	0.040
1.009	0.160	0.142	0.075
1.475	0.247	0.214	0.106
1.915	0.345	0.290	0.132
2.329	0.458	0.369	0.150
2.716	0.589	0.451	0.162
3.076	0.741	0.531	0.167
3.409	0.915	0.605	0.165
3.713	1.100	0.660	0.158
3.988	1.100	0.689	0.146
4.233	1.100	0.697	0.132
4.448	1.100	0.694	0.117
4.630	1.100	0.683	0.103
4.780	1.100	0.671	0.090
4.894	1.100	0.658	0.081
4.970	1.100	0.650	0.076
5.000	1.100	0.650	0.076

DEPTH (FT)	LOCATION #7	LOCATION #8	LOCATION #9
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.517	0.004	0.004	0.003
1.009	0.007	0.007	0.006

1.475	0.010	0.010	0.008
1.915	0.012	0.013	0.010
2.329	0.013	0.014	0.011
2.716	0.014	0.015	0.011
3.076	0.014	0.015	0.011
3.409	0.014	0.014	0.010
3.713	0.013	0.013	0.009
3.988	0.011	0.012	0.007
4.233	0.010	0.010	0.006
4.448	0.008	0.008	0.005
4.630	0.007	0.007	0.004
4.780	0.006	0.006	0.003
4.894	0.005	0.005	0.003
4.970	0.004	0.004	0.002
5.000	0.004	0.004	0.002

SUPERFICIAL AIR VELOCITY THROUGH PORES OF SOIL (CUFT/SQFT-MIN)

DEPTH (FT)	LOCATION #1	LOCATION #2	LOCATION #3
0.517	0.189E+00	0.168E+00	0.890E-01
1.009	0.155E+00	0.133E+00	0.626E-01
1.475	0.180E+00	0.149E+00	0.584E-01
1.915	0.218E+00	0.172E+00	0.538E-01
2.329	0.268E+00	0.201E+00	0.503E-01
2.716	0.334E+00	0.238E+00	0.497E-01
3.076	0.413E+00	0.282E+00	0.529E-01
3.409	0.492E+00	0.332E+00	0.595E-01
3.713	0.277E+00	0.381E+00	0.678E-01
3.988	0.000E+00	0.396E+00	0.758E-01
4.233	0.000E+00	0.407E+00	0.822E-01
4.448	0.000E+00	0.421E+00	0.862E-01
4.630	0.000E+00	0.437E+00	0.871E-01
4.780	0.000E+00	0.451E+00	0.845E-01
4.894	0.000E+00	0.462E+00	0.777E-01
4.970	0.000E+00	0.463E+00	0.596E-01
DEPTH (FT)	LOCATION #4	LOCATION #5	LOCATION #6
0.517	0.190E+00	0.169E+00	0.900E-01
1.009	0.155E+00	0.134E+00	0.633E-01
1.475	0.181E+00	0.150E+00	0.589E-01
1.915	0.218E+00	0.172E+00	0.542E-01

2.329	0.268E+00	0.201E+00	0.505E-01
2.716	0.333E+00	0.238E+00	0.497E-01
3.076	0.412E+00	0.282E+00	0.529E-01
3.409	0.491E+00	0.332E+00	0.596E-01
3.713	0.277E+00	0.380E+00	0.679E-01
3.988	0.000E+00	0.395E+00	0.760E-01
4.233	0.000E+00	0.406E+00	0.826E-01
4.448	0.000E+00	0.420E+00	0.867E-01
4.630	0.000E+00	0.436E+00	0.876E-01
4.780	0.000E+00	0.450E+00	0.850E-01
4.894	0.000E+00	0.461E+00	0.782E-01
4.970	0.000E+00	0.463E+00	0.599E-01

DEPTH (FT)	LOCATION #7	LOCATION # 8	LOCATION #9
0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.517	0.884E-02	0.939E-02	0.763E-02
1.009	0.810E-02	0.827E-02	0.610E-02
1.475	0.971E-02	0.961E-02	0.650E-02
1.915	0.113E-01	0.110E-01	0.690E-02
2.329	0.128E-01	0.121E-01	0.723E-02
2.716	0.139E-01	0.131E-01	0.744E-02
3.076	0.147E-01	0.136E-01	0.753E-02
3.409	0.150E-01	0.138E-01	0.748E-02
3.713	0.148E-01	0.136E-01	0.730E-02
3.988	0.143E-01	0.131E-01	0.700E-02
4.233	0.135E-01	0.124E-01	0.661E-02
4.448	0.124E-01	0.115E-01	0.613E-02
4.630	0.113E-01	0.105E-01	0.558E-02
4.780	0.101E-01	0.948E-02	0.496E-02
4.894	0.894E-02	0.834E-02	0.423E-02
4.970	0.726E-02	0.665E-02	0.295E-02

ITERATIONS = 90 DEVMAX = .847E-01 RELAXATION = 1.000

CONSERVATION OF MASS THROUGH ONE SEGMENT:

