



S.E.P.

S.N.E.S.T.

D.G.E.S.T.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN

**“REMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS PROVENIENTES DE
RECORTES DE PERFORACIÓN, MEDIANTE
MÉTODOS BIOLÓGICOS UTILIZANDO
COMPOSTEO Y BIOLABRANZA”**

**MEMORIA DE RESIDENCIA
PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

Juan Angel Fuentes Pérez



MINATITLÁN, VER.

JUNIO 2010

"2010, Año de la Patria. Bicentenario del Inicio de la Independencia
y Centenario del Inicio de la Revolución"

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

DIV. DE ESTUDIOS PROFESIONALES
COORDINACIÓN DE TITULACIÓN
OFICIO NÚM. 27/2010

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE MEMORIA DE RESIDENCIA PROFESIONAL

07 DE JUNIO DEL 2010.

C. JUAN ANGEL FUENTES PEREZ
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE:

Después de haber satisfecho los requisitos establecidos en el procedimiento académico para obtener el título en los Institutos Tecnológicos y de conformidad con la H. Comisión Revisora, me es grato autorizar la impresión de su Memoria de Residencia profesional titulado:

**"REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS PROVENIENTES DE RECORTES DE
PERFORACIÓN, MEDIANTE MÉTODOS BIOLÓGICOS UTILIZANDO COMPOSTEO Y
BIOLABRANZA"**

ATENTAMENTE

LIC. ROSA ADAME NÚÑEZ
COORDINADORA DE LA OFNA. DE TITULACIÓN



DEDICATORIA

Éste trabajo se lo dedico a Dios, por haber hecho que todo esto sea posible.

Dedico este éxito académico a mi Tía Rosa quien gracias a ella concluyo satisfactoriamente.

Dedico también, a mi mami María de Jesús que sin su apoyo incondicional nada de esto pudo haber sido posible.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme dado la oportunidad de concluir mis estudios satisfactoriamente.

A mi Tía Rosa Elena Fuentes Cruz, por haberme ayudado a forjar mi carrera y por darme todo su apoyo total e incondicional, sin ella no podría haber concluido la universidad. Gracias Tillita!

A mi mami María de Jesús Pérez Quiroli, por haberme brindado todo su apoyo moral e incondicional por sus sabios consejos, sin ella no pude llegar a ser un hombre de bien, salir adelante, crecer como persona, ser lo que soy hoy en día... Gracias mami, te amo.

A mis hermanos Cristhian A, Fuentes Pérez; Abrahan de J. Fuentes Pérez y Lizbeth G. Fuentes Pérez, por formar parte de mi vida. En especial a Liz, quien fue participe de algunos acontecimiento a lo largo de mi carrera universitaria.

A mi padre Juan Fuentes Cruz, por el poco o mucho apoyo que de acuerdo a sus posibilidades pudo haberme brindado, de cualquier manera, gracias papá.

A mi familia que me apoyó en todo momento, en especial a mi abuelita Eloísa Quiroli Vega (Doña Licha), quien gracias a sus consejos sabios y oportunos pude salir adelante.

A mis amigos Francisco J. Ortiz Domínguez (Zupichu's Jr.) y Cynthia del C. Sánchez Cortes (chin chin), por haberme dado momentos gratos dentro y fuera del de la Universidad, por haber estado en todo momento bueno o malo conmigo, sin ellos no hubiese terminado satisfactoriamente la Universidad. Iván de J. Flores Guizar; Arturo A. Domínguez; Alfredo Montes de Oca Madrigal por todo su apoyo incondicional.

A mis maestros, en especial a la M.C. Esther García Gil, por todo el apoyo que me brindó desinteresadamente para la realización de éste trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICO DEL PROYECTO.....	3
PROBLEMAS A RESOLVER.....	4
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA INDUSTRIAL S.A. DE C.V.

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	6
1.2 UBICACIÓN GENERAL Y ESPECÍFICA DE LA EMPRESA.....	6
1.3 ORGANIGRAMA.....	8
1.4 GIRO DE LA EMPRESA.....	9
1.5 POLÍTICAS Y REGLAS.....	8
1.6 MISIÓN Y VISIÓN.....	10
1.7 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE SE PARTICIPÓ.....	11

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1	CONCEPTOS DE LA REMEDIACIÓN DE SUELOS	13
2.2	CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN	15
2.2.1	Clasificación de las tecnologías de remediación de acuerdo a la estrategia de remediación	15
2.2.2	Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo al sitio donde se realiza	15
2.2.3	Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo al tipo de Tratamiento	17
2.3	TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS	18
2.3.1	Aplicaciones, ventajas, desventajas y limitaciones de la biorremediación	21
2.3.2	Parámetros de control en la biorremediación	23
2.4	COMPOSTAJE	27
2.4.1	Aplicaciones, ventajas, desventajas, limitaciones y propiedades del compostaje	28
2.4.2	Compostaje como estrategia de biorremediación	30
2.4.3	Sistema de composteo	31
2.4.4	Etapas del proceso de compostaje	33
2.4.5	Requerimientos y factores para el compostaje	35
2.4.6	Factores que condicionan el proceso de compostaje	36
2.4.7	Diseño de biopilas	38

2.4.7.1	Factores a considerar en el diseño de una biopila.....	38
2.4.7.2	Etapas para la construcción de una biopila.....	40
2.4.7.3	Optimización del proceso de compostaje por biopila.....	41
2.5	BIOLABRANZA.....	42
2.5.1	Aplicaciones, ventajas, desventajas, limitaciones y propiedades de la biolabranza o Landfarming.....	43
2.5.2	Tecnología de biolabranza o Landfarming.....	45
2.5.2.1	Variables de control en el proceso de Landfarming.....	46
2.5.2.2	Criterios de diseño de un Landfarming.....	47
2.6	RECORTES DE PERFORACIÓN.....	48

CAPÍTULO III

COMPOSTEO Y BIOLABRANZA DE SUELO CONTAMINADO PROVENIENTE DE RECORTES DE PERFORACIÓN

3.1	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO CONTAMINADO.....	51
3.2	CARACTERÍSTICAS DEL TREN DE TRATAMINETO QUÍMICO-BIOLÓGICO.....	51
3.2.1	Sistema de tratamiento.....	51
3.2.2	Pretratamiento del suelo.....	52
3.2.3	Tratamiento químico.....	52
3.2.4	Tratamiento biológico.....	53
3.2.4.1	Dimensiones de la biopila de tratamiento biológico.....	54

3.2.4.2	Etapas del tratamiento biológico.....	55
3.2.5	Biolabranza.....	57
3.3	MONITOREO DE BIOPILAS.....	59
3.3.1	Variables de control.....	59
3.3.2	Nutrientes.....	63
3.4	CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES.....	65
3.5	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	66
	CONCLUSIONES.....	69
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA.....	70

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mundo se enfrenta a la necesidad de crear conciencia sobre el medio ambiente. Las actividades industriales se han vuelto indispensables para la vida moderna, los países desarrollados generan una serie de peligros ambientales. Los países en desarrollo, al modernizarse han generado el mismo tipo de problemas ambientales, quizá más agudos debido a la falta de recursos económicos, científicos, tecnológicos. La situación existente es extensiva a los diferentes medios de nuestro planeta, el suelo por supuesto no es la excepción, sobre todo porque son sistemas naturales que mantienen interrelaciones con los otros componentes de los ecosistemas a través de flujos interactivos.