AIR FLOW THROUGH THE TOP OF PILE = .1175E+01 LBS/MIN

AIR FLOW THROUGH THE SIDES = .2133E-02 LBS/MIN

BLOWER AIR FLOW = .1228E+01 LBS/MIN

MASS ERROR = .4327E+01 PERCENT

3.988	1.025	0.640	0.134
4.233	1.025	0.647	0.121
4.448	1.025	0.644	0.107
4.630	1.025	0.634	0.093
4.780	1.025	0.621	0.082
4.894	1.025	0.609	0.073
4.970	1.025	0.601	0.068
5.000	1.025	0.601	0.068

DEPTH (FT)	LOCATION #4	LOCATION #5	LOCATION #6
0.000	0.000	0.000	0.000
0.517	0.073	0.066	0.037
1.009	0.149	0.132	0.070
1.475	0.230	0.200	0.099
1.915	0.321	0.270	0.123
2.329	0.426	0.344	0.140
2.716	0.549	0.419	0.151
3.076	0.691	0.494	0.155
3.409	0.852	0.563	0.153
3.713	1.025	0.614	0.146
3.988	1.025	0.640	0.135
4.233	1.025	0.648	0.122
4.448	1.025	0.644	0.108
4.630	1.025	0.634	0.094
4.780	1.025	0.622	0.083
4.894	1.025	0.610	0.074
4.970	1.025	0.602	0.069
5.000	1.025	0.602	0.069

DEPTH (FT)	LOCATION #7	LOCATION #8	LOCATION #9
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000
0.517	0.010	0.010	0.007
1.009	0.018	0.018	0.013
1.475	0.027	0.026	0.018
1.915	0.034	0.033	0.021
2.329	0.040	0.038	0.023
2.716	0.045	0.042	0.024
3.076	0.047	0.044	0.024

3.409	0.048	0.044	0.022
3.713	0.047	0.042	0.020
3.988	0.044	0.039	0.018
4.233	0.041	0.036	0.015
4.448	0.036	0.032	0.013
4.630	0.032	0.028	0.011
4.780	0.028	0.024	0.009
4.894	0.025	0.022	0.008
4.970	0.023	0.020	0.007
5.000	0.023	0.020	0.007

SUPERFICIAL AIR VELOCITY THROUGH PORES OF SOIL (CUFT/SQFT-MIN)

DEPTH (FT)	LOCATION #1	LOCATION #2	LOCATION #3
0.517	0.176E+00	0.157E+00	0.833E-01
1.009	0.144E+00	0.124E+00	0.586E-01
1.475	0.168E+00	0.139E+00	0.545E-01
1.915	0.203E+00	0.160E+00	0.501E-01
2.329	0.250E+00	0.187E+00	0.467E-01
2.716	0.311E+00	0.221E+00	0.460E-01
3.076	0.385E+00	0.263E+00	0.491E-01
3.409	0.459E+00	0.309E+00	0.554E-01
3.713	0.259E+00	0.355E+00	0.632E-01
3.988	0.000E+00	0.369E+00	0.707E-01
4.233	0.000E+00	0.380E+00	0.768E-01
4.448	0.000E+00	0.394E+00	0.805E-01
4.630	0.000E+00	0.409E+00	0.813E-01
4.780	0.000E+00	0.423E+00	0.787E-01
4.894	0.000E+00	0.433E+00	0.722E-01
4.970	0.000E+00	0.434E+00	0.550E-01

DEPTH (FT)	LOCATION #4	LOCATION #5	LOCATION #6
0.517	0.177E+00	0.158E+00	0.840E-01
1.009	0.145E+00	0.125E+00	0.591E-01
1.475	0.168E+00	0.139E+00	0.549E-01
1.915	0.203E+00	0.160E+00	0.503E-01
2.329	0.250E+00	0.187E+00	0.468E-01
2.716	0.311E+00	0.221E+00	0.461E-01
3.076	0.384E+00	0.262E+00	0.491E-01
3.409	0.458E+00	0.309E+00	0.554E-01
3.713	0.258E+00	0.354E+00	0.632E-01

3.988	0.000E+00	0.369E+00	0.709E-01
4.233	0.000E+00	0.380E+00	0.770E-01
4.448	0.000E+00	0.394E+00	0.807E-01
4.630	0.000E+00	0.408E+00	0.816E-01
4.780	0.000E+00	0.422E+00	0.790E-01
4.894	0.000E+00	0.432E+00	0.725E-01
4.970	0.000E+00	0.434E+00	0.552E-01

DEPTH (FT)	LOCATION #7	LOCATION #8	LOCATION #9
0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.517	0.229E-01	0.226E-01	0.155E-01
1.009	0.204E-01	0.194E-01	0.119E-01
1.475	0.247E-01	0.226E-01	0.124E-01
1.915	0.298E-01	0.264E-01	0.130E-01
2.329	0.352E-01	0.303E-01	0.136E-01
2.716	0.405E-01	0.340E-01	0.142E-01
3.076	0.454E-01	0.373E-01	0.147E-01
3.409	0.493E-01	0.398E-01	0.150E-01
3.713	0.518E-01	0.413E-01	0.151E-01
3.988	0.528E-01	0.417E-01	0.149E-01
4.233	0.526E-01	0.413E-01	0.145E-01
4.448	0.513E-01	0.401E-01	0.139E-01
4.630	0.492E-01	0.384E-01	0.130E-01
4.780	0.466E-01	0.361E-01	0.118E-01
4.894	0.436E-01	0.334E-01	0.103E-01
4.970	0.393E-01	0.292E-01	0.740E-02

ITERATIONS = 88 DEVMAX = .851E-01 RELAXATION = 1.000

CONSERVATION OF MASS THROUGH ONE SEGMENT:

AIR FLOW THROUGH THE TOP OF PILE = .1457E+01 LBS/MIN

AIR FLOW THROUGH THE SIDES = .1896E-02 LBS/MIN

BLOWER AIR FLOW = .1524E+01 LBS/MIN

MASS ERROR = .4504E+01 PERCENT

Anexo 2

Gráfica de permeabilidad

Gráfica para la conversión de unidades de permeabilidad.