Este trabajo presenta la aplicación de diversas tecnologías de remediación tales como: la biorremediación y la biolabranza, tienen la finalidad de limpiar y restaurar suelos contaminados con hidrocarburos, así como también el uso de plantas para recuperar suelos contaminados por compuestos orgánicos. También se describen los procedimientos y herramientas utilizadas por CEISA De C.V. para la remediación de suelos contaminados utilizando técnicas de compostaje

El capítulo I, presenta los antecedentes históricos, ubicación general y específica de Comunicaciones y Electrónicas Industrial, S.A. de C.V. (CEI S.A. de C.V.), organigramas, giros de las empresas, misión y visión y características del laboratorio que fue donde se realizó este trabajo. El capítulo II, está conformado por el marco teórico, el cual muestra temas importantes como lo son, remediación de suelos, compostaje, biolabranza y recortes de perforación. Y por último, en el capítulo III, se dan a conocer detalladamente la problemática y las características del área de estudio, tales como, las características del suelo contaminado, características del tren de tratamiento químico-biológico, monitoreo de biopilas y conclusiones del trabajo antes descrito.

JUSTIFICACIÓN

Los informes sobre suelos contaminados provenientes de recortes de perforación, surgen de las actividades petroleras, y en específico la de perforación de pozos, generando grandes volúmenes de los residuos denominados “recortes de perforación”, los cuales, según la LGPGIR y la NOM-052-SEMARNAT-2005 no se consideran peligrosos, por lo que son utilizados como insumos para procesos secundarios. Actualmente se trabaja en el proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-153-SEMARNAT-2006, que establece las especificaciones ambientales para la inyección de recortes de perforación en formaciones receptoras y que sería útil en la regulación de este tipo de materiales.

Con este proyecto se propone, implementar tecnologías de tratamiento eficaces a suelos contaminados con hidrocarburos provenientes de recortes de perforación, utilizando métodos biológicos como el composteo y biolabranza. Siendo estos métodos económicos para la empresa CEI S.A. de C.V.

El producto final, que es el abono orgánico, será aprovechado para la reproducción de plantas en el vivero de CEI S.A. de C.V.

Este proyecto contribuirá al mejoramiento del medio ambiente, al aportar una solución a la problemática de los suelos contaminados provenientes de recortes de perforación. La solución es implementar las tecnologías de tratamiento de remediación de suelos, adoptando las técnicas de Composteo y Biolabranza, como parte de una remediación biológica.

OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Monitorear los parámetros (pH, temperatura, y humedad) en un proceso de remediación de suelos contaminados, en donde se utilizó un tren de tratamiento Químico (surfactante) – Biológico (Composteo y biolabranza).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO

- Conocer el proceso de Composteo y Biolabranza, a través de investigación bibliográfica.
- Conocer la importancia de los parámetros (temperatura, pH y humedad) en el control del proceso de tratamiento biológico (*Composteo y biolabranza*).
- Conocer las características de diseño de una celda de tratamiento.
- Monitorear y controlar los parámetros de temperatura, pH y humedad de la biopila (as) de compostaje.
- Monitorear los niveles de hidrocarburos totales del petróleo (TPH's).
- Obtener el porcentaje de remoción de la contaminación del suelo tratado.

PROBLEMAS A RESOLVER

La cantidad de suelos contaminados (recortes de perforación) con hidrocarburos en la región que demandan de un tratamiento efectivo y económico.

ALCANCES Y LIMITACIONES

1. Conocer las actividades que desarrolla la empresa CEI S.A. de C.V.
2. Conocer las normas establecidas sobre los límites máximos permisibles de niveles de limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos.
3. Conocer ampliamente el manejo de suelos contaminados provenientes de recortes de perforación.
4. Monitoreo (temperatura, humedad, pH y TPH's) de una biopila.

CAPÍTULO I

**ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA COMUNICACIONES Y
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL S.A. DE C.V.**

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La empresa consta con más de 20 años de antigüedad, en sus inicios se dedicó a trabajar en el área de comunicaciones y electrónica (de lo cual se emiten sus siglas), Tras el accidente ocasionado en el municipio de Nanchital, el 24 de Diciembre de 2004, la empresa cambia de giro y se dedica al área de protección ambiental. Del cual, hasta el día de hoy, realiza trabajos para diversas compañías estatales y paraestatales, tal es el caso de PEMEX, Terminal Marítima, particulares, etc.

La empresa establece a partir de esto un nuevo giro comercial, con miras a la protección ambiental y gestión de residuos sólidos industriales, actualmente se tiene en marcha proyectos de tratamiento de aguas industriales.

1.2 UBICACIÓN GENERAL Y ESPECÍFICA DE CEI S.A. DE C.V.

La empresa CEI S.A. de C.V. se localiza en la parte sur del estado de Veracruz, en el municipio de Cosoleacaque, Ver. (Figura 1.1)



Figura. 1.1 Ubicación general de la empresa CEI S.A. de C.V.

La ubicación específica se encuentra en las coordenadas, 18° 01' 20. 78 N (Figura 1.2)



Figura. 1.2 Ubicación específica de la empresa CEI S.A. de C.V.

CEI S.A. de C.V. cuenta con oficinas administrativas ubicadas en: Prolongación de Hidalgo No. 1614 P/B. Col. Benito Juárez Norte, Coatzacoalcos, Ver. Y lleva a cabo las actividades operativas en: Camino a la Industria Fenoquímica expredio Encino Gordo, Cosoleacaque, Ver. Ubicación general y específica comentada anteriormente.

1.3 ORGANIGRAMAS

En la figura 1.3 se representa el organigrama del área general de la empresa CEI S.A. de C.V. y en la figura 1.4 se contempla la gerencia general y los niveles subsecuentes ocupados por superintendencias y operadores.