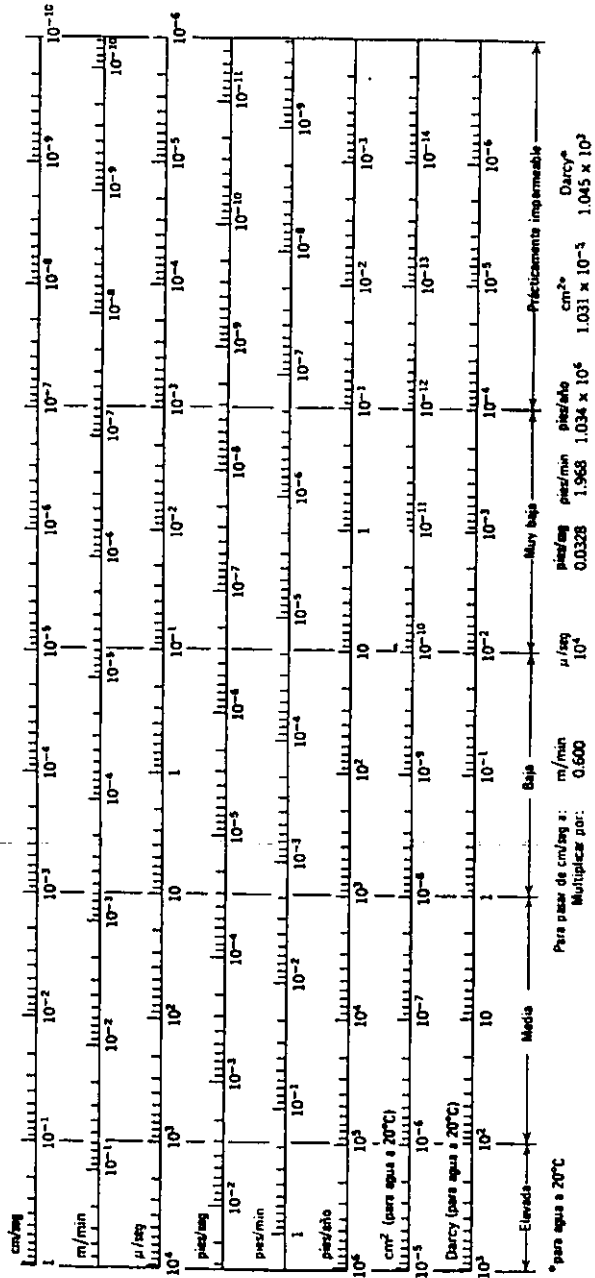


Figura A2.1 Conversión unidades de permeabilidad

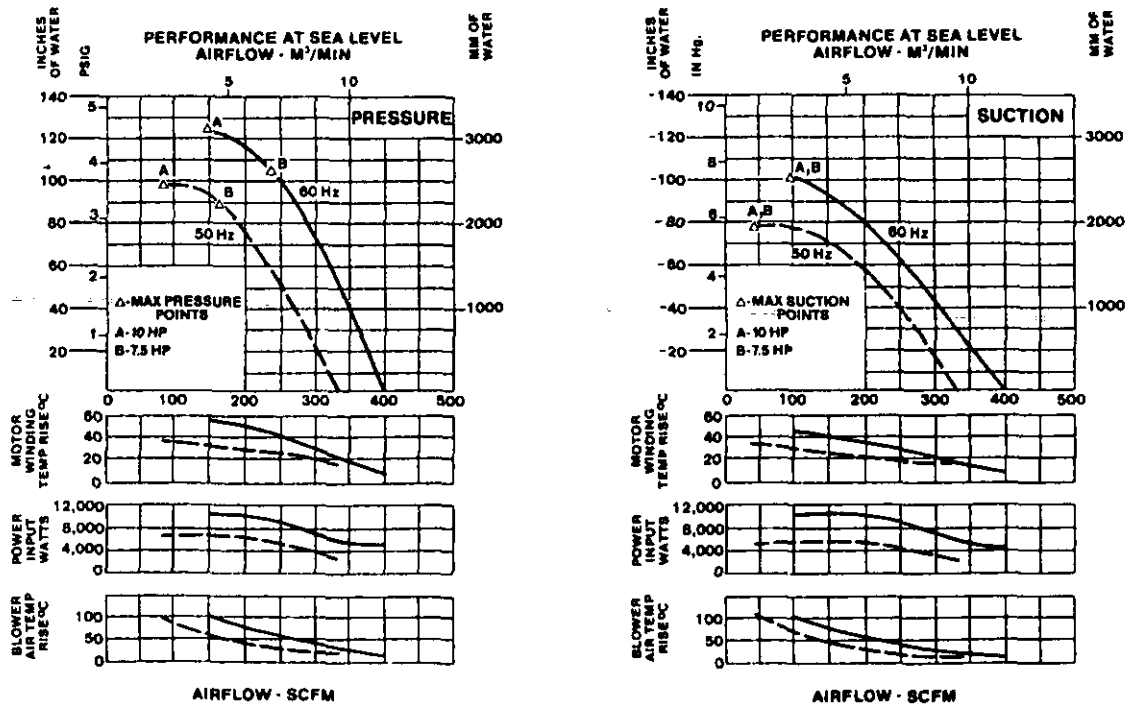
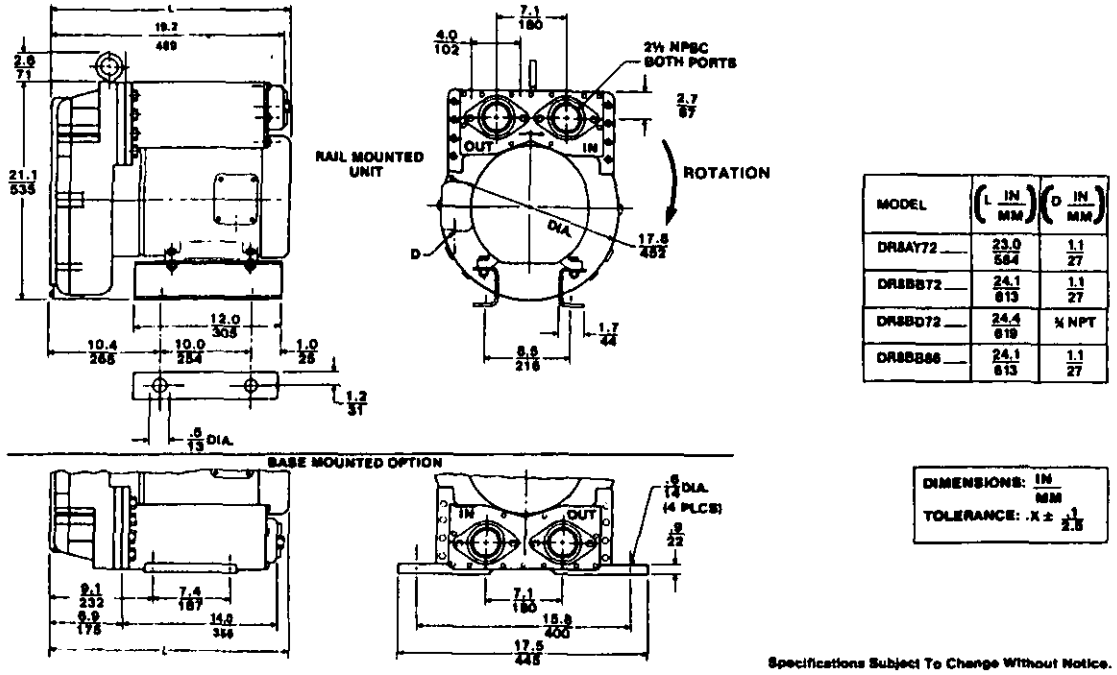


Figura A3.2 Gráficas de eficiencia de la bomba seleccionada para la pila de 800 m³.

Anexo 4

Capacidad de Campo

Capacidad de Campo.

Método de las columnas de Colman.

Materiales:

- Cilindro de 4.5 cm de diámetro y 20 cm de longitud (de preferencia transparentes)
 - Tijeras
 - Papel filtro No.42
 - Tapón de hule No.11 con dos orificios de salida
 - Agitador de vidrio
 - Tapón de hule No.9 con un orificio
 - Probeta graduada de 100 ml.
 - Gradilla y soporte con pinzas
 - Vaso de precipitado de 500 ml
 - Suelo molido y tamizado a 2 mm
- Procedimiento

Recorte el papel filtro con las trieres haciendo dos círculos de igual diámetro que el interno del cilindro.