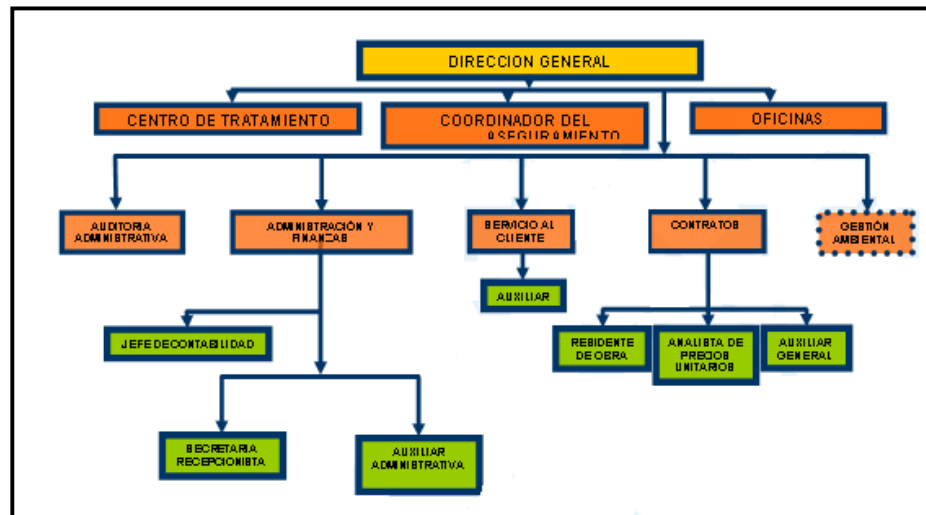


Figura 1.3 Organigrama general de CEI S.A. de C.V

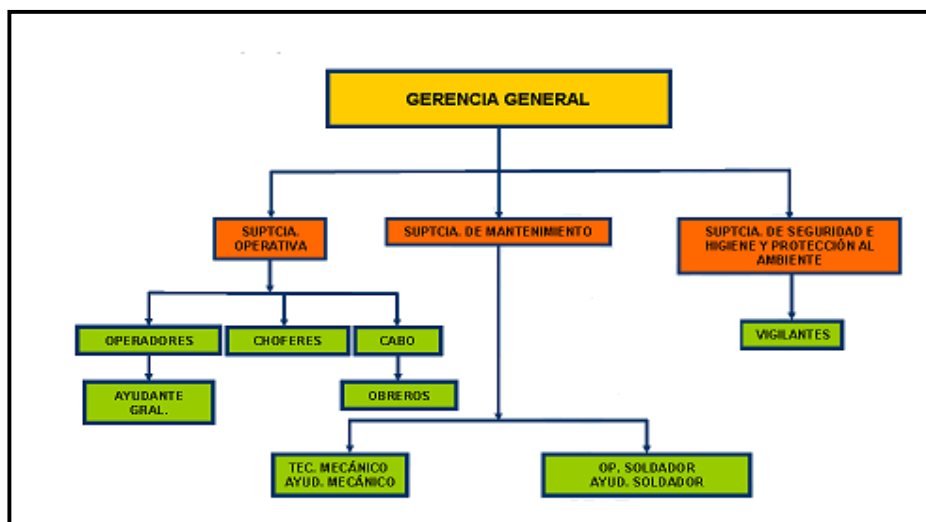


Figura 1.4 Organigrama del centro de tratamiento

1.4 GIRO DE CEI S.A. DE C.V.

CEI S.A. es una empresa dedicada al manejo integral de residuos industriales peligrosos y de manejo especial, con diferentes tecnologías como son: (*in-situ*, *ex-situ* y *on-site*); además de dar atención a emergencias en caso de fugas o derrames de hidrocarburos.

1.5 POLÍTICAS Y REGLAS

VALORES

- Trabajo en equipo:

Estamos concientes de que el hecho de trabajar en equipo nos da un mayor valor agregado a nuestro trabajo. La comunicación clara y oportuna nos lleva a lograr las metas deseadas a un mejor tiempo posible.

- Responsabilidad:

Debemos de ser responsables de cada una de las actividades que uno realiza y estar concientes de las consecuencias que éstas nos traigan.

- Honestidad:

Nuestra honradez se muestra en cada acto que nosotros realizamos dentro de la empresa, así como cada uno de nuestros compañeros de trabajo, clientes y proveedores.

- Calidad:

Cada una de nuestras actividades diarias de nuestro trabajo debemos realizarlas con la calidad, confiabilidad y mejora continua para satisfacción de nuestros clientes internos y externos.

- Lealtad:

Evitamos mediante nuestros actos traicionar la confianza que nos brinda nuestra empresa y compañeros de trabajo.

- Productividad:

Mediante indicadores de desempeño realizamos mediciones a nuestros procesos claves para detectar áreas de oportunidad y mejorar los procesos.

- Respeto al medio ambiente:

Estamos comprometidos a respetar el medio ambiente, fomentando diariamente la cultura de reducir, reusar y reciclar los residuos generados en todos nuestros procesos, y así evitar los efectos negativos a nuestro entorno ecológico.

- Política de calidad:

Es política de nuestra empresa, mejorar continuamente los servicios ambientales que ofrecemos a la industria privada y gubernamental empleando eficaz y eficientemente los mejores recursos humanos que cuenten con la capacidad técnica, herramientas y equipos adecuados.

Para cumplir con este compromiso quienes laboramos en esta empresa hemos decidido implementar y desarrollar en todos nuestros procesos un sistema de gestión de calidad conforme a la norma ISO-9001-2000

1.6 MISIÓN Y VISIÓN DE CEI S.A. DE C.V.

MISIÓN:

Contribuir cada día al mejoramiento ambiental consolidando una empresa rentable para sus accionistas, proveedores, personal y entorno social dentro de un marco de calidad integral y conforme a las normas aplicables a los servicios que ofrecemos.

VISIÓN:

Ser la empresa líder a nivel nacional en el ámbito de protección ambiental.

1.7 CARACTERÍSTICAS DEL LABORATORIO DE CEI S.A. DE C.V.

Como se ha mencionado, la empresa CEI S.A. de C.V. tiene el área operativa en el municipio de Cosoleacaque, Ver. En el lugar se cuenta con un Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas de CRETl y el área donde se hacen los tratamientos de remediación que son: biorremediación, fitorremediación, biolabranza

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS DE LA REMEDIACIÓN DE SUELOS

En la legislación mexicana se entiende como “remediación de suelos, al conjunto de acciones necesarias para recuperar y reestablecer sus condiciones, con el propósito de que éste será destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable para la zona respectiva”. (NOM-138-SEMARNAT-2003)

En la citada norma, el término remediación se utiliza como sinónimo de restauración, reversión, saneamiento, limpieza, rehabilitación y regeneración (Figura. 2.1).



Figura. 2.1 Saneamiento (remediación) de suelo contaminado.

Remediación, es el conjunto de operaciones realizadas con el objetivo de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes presentes. (Ingeniería y Gerenciamiento ambiental).

“El término tecnologías de remediación, implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado”. (Alexander, M. 1994)

El concepto de “degradación, es el proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios”. (Carlos Dorrornosco. 2009).

“La biodegradación es una transformación catalizada biológicamente de un compuesto a formas más simples”. (Jim Field. 1995).

El concepto de biodegradabilidad se refiere a “la capacidad de una sustancia para ser descompuesta en otras más simples por la acción de seres vivos, en particular bacterias. Por ejemplo, el vidrio tarda 1000 años en descomponerse en el mar, un bote de aluminio entre 500 y 700 años en un monte, y los metales pesados como el mercurio no son biodegradables”. (Compilado por el equipo docente de Ecología Humana, UNED, 2003.)

Por otra parte, la biodisponibilidad es el grado en que una sustancia llega a su sitio de acción, o a un líquido biológico desde el cual tiene acceso a dicho sitio. Por ejemplo, las sales minerales del suelo deben ser solubles para que las plantas puedan absorberlos. También hay sustancias que disminuyen la absorción de sustancias: Los fitatos disminuyen la absorción de hierro y otros minerales. (Bruton y Cols. Goodman & Gilman. 2004)

Ahora bien, las pruebas de tratabilidad son una opción sumamente recomendable antes de poner en práctica una metodología de remediación; debe recordarse que cada caso es diferente, por lo que, lo que se haya aplicado en un lado no significa que vaya a resultar adecuado para otro sitio.