Cierre un extremo del cilindro con el tapón No.11 y sobre éste ponga un extremo del cilindro con el tapón No. 11 y sobre este ponga un recorte circular de papel filtro evitando que queden pliegues, éstos alteran el resultado afectando la reproductibilidad de la prueba. La función de este papel es impedir que el suelo se salga por el orificio del tapón.

Pese cilindro + tapón + 2 papeles. Anote peso (A).

Vacié cantidades pequeñas de suelo tamizado de modo que, con el, agitador de vidrio se integren bien las capas de suelo tamizado.

Con la otra punta del agitador, la cual tiene insertado el tapón No. 9 se dan golpecitos sobre la pared del cilindro a fin de darle el suelo un mejor acomodo, lo más parecido al que presenta en el campo.

Llene el cilindro hasta los 10 cm de altura si el suelo es arenoso y hasta 2.5 cm si es muy arcilloso. Sucede que en arcillas especialmente sódicas por su pobre condición física el agua no logra pasar luego de un cierto d percolación. Se la muestra arcillosa es más gruesa no se logra terminar la prueba.

Introduzca la segunda ruedita de papel filtro sobre el suelo. La función de este papel es evitar que cuando se vierte el agua sobre el suelo no se degrade la parte superficial de éste dificultado e impidiendo el paso del agua hacia dentro de la muestra.

Pese cilindro + tapón + papeles + suelo. anote el peso (B)

Obtenga el peso del suelo (C) = (B) - (A)

Estime la cantidad de agua que puede retener el suelo (C) mediante la siguiente función:

$$(D) = (C) * (\theta_{gcc}) / 100$$

donde:

(D) : Gramos de agua probablemente retenidos.

(C) : Gramos de suelo

(θ_{gcc}): humedad gravimétrica estimada a CC(%)

para esto utilice la información siguiente:

textura	Rango CC(%)	Media
Arena	5-15	10
Franco arenosa	10-20	15
Franco	15-30	22
Franco arcilloso	25-35	30
Arcilla	30-70	50

Ponga el vaso precipitado debajo de la columna ya instalada verticalmente.

Sobre el suelo agregue el doble del agua calculada y deje percolar hasta que se pase todo el líquido (más de 24 horas), drenando el exceso en el vaso de

precipitado. Entre el agua libre sobre el suelo y el frente de humedecimiento podrá observar dos partes: la zona de transición más oscura y la zona de mojado del perfil de humedecimiento, más clara abajo. Entre el agua libre y la zona de transmisión hay una zona de saturación.

Cuando ya no drene más el agua, tome una muestra del segundo tercio de la columna de suelo húmedo.

Determine la humedad gravimétrica a CC

$$\%CC = \frac{(Pshb - Pssb) \times 100}{(Pssb - Pb)}$$

donde:

Pshb = peso del bote con el suelo húmedo

Pssb = peso del bote con el suelo seco.

Pb = peso del bote

Tomado del Manual de Laboratorio para el manejo físico de suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo, 1993

Anexo 5

Formatos de operación y mantenimiento

Formatos utilizados en la operación y mantenimiento de las Biopilas.

Formato 1 para el sistema de arranque de la biopila

Tabla A5.1 Sistema de arranque de la biopila 1

Lista de control para el sistema de arranque de la biopila CL-2a

Celda de tratamiento _____ Temperatura ambiente _____
 Lote de suelo _____ Humedad relativa _____
 Fecha _____ Presión barométrica _____ Iniciales del operador _____

Actividad		Comentarios
Registro inicial de las características del suelo		Anexar datos de la hoja DS-1
Inspección de la zanja		
Inspección de la cubierta de la pila y de los amrres		
Asegurar que el sistema de aireación se encuentre correctamente instalado		
Inspección del aireador		
Inspección de los tubos de aireación		
Asegurarse que las conexiones se encuentren correctamente instaladas		
Inspeccionar las válvulas		
Asegurar el flujo de aire en los ramales de aireación		
Encender el soplador		
Medir el flujo de aire in cada ramal		
Medir el flujo de aire, presión y temperatura a la salida de del aireador.		
Apagar el soplador		
Colocar el suelo a tratar sobre la base de la pila		
Iniciar el muestreo de suelo		Anexar datos de la hoja DS-3
Inspección de las condiciones de los puntos de monitoreo		
Asegurar que el sistema de tratamiento de gases se encuentre instalado y operando		

Formato 2 para el sistema de arranque de la biopila

Tabla A5.2 Sistema de arranque de biopilas 2

Actividad		Comentarios
Verificar y calibrar los instrumentos en campo		
Medir la temperatura y composición del muestreo de gases en los punto de monitoreo		
Repetir las lecturas de los puntos de monitoreo, hasta que la concentración de oxígeno sea estable		
Apagar el sistema de aireación e iniciar las pruebas de respiración		
Reajustar el flujo de aire		
Después de estabilizar la concentración de O ₂ se ajusta el flujo de aire en cada ramal		
Medir el flujo de aire, presión y temperatura en el interior del soplador.		