Las pruebas de tratabilidad tienen como objetivo desarrollar información sobre la efectividad de la remediación para el contaminante y el medio contaminado específicos y para optimizar los parámetros del proceso.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

Las tecnologías de remediación tiene diferentes clasificaciones pueden ser de acuerdo a:

2.2.1 Clasificación de las tecnologías de remediación de acuerdo a la estrategia de remediación

Las técnicas de remediación se pueden agrupar en tres grandes categorías:

1. Inmovilización.- Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos. Ejemplo. Estabilización/Solidificación, Confinamiento Ex-Situ ó In-situ, microencapsulación
2. Movilización.- En este proceso los contaminantes presentes en suelos, sedimentos o residuos sólidos pueden removerse de la matriz sólida a través de su disolución en una fase acuosa, para su posterior concentración con el suelo de estrategias de bombeo-tratamiento. Entre las tecnologías que pueden clasificarse dentro de estos procesos, se encuentran: lavado e inundación de suelos, extracción química y bio-lixiviados.
3. Destrucción.- Implica la eliminación del material contaminante empleando un tratamiento biológico o uno no biológico. Los tipos de residuos que pueden ser destruidos son los orgánicos; mientras que los inorgánicos no pueden ser destruidos, solo se puede cambiar su estado de oxidación o de combinación con otras sustancias.

2.2.2 Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo al sitio donde se realiza.

Para enfrentar la recuperación de los ambientes contaminados por la incorporación de residuos tóxicos, particularmente en suelos y aguas, tanto

superficiales cómo subterráneas, existen diversas tecnologías, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas.

De acuerdo al lugar donde se realiza el tratamiento de remediación, éstas pueden ser:

- *In situ*: el tratamiento se realiza en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.
- *Ex situ*: en este caso se requiere realizar una excavación, dragado ó cualquier otro proceso, para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento, que puede realizarse en el mismo sitio (*on-site*) o fuera de él (*off-site*).

En la tabla 2.1 se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de ambos tipos de tecnología.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación *in situ* y *ex situ*.

	In-situ	Ex-situ
Ventajas	Menor tiempo de tratamiento Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente	Menor tiempo de tratamiento Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente
Desventajas	Necesidad de excavar el suelo Aumento en costos e ingeniería para equipos Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante	Necesidad de excavar el suelo Aumento en costos e ingeniería para equipos Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante

2.2.3 Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo al tipo de tratamiento

Tipos de tratamiento. Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento.

- Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
- Tratamientos fisicoquímicos. Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
- Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

En la tabla 2.2 se muestran las principales ventajas y desventajas del uso o aplicación de los métodos biológicos, fisicoquímicos y térmicos.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo al tipo de tratamiento.

	Ventajas	Desventajas
Tratamientos biológicos	<ul style="list-style-type: none">- Son efectivos en cuanto a costos- Son tecnologías más benéficas para el ambiente- Los contaminantes generalmente son destruidos- Se requiere un mínimo o ningún tratamiento	<ul style="list-style-type: none">- Requieren mayores tiempos de tratamiento- Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos- No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano

	posterior	
Tratamientos fisicoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> - Son efectivos en cuanto a costos - Pueden realizarse en periodos cortos - El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería 	<ul style="list-style-type: none"> - Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos - Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación
Tratamientos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> - Permite tiempos rápidos de limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> - Es el grupo de tratamiento más costoso. - Los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo. - Intensivos en mano de obra y capital.

2.3 TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS

La remediación biológica (biorremediación) es el proceso mediante el cual se utilizan microorganismos (Figura. 2.2). o las enzimas de los mismos para eliminar contaminantes tóxicos del medio ambiente. Los procesos de biorremediación se utilizan en aplicaciones tales como la remediación de las aguas freáticas y la remediación del suelo. Los microbios descomponen los hidrocarburos, convirtiéndolos en agua, dióxido de carbono y aminoácidos que son naturales e inócuos.



Figura 2.2 Preparación y remoción del suelo para biorremediación

Los microorganismos participantes son principalmente bacterias, y en menor medida, hongos nativos (filamentosos y levaduras) y algas. Éstos son capaces de degradar una amplia variedad de sustratos orgánicos que además se encuentran presentes en casi todas las superficies materiales.

Muchos contaminantes tienen estructuras similares a las presentes en compuestos naturales y es por ello que son fácilmente degradados por los microorganismos del suelo y del agua. Sin embargo, existen otros compuestos con estructuras o sustituyentes más complejos de origen xenobiótico, que son difícilmente catabolizados (compuestos recalcitrantes, dado que se acumulan y persisten en la naturaleza).

Existen diversas opiniones en relación a si los microorganismos tienen límites en sus capacidades digestivas o si son capaces de degradar cualquier compuesto que el hombre pueda producir. Indudablemente, la verdad se sitúa entre estos dos puntos de vista extremos. No obstante los microorganismos pueden degradar multitud de compuestos bajo condiciones diferentes. Muchos compuestos sintéticos pueden también modificarse o transformarse mediante el uso de una bacteria, hongo o de algún tipo de población microbiana trabajando en asociación. Estos procesos varían desde la putrefacción de comida hasta la limpieza de derrames de petróleo en las playas costeras. En muchos casos estos procesos son beneficiosos y esenciales.

Después de todo, gran parte del proceso cíclico, orgánico e inorgánico, necesario para el mantenimiento del ecosistema es consecuencia de la actividad microbiana. Además de poder modificar o degradar un compuesto, el rendimiento tiene que ser alto.

- Degradación enzimática:

Este tipo de degradación consiste en el empleo de enzimas en el sitio contaminado con el fin de degradar las sustancias nocivas. Estas enzimas se obtienen en cantidades industriales por bacterias que las producen naturalmente, o por bacterias modificadas genéticamente que son comercializadas por las empresas biotecnológicas.

Otras enzimas que rompen polímeros utilizados de forma similar son las celulasas, proteinazas y amilasas, que degradan celulosa, proteínas y almidón, respectivamente. Además de hidrolizar estos polímeros, existen enzimas capaces de degradar compuestos altamente tóxicos. Estas enzimas son utilizadas en tratamientos en donde los microorganismos no pueden desarrollarse debido a la alta toxicidad de los contaminantes. Por ejemplo, se emplea la enzima peroxidasa para iniciar la degradación de fenoles y aminas aromáticas presentes en aguas residuales de muchas industrias.

- Remediación microbiana

En este tipo de remediación se usan microorganismos directamente en el foco de la contaminación. Los microorganismos utilizados en biorremediación pueden ser los ya existentes (autóctonos) en el sitio contaminado o pueden provenir de otros ecosistemas, en cuyo caso deben ser agregados o inoculados. La descontaminación se produce debido a la capacidad natural que tienen ciertos organismos de transformar moléculas orgánicas en sustancias más pequeñas, que resultan menos tóxicas.

- Remediación con plantas (fitorremediación)

La fitorremediación es el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados. Aunque se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos.

2.3.1 Aplicaciones, ventajas, desventajas y limitaciones de la biorremediación

APLICACIONES:

- Se puede utilizar para atacar algunos contaminantes específicos, como los pesticidas clorados que son degradados por bacterias, o bien, de forma más general como el caso de los derrames de petróleo, que se tratan empleando varias técnicas, incluyendo la adición de fertilizantes para facilitar la descomposición del crudo por las bacterias.
- Biorremediación intrínseca: se deja que el propio ambiente natural resuelva el problema si se determina que en el propio ambiente hay las poblaciones y condiciones óptimas (temperatura, pH, nutrientes etc.).
- Biorremediación in-situ: se intenta acelerar el proceso en el mismo ambiente modificando las condiciones ambientales o por inoculación microbiana.
- Biorremediación ex-situ: consiste en extraer el contaminante y degradarlo en otro sitio en condiciones controladas de laboratorio. Evidentemente la mayoría de veces no se puede hacer porque es un proceso más caro.

VENTAJAS:

- Si se utiliza correctamente, no produce efectos adversos significativos, ya que apenas genera cambios físicos en el medio.

- Es más barato que otras técnicas anticontaminación, especialmente cuando se trata de eliminar residuos de difícil acceso, como por ejemplo los derrames de gasolina, que pueden contaminar el agua subterránea.
- Este sistema está llevado a que sea cada vez más utilizado y que se invierta más en su desarrollo.
- Ofrece una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas
- Es menos costosa que otras tecnologías.
- Efectividad en la remoción de contaminantes (los cuales pueden ser eliminados o transformados en productos inocuos).
- Casi no se necesita tratamiento posterior y, lo que es muy importante, es mínimo el impacto en el ecosistema involucrado.
- Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos contaminados.
- Algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos.
- Es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.

DESVENTAJAS:

- Metales pesados como el cadmio o el plomo no son absorbidos o lo son muy dificultosamente.
- El mercurio es bioacumulado, lo que supone un grave riesgo para la cadena alimenticia.
- Los pesticidas artificiales llevan moléculas que son reconocidas como nutrientes por los microorganismos.
- Estos sistemas necesitan bastante tiempo para que actúen.
- Se requiere conocer al detalle las características del vertido así como las condiciones ambientales, lo que puede suponer que un proceso que funciona en laboratorio falle en la naturaleza.
- El tiempo necesario para actuación es largo

- Su implementación es específica para cada lugar contaminado.
- Su optimización requiere información sustancial acerca del lugar contaminado y las características del vertido.
- El tiempo requerido para completar la degradación es mayor que en los tratamientos físico químicos.
- No siempre se puede predecir la efectividad.
- El éxito del proceso depende de la destreza para mantener las condiciones óptimas para el crecimiento microbiano.

LIMITACIONES:

- Tipo de contaminante y su concentración.
- Medio ambiente circundante a la contaminación.
- Tipo de suelo.
- Proximidad y condición de napas.
- Naturaleza del microorganismo.
- Relación costo/beneficio: costo versus impacto ambiental general.
- Duración del proceso biorremediativo.
- Capacidad limitada de biorremediación.

2.3.2 Parámetros de control en la biorremediación

- Presencia de microorganismos

Los microorganismos pueden degradar hidrocarburos y otras sustancias contaminantes en forma de cultivos puros (especie única) o cultivos mixtos (varias especies que mantienen una relación simbiótica). Cuando se trata de este último caso, el tratamiento biológico implica una compleja interacción de especies microbianas. La velocidad de crecimiento y la utilización de sustratos es generalmente superior en cultivos mixtos que en cultivos puros. En una mezcla de poblaciones los consumidores primarios inician el proceso de degradación y los

consumidores secundarios utilizan los productos metabólicos de los primeros para degradarlos.

Además pueden facilitar el crecimiento de los primarios, suministrándoles productos metabólicos (como factores de crecimiento), eliminando tóxicos mediante cometabolismo y produciendo intercambio de material genético. Si bien la mayor parte de las sustancias orgánicas son degradables por vía biológica, existe una gran cantidad de compuestos que resisten la biodegradación (se los denomina recalcitrantes) o ésta ocurre tan lentamente que hace ineficaz el tratamiento biológico en forma práctica.

Sin embargo, se han logrado aislar microorganismos capaces de degradar compuestos considerados recalcitrantes, o de modificarlos químicamente de forma que permitan la acción degradadora de otros microorganismos.

Para el caso del tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos se requiere una concentración mínima de microorganismos degradadores específicos de 10^3 a 10^4 UFC/g suelo (UFC: unidades formadoras de colonias) y de microorganismos heterótrofos totales de 10^5 a 10^6 UFC/g de suelo.

En estos casos generalmente no se necesita inoculación. Si esta masa crítica no es suficiente se pueden incorporar microorganismos al suelo mediante inoculación o a través del proceso conocido como bioaumentación. También se puede lograr un incremento importante estimulando la población microbiana existente por incorporación de nutrientes.

Inoculación. Este proceso incorpora microorganismos al suelo para realizar una función específica, como es la degradación de contaminantes. Los microorganismos pueden ser comerciales o preparados para un fin específico. La inoculación se usa cuando los microorganismos del suelo no pueden degradar el contaminante presente, o cuando se producen inhibición por presencia de sales o metales pesados

o cuando no alcanzan la masa crítica necesaria. Como desventaja, los microorganismos inoculados pueden desplazar a los existentes en el suelo por competición y lograr poco efecto degradativo (detener el proceso) o bien pueden no adaptarse a las condiciones ambientales del lugar. También puede ocurrir que no puedan competir con los microorganismos locales y el efecto es nulo.

Bioaumentación. Este proceso implica incrementar drásticamente la masa microbiana del suelo mediante la adición de microorganismos similares a los presentes en el suelo obtenidos mediante cultivo en reactores biológicos. Los microorganismos se obtienen del suelo contaminado del lugar. En laboratorio se definen los consorcios microbianos más adecuados en base a tolerancia a sales y sustancias inhibitoras y también a la capacidad de degradación de hidrocarburos. De esta forma se pueden tener consorcios que actúan en forma simbiótica y que resisten concentraciones de 10 % de crudo en medio líquido (sin restricciones de transferencia de masa) hasta un 13 % de Na y Cl. Una vez obtenido el consorcio más adecuado se produce una masa importante de microorganismos y se llevan a campo para reforzar la actividad de los que ya existen en el mismo. En algunos casos, dependiendo del tipo de contaminante presente, puede ser necesario inocular varias veces.

Cometabolismo. Se da en casos de sustratos complejos donde los microorganismos consumen un compuesto y producen enzimas para transformar otro compuesto, sobre el que no pueden crecer, en uno asimilable por su metabolismo.

- Nutrientes

Los nutrientes son sustancias químicas necesarias para el desarrollo de los microorganismos y se pueden dividir en cuatro grupos: fuentes de Carbono, Fósforo, Nitrógeno y oligoelementos o elementos minoritarios (micronutrientes). La fuente de carbono en éste caso es el contaminante, y proporciona el carbono necesario para producir compuestos celulares, productos metabólicos (CO₂, agua, enzimas) y

microorganismos (debido a la reproducción de los mismos). La fuente de Nitrógeno proporciona el elemento necesario para la producción de aminoácidos y enzimas. Dado que la utilización de estos compuestos es muy rápida los suelos no alcanzan a cubrir todas las necesidades del proceso y deben ser incorporados bajo la forma de fertilizantes de uso agrícola como urea o sulfato de amonio. También se pueden utilizar fertilizantes de origen orgánico como estiércol.