Forma 3 para la inspección del sistema de biopilas

Tabla A5.3 Inspección del sistema de biopilas

Lista de control para la inspección periódica del sistema de biopilas (CL-3)

Celda de tratamiento _____ Lote de suelo _____

Fecha _____ Iniciales del operador _____

Actividad		Comentarios
Inspección de la zanja (semanal)		
Inspección de la cubierta y amarres (semanal)		
Inspección del drenaje (semanal)		
Inspección del sistema de tratamiento de gases (semanal)		
Inspección del aireador (semanal)		
Inspección de los ramales de aireación (semanal)		
Inspección de la instrumentación (semanal)		
Inspección de los puntos de monitoreo (mensual)		
Verificar y calibrar los instrumentos (mensual)		
Medir la concentración de O ₂ , CO ₂ , HTP y temperatura en los puntos de muestreo (mensual)		Anexar hoja DS-2
Medir el flujo de aire en el aireador (mensual)		
Medir el flujo de aire o la presión en cada ramal del sistema (mensual)		
Medir el flujo de aire a la salida del aireador (mensual)		
Realizar pruebas de respiración (mensual)		Anexar hoja DS-2

Formato 4 para controlar un derrame en el sistema de biopilas

Tabla A5.4 Control de derrames

Lista de control para un eventual derrame en el sistema de biopilas (CL-4)

Celda de tratamiento _____ Lote de suelo _____

Fecha _____ Iniciales del operador _____

Control de derrame / característica a verificar	Si	NO	correcciones
¿Los contenedores se encuentran adecuadamente señalados?			
¿Las hojas de seguridad de los materiales utilizados se encuentran disponibles?			
¿Los materiales químicamente incompatibles se almacenan en áreas separadas?			
¿Los materiales inflamables y combustibles están separados de las fuentes de ignición.			
¿El equipo contra incendios se encuentra disponible?			
¿Los materiales químicos se almacenan bajo cubiertas impermeables?			
¿El polvo proveniente del suelo, fertilizantes u otros materiales se encuentra controlado?			
¿El área de almacenamiento cuenta con sistema de drenaje?			
¿El sistema de drenaje del área de tratamiento es capaz de aguantar el 100% del agua proyectada?			
¿Los contenedores son los adecuados?			
¿En general el área de tratamiento se encuentra libre de desechos?			
¿El equipo contra derrames se encuentra disponible? (tapones, material absorbente, bombas, escobas, palas, cubetas, etc.			

Anexo 6

Programa de obra

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

ID	Civ. Concepto	Descripción	Inicia	Duración	Termina	2001 Jun	2001 Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	2002 Ene	2002 Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
0		Presupuesto para el saneamiento del suelo contaminado del TAD de Acapulco, Gro.	04/Jun/2001*	443c	21/Ago/2002*																3'720,573.15
10		PREPARACIÓN DEL SITIO	04/Jun/2001*	8.5c	12/Jun/2001																87,546.61
20		Trabajos preliminares	04/Jun/2001*	8.5c	12/Jun/2001																87,546.61
30	1.1.1	Remoción de la capa vegetal del terreno natural, incluye acarreo a 20 m con vegetación de densidad de 0.10 m	04/Jun/2001*	3c	07/Jun/2001*																11,118.10
40	1.1.2	Acarreo del desmonte en camión con tiro a 10 km fuera de la obra con carga a mano	04/Jun/2001*	4.5c	08/Jun/2001																10,113.80
50	1.3	Trazo y Limpia del terreno sensiblemente plano	04/Jun/2001*	4.5c	08/Jun/2001																9,847.46
60	1.1.4	Cerca provisional a base de polin de 10' a cada 3 metros, anclado con concreto F'c=100 kg/cm2, utilizando malla 6-6/10-10	04/Jun/2001*	8.5c	12/Jun/2001																56,467.25
70		CONSTRUCCIÓN DE LA BASE	11/Jun/2001*	12c	23/Jun/2001*																486,906.90
80		Base	11/Jun/2001*	11c	22/Jun/2001*																465,921.78
90	2.1.1	Colocación de la arcilla de 20 cm que formará la sub-base de la biopila. Incluye acomodo y acarreo hata 3 Km	11/Jun/2001*	3.5c	14/Jun/2001																23,300.89
100	2.1.2	Compactación de la base de arcilla al 80% proctor	13/Jun/2001*	5.5c	18/Jun/2001																11,261.55
110	2.1.3	Colocación de la membrana impermeable (geomembrana HPDE de polietileno de alta densidad de 40-60ml)	14/Jun/2001*	5.5c	19/Jun/2001																175,454.20
120	2.1.4	Union de los traslapes de la geomembrana. Cada traslape se considera de 20 cm. Incluye mano de obra y equipo	15/Jun/2001*	5c	20/Jun/2001*																219,026.70
130	2.1.5	Colocación de la base de arena limpia. Incluye extencion y acomodo con una pendiente de 2%	18/Jun/2001*	2.5c	20/Jun/2001																25,616.89
140	2.1.6	Compactación de la capa de arena limpia al 80% proctor	19/Jun/2001	3.5c	22/Jun/2001*																11,261.55
150		Drenes	11/Jun/2001*	12c	23/Jun/2001*																20 985.12
160	2.2.1	Excavación de las zanjas para drenajes de 0.20 m de profundidad x 0.30 m de ancho	11/Jun/2001*	4.5c	15/Jun/2001																4,926.60
170	2.2.2	Cubierta con mortero en proprcion 1:8 en las paredes de las zanjas para evitar deslaves	15/Jun/2001	5c	19/Jun/2001																608.40