- Aireación

La presencia de oxígeno es importante para la degradación de hidrocarburos, ya que es un proceso aeróbico, si bien se han realizado procesos anaeróbicos exitosos a baja velocidad. En el caso de algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos puede ser necesaria una etapa anaerobia para realizar el proceso de degradación. En caso de otros tipos de contaminantes la forma más adecuada de degradarlos es la anaeróbica (caso de los PCB: policloruro de bifenilo) seguida de una etapa aeróbica para degradar los productos parcialmente tratados en la etapa anterior. Hay que destacar que en todos los casos el proceso anaeróbico es más lento que el aeróbico. En los procesos de campo la aireación se produce por remoción del suelo con herramientas agrícolas. Estos tratamientos responden de diferente manera de acuerdo a la frecuencia de remoción.

- Condiciones ambientales.

El pH del suelo es importante para el desarrollo de los microorganismos degradadores, siendo los más adecuados los comprendidos entre 6 y 8. Cuando el pH excede 8 se debe disminuir el mismo mediante adición de azufre al suelo. Si es menor de 6 se puede incrementar mediante la incorporación de carbonato de calcio o hidróxido de calcio al suelo. En todos los casos de modificación del pH del suelo se deben realizar ensayos previos para definir la masa a incorporar de azufre o carbonato según el caso. Cuando se encuentran metales pesados en el terreno a muy altas concentraciones se debe trabajar a un pH que mantenga el metal

inmovilizado o en forma no soluble (pH alto), para disminuir la toxicidad de los microorganismos. En estos casos es conveniente evaluar la posibilidad de trabajar a pH distintos de los óptimos para evitar efectos tóxicos. Se han registrado procesos de biodegradación de hidrocarburos a pH superior a 8.

Humedad. El agua es importante para el desarrollo de los microorganismos ya que actúa como medio de transporte de nutrientes y oxígeno a la célula. Es conveniente mantener una humedad del orden del 70 % de la capacidad de campo, la cual se define como la masa de agua que admite el suelo hasta la saturación, que depende de cada tipo de suelo. Un exceso de humedad produce inhibición del proceso por anaerobiosis. Un déficit impide el desarrollo de los microorganismos.

Temperatura. La temperatura influye en la velocidad de degradación marcadamente, dependiendo del tipo de microorganismos disponibles. Normalmente las temperaturas más adecuadas se encuentran entre 20 °C y 40 °C, (los microorganismos que trabajan a estas temperaturas se denominan mesófilos). La velocidad de degradación aumenta con la temperatura, por lo que un incremento de la misma es útil. Cuando supera los 40 °C se produce una disminución de la actividad microbiana, o bien se produce una rotación poblacional hacia especies más resistentes a las altas temperaturas, como ocurre en los procesos de compostaje en donde se alcanzan temperaturas de 65 °C. Durante el cambio de poblaciones se produce una disminución de la actividad microbiana. Las velocidades de degradación disminuyen pero no se detienen.

2.4 COMPOSTAJE

El compostaje o composteo es un proceso biológico controlado (Figura 2.3), por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables, gracias a la acción de diversos microorganismos.

El compost o mantillo se puede definir como el resultado de un proceso de humificación de la materia orgánica, bajo condiciones controladas y en ausencia de suelo. El compost es un nutriente para el suelo que mejora la estructura y ayuda a reducir la erosión y ayuda a la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.



Figura 2.3 Proceso biológico de composteo

2.4.1 Aplicaciones, ventajas, desventajas, limitaciones y propiedades del compostaje

APLICACIONES:

- El composteo se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con pentaclorofenol (PCP), gasolinas, hidrocarburos poliaromaticos (HTP's), hidrocarburos totales del petróleo (HAP's).
- Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y toxicidad de explosivos, trinitrotolueno (TNT). El uso de estrategias de composteo se ha adoptado seriamente hasta los últimos 3 a 5 años

VENTAJAS:

- Se aprovechan los residuos orgánicos y se obtendrá un producto útil al suelo.

- Proporciona equilibradamente nutrientes al suelo y plantas.
- Mejora la calidad biológica de los alimentos.
- No hay contaminación del ambiente durante el proceso.
- El producto final puede comercializarse.
- Se reduce la cantidad de residuos que tiene que recogerse, transportarse y enterrarse en los rellenos sanitarios.
- Se respeta el ciclo biológico natural.

DESVENTAJAS:

- En el transcurso del proceso se pueden producir gases con olores desagradables si el proceso no es bien dirigido.
- Se requiere de espacio y organización.
- Puede producirse contaminación de aguas por arrastre de las sustancias más solubles. (Esto puede atenuarse dejando crecer vegetación en los bordes de las pilas).

LIMITACIONES:

- Necesidad de espacio
- Necesidad de excavar el suelo contaminado, lo que puede provocar incremento volumétrico del material a tratar
- No pueden tratarse metales pesados

PROPIEDADES:

- Mejora las propiedades físicas del suelo. La materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad, y aumenta su capacidad de retención de agua en el suelo. Se obtienen suelos más esponjosos y con mayor retención de agua.

- Mejora las propiedades químicas. Aumenta el contenido en macronutrientes N, P,K, y micronutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) y es fuente y almacén de nutrientes para los cultivos.
- Mejora la actividad biológica del suelo. Actúa como soporte y alimento de los microorganismos ya que viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización.

2.4.2 Compostaje como estrategia de biorremediación

El composteo es un proceso biológico mediante el cual es posible convertir residuos orgánicos en materia orgánica estable (composta madura), gracias a la acción de diversos microorganismos. Las aplicaciones más comunes del composteo incluyen el tratamiento de residuos agrícolas, de desechos de jardinería y cocina, de residuos sólidos municipales y de lodos. Sin embargo, desde hace varios años, investigaciones a nivel laboratorio, piloto y a gran escala, han demostrado que el proceso de composteo, así como el uso de composta madura, es una solución de bajo costo y tecnológicamente efectiva para remediar suelos contaminados por residuos orgánicos peligrosos como los hidrocarburos totales del petróleo (HTP), solventes, explosivos, pesticidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

Los principios básicos del composteo de residuos peligrosos o contaminantes orgánicos, son los mismos que para el composteo de desechos no peligrosos. En ambos casos, es necesario optimizar cinco parámetros: la aireación, la temperatura, el contenido de humedad, la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el pH. Debido a que los contaminantes orgánicos comúnmente no se encuentran en concentraciones suficientes para soportar un proceso de composteo, el material contaminado debe mezclarse con sustancias orgánicas sólidas biodegradables como aserrín, paja, bagazo, estiércol, composta madura y desechos agrícolas.

Estos materiales son conocidos como agentes de volumen y se utilizan en el proceso de composteo con tres finalidades básicas: a) asegurar la generación del calor necesario para el proceso; b) mejorar el balance y disponibilidad de nutrientes (C/N) para la actividad microbiana y c) aumentar la porosidad de la composta y con esto la aireación y capacidad de retención de agua.

2.4.3 Sistemas de composteo

En la práctica y en general una de las tecnologías de composteo más utilizada para el tratamiento de extensas áreas de suelos contaminados, principalmente por HTP's, se lleva a cabo en condiciones aerobias y se conoce como biopilas, bioceldas o pilas de composteo. Las biopilas, son una forma de composteo en el cual se forman pilas con el suelo contaminado y agentes de volumen. El sistema, que puede ser abierto o cerrado, se adiciona con nutrientes y agua y se coloca en áreas de tratamiento, que incluyen sistemas para coleccionar lixiviados y alguna forma de aireación.

La elección del tipo de sistema de biopilas depende principalmente de las condiciones climáticas y de la estructura de los compuestos orgánicos volátiles presentes en el suelo contaminado. Generalmente las biopilas se diseñan como sistemas cerrados, ya que éstas permiten mantener la temperatura y evitan la saturación de agua debido a lluvias, además de disminuir la evaporación de agua y de compuestos orgánicos volátiles.

Dos de los sistemas de biopilas más empleados son las biopilas alargadas y las biopilas estáticas. La diferencia entre ambas tecnologías radica en el método de aireación que se emplea para proveer de oxígeno al proceso de composteo.

- Biopilas alargadas.

El sistema de biopilas alargadas es el proceso de composteo más económico y sencillo. En éstas, el material a compostear se apila sobre una plataforma en montones largos. En este tipo de biopila, la aireación se realiza mediante el mezclado manual o mecánico de la composta, proceso que a su vez permite homogeneizar la temperatura. El mezclado de la composta proporciona una mayor distribución y facilita la biodegradación de los contaminantes, ya que permite la homogeneización de los nutrientes, agua, aire, contaminantes y microorganismos. La frecuencia del mezclado de la pila depende de la actividad microbiana, que generalmente puede determinarse por el perfil de la temperatura en la composta (figura 2.4), que puede realizarse una vez al día o bien una vez al mes.

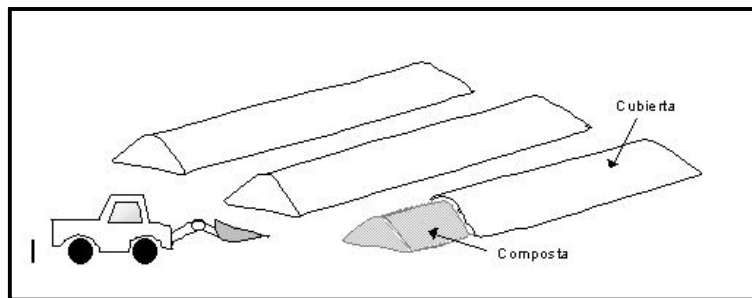


Figura 2.4 Representación esquemática de un sistema de biopilas alargadas.

- Biopilas estáticas.

A diferencia de las anteriores, las biopilas estáticas no necesitan mezclarse mecánicamente, ya que la aireación y homogeneización del calor en la composta se lleva a cabo por medio de un sistema de inyección (compresor) o extracción (vacío) de aire, mediante tubos colocados en la base alineados paralelamente a lo largo de la pila (figura 2.5). En las biopilas estáticas, normalmente se emplea un sistema de extracción de aire, ya que ello permite la captura de los vapores de cierta fracción de compuestos orgánicos volátiles que llegan a ser removidos del suelo contaminado durante el proceso de aireación. Estos vapores son enviados a un sistema de biofiltración u oxidación catalítica para su tratamiento.

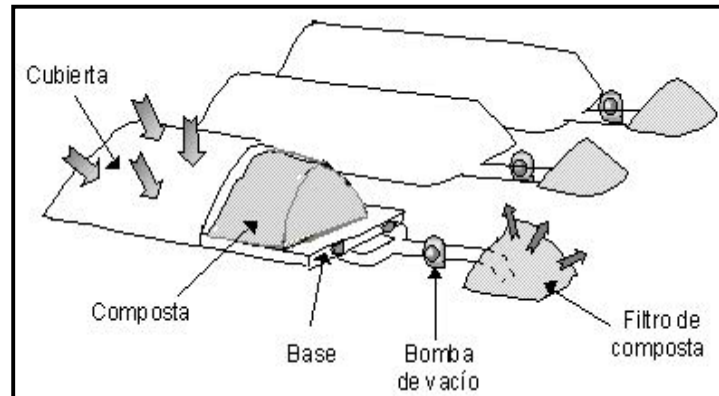


Figura 2.5 Representación esquemática de un sistema de biopilas estáticas.

El uso de un sistema de inyección o extracción de aire en este tipo de biopila, permite el control manual o automático de la velocidad del flujo de aire que provee de oxígeno al proceso de composteo, permitiendo así establecer una relación entre el flujo de aire y la actividad microbiana a través del tiempo.

2.4.4 Etapas del proceso de compostaje

De acuerdo con las características del proceso de composteo (Figura. 2.6), en la etapa inicial es necesaria una aireación eficiente (alto flujo de aire), debido a que en esta etapa existe una acelerada actividad microbiana. Este aumento en la actividad microbiana provoca un aumento en la demanda de oxígeno y un rápido aumento en la generación de calor metabólico, produciéndose temperaturas que se elevan hasta un rango termófilo (50 a 60 °C). Sin embargo, generalmente durante el composteo de suelos contaminados adicionados con agentes de volumen, el estado termófilo usualmente no se logra, por lo tanto, la temperatura no excede a los 45 °C.

Después de un cierto tiempo la actividad microbiana disminuye, debido a que los componentes fácilmente biodegradables son consumidos. En esta etapa el requerimiento de oxígeno y la temperatura disminuyen gradualmente, por lo que la composta requiere una menor aireación (menor flujo de aire), se muestra la relación entre la degradación de compuestos orgánicos (función de la actividad microbiana) y los perfiles de temperatura dentro de la composta a través del tiempo. De acuerdo

con esta relación se puede emplear un programa analógico que regule automáticamente la velocidad de flujo del aire en función de la temperatura que se registra en la composta.



Figura 2.6 Proceso de compostaje de suelo contaminado.

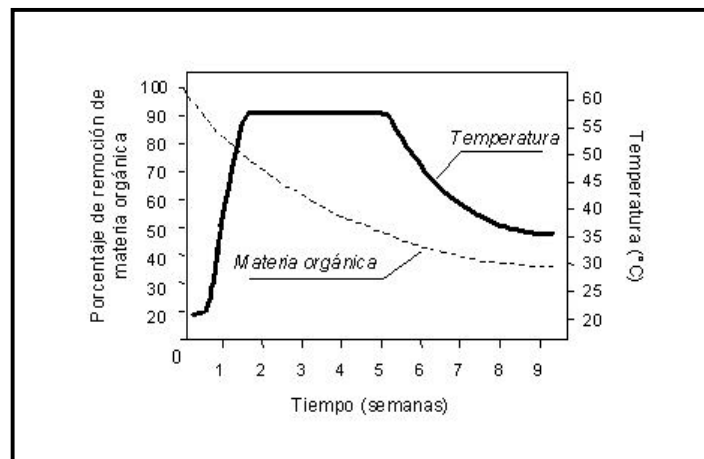


Figura 2.7 Remoción de materia orgánica y perfiles de temperatura durante el proceso de composteo.