Simbología: Actividad Grupo Crítica

ogla: Actividad Grupo Crítica

logia: Actividad Grupo Crítica

gia: Actividad

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

ID	Clv. Concepto	Descripción	Inicia	Duración	Termina	2001 Jun	2001 Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	2002 Ene	2002 Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
180	2.2.3	Colocación de la base de arena limpia. Incluye extensión y acomodo con una pendiente de 2%	19/Jun/2001	4c	22/Jun/2001		■														1,194.57
190	2.2.4	Compactación de la capa de arena limpia al 80% proctor	20/Jun/2001	3.5c	23/Jun/2001*		■														525.15
200	2.2.5	Construcción del marco de contención de madera. Incluye todos los materiales auxiliares y mano de obra	15/Jun/2001	7c	21/Jun/2001		■														13,730.40
210		CONSTRUCCIÓN DE LA PILA	25/Jun/2001	305.5c	26/Abr/2002*		■														1'587,078.15
220		Excavación	25/Jun/2001*	291c	12/Abr/2002*		■														427,649.82
230	3.1.1	Excavación en seco del suelo contaminado sobre terreno blando hasta una profundidad de 2.48 m y con ayuda de maquinaria.	25/Jun/2001*	291c	12/Abr/2002*		■														111,303.93
240	3.1.2	Traslado del suelo contamiando hasta el sitio donde se construirán las biopilas en camiones de volteo. Incluye tiro del materia. La distancia no es mayor de 240 m	25/Jun/2001*	291c	12/Abr/2002*		■														316,345.89
250		Formación de la pila	25/Jun/2001	305.5c	26/Abr/2002*		■														1'159,428.33
260	3.1.4	Acarreo en carretilla de 70 litros del suelo contaminado del área de almacenaje temporal a la base de pila hasta una distancia de 40 m. Incluye carga y descarga del suelo.	25/Jun/2001*	305c	26/Abr/2002*		■														10,429.67
270	3.1.6	Acarreo del suelo contaminado del área de almacenaje temporal a la base de pila hasta una distancia de 40 m. utilizando un cargador frontal. Incluye carga y descarga del suelo.	25/Jun/2001*	305c	26/Abr/2002*		■														449,450.00
280	3.1.5	Formación de la pila colocando capas de suelo contaminado de aproximadamente 0.30 m de espesor y agregando agua con los nutrientes disueltos. El análisis no incluye a los nutrientes.	25/Jun/2001*	305c	26/Abr/2002*		■														699,548.66
290	3.1.7	Construcción de la rampa temporal con tarimas de 50x100 cm. Pra evitar dañar los tubos de aireación	25/Jun/2001	4c	28/Jun/2001		■														0.00
300		SISTEMA DE AIREACIÓN	25/Jun/2001*	31c	26/Jul/2001*		■														91,157.44
310		Tubería para la biopila de 500 m3	25/Jun/2001*	11c	06/Jul/2001*		■														15,796.63
320	4.1.1	Suministro Instalación y Colocación de los ramales del sistema de aireación para la	25/Jun/2001*	8.5c	03/Jul/2001		■														5,405.94

Simbología: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

logía: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

logía: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

logía: ■ Actividad

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

ID	Civ. Concepto	Descripción	Inicia	Duración	Termina	2001 Jun	2001 Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	2002 Ene	2002 Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
		biopila de 500 m3. Incluye todo el material necesario, mano de obra, indirectos y utilidades																			10,390.69
330	4.1.2	Suministro, colocación y conexión del compresor a los tubos de aireación	25/Jun/2001*	1c	06/Jul/2001*		■														21,445.56
340		Tubería para la biopila de 800 m3	04/Jul/2001	9c	12/Jul/2001		■														9,054.87
350	4.2.1	Suministro Instalación y Colocación de los ramales del sistema de aireación para la biopila de 800 m3. Incluye todo el material necesario, mano de obra, indirectos y utilidades	04/Jul/2001	7c	10/Jul/2001		■														12,390.69
360	4.2.2	Suministro, colocación y conexión del compresor a los tubos de aireación	11/Jul/2001	2c	12/Jul/2001		■														53,915.25
370		Trabajos auxiliares	05/Jul/2001*	21c	26/Jul/2001*		■														290.66
380	4.3.1	Construcción de la base para la bomba o compresor	05/Jul/2001*	1.5c	06/Jul/2001		■														669.20
390	4.3.2	Prueba del sistema de aireación	16/Jul/2001*	2c	18/Jul/2001*		■														51,907.35
400	4.3.3	Colocación de la capa de grava de 1 1/2" sobre los tubos de aireación	23/Jul/2001	3.5c	26/Jul/2001*		■														1,048.04
410	4.3.4	Construcción de caseta para la protección de las bombas contra las inclemencias del tiempo	09/Jul/2001	4c	12/Jul/2001		■														22,881.52
420		RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS	09/Jul/2001*	9c	18/Jul/2001*		■														22,881.52
430		Recolección de lixiviados	09/Jul/2001*	9c	18/Jul/2001*		■														124.45
440	5.1.1	Bomba para transferir los lixiviados de la zanja al tanque de almacenamiento de lixiviados	16/Jul/2001	2.5c	18/Jul/2001*		■														1,608.06
450	5.1.2	Suministro y Colocación del tanque de almacenamiento de lixiviados	17/Jul/2001*	1c	18/Jul/2001*		■														3,724.29
460	5.1.3	Estructura metálica que sirve de soporte al tanque de almacenamiento de lixiviados.	10/Jul/2001*	6c	16/Jul/2001*		■														17,424.72
470	5.1.4	Tubería de pvc para la conducción de los lixiviados de las zanjas al tanque de almacenamiento	09/Jul/2001*	4.5c	13/Jul/2001		■														698,671.02
480		ADICIÓN DE HUMEDAD	26/Jun/2001*	394c	25/Jul/2002*	■															698,671.02
490		Sistema de Irrigación	26/Jun/2001*	394c	25/Jul/2002*	■															2,848.46
500	6.1.1	Suministro y colocación de tubería para el sistema de irrigación de los nutrientes y agua	26/Jun/2001*	10c	06/Jul/2001*		■														695,822.56
510	6.2.1	Suministro de agua con los	26/Jun/2001*	394c	25/Jul/2002*	■															695,822.56

Simbología: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

logía: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

logía: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

logía: ■ Actividad

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

Programa de Obra BIOPILA

ID	Clv. Concepto	Descripción	Inicia	Duración	Termina	2001 Jun	2001 Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	2002 Ene	2002 Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Total
520		ADICIÓN DE NUTRIENTES	30/Jul/2001*	360c	25/Jul/2002*																625,718.65
530		Aplicación de los nutrientes	30/Jul/2001*	360c	25/Jul/2002*																625,718.65
540	7.1.1	Suministro y aplicación de nutrientes. Nitrógeno, Fósforo en forma de urea y superfosfato respectivamente	30/Jul/2001*	360c	25/Jul/2002*																625,718.65
550		CUBIERTA	07/Ago/2001*	243c	07/Abr/2002*																18,962.78
560		Cubierta de la pila	07/Ago/2001*	243c	07/Abr/2002*																18,962.78
570	8.1.1	Suministro y colocación de la cubierta de plástico	07/Ago/2001*	243c	07/Abr/2002*																18,962.78
580		MUESTREO	02/Ago/2001*	384c	21/Ago/2002*																92,228.91
590		Análisis y Muestreo	02/Ago/2001*	384c	21/Ago/2002*																92,228.91
600	9.1.1	Suministro y colocación de los puntos de muestreo	02/Ago/2001*	8c	10/Ago/2001*																488.31
610	9.1.2	Muestreo del suelo con muestreadores manuales para determinar: Contenido de humedad, pH, densidad microbiana, concentración de HTP, metales y nutrientes	27/Ago/2001*	352c	14/Ago/2002*																6,766.20
620	9.1.3	Pruebas de respirometría para medir la actividad microbiana y la efectividad del sistema de aireación	29/Ago/2001*	352c	16/Ago/2002*																2,676.60
630	9.1.4	Traslado de las muestras de suelo al laboratorio	30/Ago/2001*	352c	17/Ago/2002*																4,537.80
640	9.1.5	Análisis de las muestras	03/Sep/2001*	352c	21/Ago/2002*																77,760.00
650		MONITOREO	10/Jun/2001*	405c	20/Jul/2002*																6,135.06
660		Monitoreo	10/Jun/2001*	405c	20/Jul/2002*																6,135.06
670	10.1.1	Inspección semanal del sistema de drenaje. Toma de muestras para verificar que el efluente cumpla con las normas correspondientes	10/Jun/2001*	399c	14/Jul/2002*																4,105.20
680	10.1.2	inspección mensula del sistema de biopilas. Midiendo las concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono, temperatura, flujo de aire a la entrada y salida de los ramales y pruebas de respirometría	10/Jun/2001*	405c	20/Jul/2002*																2,029.86
690		MANTENIMIENTO	25/Sep/2001*	181c	25/Mar/2002*																3,286.11
700		Mantenimiento de los elementos que integran el sistema de biopilas	25/Sep/2001*	181c	25/Mar/2002*																3,286.11

Simbología: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

Simbología: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

Simbología: ■ Actividad ■ Grupo ■ Crítica

Simbología: ■ Actividad