El aumento y la caída en el perfil de la temperatura (Figura. 2.7), a menudo pueden usarse para monitorear el desempeño de una pila de composteo. Una vez que la pila se enfría y la temperatura dentro de ésta se aproxima a la temperatura ambiente, el periodo de composteo activo puede considerarse completo. Otras características que indican el éxito de un proceso de composteo, son el cambio en la textura y el olor de la pila en la etapa final. Al inicio del proceso se generan olores fuertes y desagradables, mientras que en la etapa final éstos desaparecen y el olor es parecido al de tierra de jardín. Por su parte, la textura de la mezcla es mucho más homogénea que al inicio. Estos cambios en el olor y textura son el resultado de la

biodegradación de la materia orgánica, que al pasar de forma sólida a gaseosa, da como resultado una reducción en el tamaño de la biopila. Dependiendo de la cantidad de material orgánico mezclado con el suelo, puede esperarse que la masa de la biopila se reduzca hasta en 40%.

2.4.5 Requerimientos y factores importantes para el compostaje

En la siguiente tabla se muestran los factores y observaciones importantes del compostaje (Tabla. 2.3)

Tabla 2.3 *Requerimientos y factores importantes para el compostaje*

FACTOR	OBSERVACIONES
Proporción C:N	Debe ser aproximadamente 5:1, utilizando fertilizantes orgánicos (estiércol, gallinaza) o inorgánicos
Proporción del suelo mineral	La cantidad de material mineral (suelo no orgánico) no debe exceder aprox. del 30% del total de la mezcla
Concentración de hidrocarburos	La concentración de hidrocarburos en la mezcla de suelo y acondicionadores debe ser cerca del 10 % o menor
Acondicionadores	Para obtener las proporciones necesarias de materiales orgánicos deben agregarse materiales como: cachaza o bagazo de caña, residuos de cacao, plátano y café
Aireación	Deben mantenerse condiciones aerobias para la oxidación biológica. Buen sistema de drenaje y aireando el suelo cada tres días con maquinaria ("Wild Cat")
Lixiviados	Sistema de colección de lixiviados, para rehumedecer el material
Temperatura	Mantener de 30 – 55 °C
Humedad	Mantener de 50-75 % de la capacidad de campo
Bacterias nativas	Considerar, si es posible, el uso de bacterias nativas
Manejo	La humedad y la temperatura se controlan en las pilas con lonas plásticas, con monitoreo diario

2.4.6 Factores que condicionan el proceso de compostaje

Para procesar el monitoreo de compostaje es necesario llevar acabo los siguientes factores:

- Temperatura.

Se consideran óptimas las temperaturas del intervalo 35-55 °C para conseguir la eliminación de patógenos, parásitos y semillas de malas hierbas. A temperaturas muy altas, muchos microorganismos interesantes para el proceso mueren y otros no actúan al estar esporados.

- Humedad.

En el proceso de compostaje es importante que la humedad alcance unos niveles óptimos del 40-60 %. Si el contenido en humedad es mayor, el agua ocuparía todos los poros y por lo tanto el proceso se volvería anaeróbico, es decir se produciría una putrefacción de la materia orgánica. Si la humedad es excesivamente baja se disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso es mas lento. El contenido de humedad dependería de las materias primas empleadas. Para materiales fibrosos o residuos forestales gruesos la humedad máxima permisible es del 75-85 % mientras que para material vegetal fresco ésta oscila entre 50-60 %.

- pH.

Influye en el proceso debido a su acción sobre microorganismos. En general los hongos toleran un margen de pH entre 5-8, mientras que las bacterias tienen menor capacidad de tolerancia (pH= 6-7,5)

- Oxígeno.

El compostaje es un proceso aeróbico, por lo que la presencia de oxígeno es esencial. La concentración de oxígeno dependerá del tipo de material, textura, humedad, frecuencia de volteo y de la presencia o ausencia de aireación forzada.

- Relación C/N equilibrada

El carbono y el nitrógeno son los dos constituyentes básicos de la materia orgánica. Por ello para obtener un compost de buena calidad es importante que exista una relación equilibrada entre ambos elementos. Teóricamente una relación C/N de 25:35 es la adecuada, pero esta variaría en función de las materias primas que conforman el compost. Si la relación C/N es muy elevada, disminuye la actividad biológica.

- Población microbiana.

El compostaje es un proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica, llevado a cabo por una amplia gama de poblaciones de bacterias, hongos y actinomicetos. Para la elaboración del compost se puede emplear cualquier materia orgánica, con la condición de que no se encuentre contaminada. Generalmente estas materias primas proceden de:

- Restos de cosechas.
- Las ramas de poda de los frutales.
- Restos urbanos.

2.4.7 Diseño de biopilas

Se definen como un proceso biológico controlado donde los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados. Se utilizan para reducir las concentraciones de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en suelos contaminados, con hidrocarburos. El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad.

2.4.7.1 Factores a considerar en el diseño de una biopila

Las condiciones óptimas y el éxito de un proceso de composteo depende de diversos parámetros, los cuales pueden resumirse en tres categorías: las características del suelo, las condiciones climáticas y las características de los contaminantes.

Los parámetros que deben considerarse y controlarse para aumentar la eficiencia de un proceso de composteo se resumen en la tabla siguiente (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 *Parámetros a considerar y sus rangos óptimos durante un proceso de composteo para el tratamiento de suelos contaminados por compuestos orgánicos*

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO
Humedad	40 -85 %; 50 – 80 % de la capacidad de campo
pH	6 - 8; con un óptimo de 7
Relación de nutrientes (C:N:P:K) _(a)	100:(3.3-10):(0.5-1):(0.1-1)
Relación C/N; C/P; C/K _(b)	10:30; 100:200; 100:1000
Relación suelo: aditivos (peso seco)	1.5:1 a 3:1
Temperatura	25 - 35 °C
Contaminante(s)	< 50,000 mg/kg
Metales tóxicos	< 2,500 mg/kg
Cuenta bacteriana	> 1,000 UFC _(c) /g suelo seco

- a). C:N:P:K se refiere al contenido (en peso) de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en relación con 100 partes (en peso) de carbono (C)
- b). C/N, C/P y C/K se refieren a las relaciones (en peso) de cada elemento relativo al carbono
- c). UFC: unidades formadoras de colonias

Un factor clave en el diseño de un proceso exitoso de composteo radica en la selección de su composición y contenido de aditivos y/o agentes de volumen, lo cual conlleva a un aumento en la velocidad de biodegradación de los contaminantes. Sin embargo, si se emplea una gran cantidad de aditivos, el área necesaria para el tratamiento se incrementa.

Una de las condiciones recomendadas para el empleo de este tipo de tecnología de biorremediación para suelos es el clima cálido, donde el rango de la temperatura oscile entre 20 y 40 °C, ello debido a que estos sistemas requieren temperaturas de operación entre 5 y 40 °C. La temperatura de operación de una biopila, normalmente debe encontrarse entre los 30 y 40 °C (etapa mesófila) o entre 50 y 60 °C (etapa termófila) y depende principalmente del calor generado por la actividad metabólica de los microorganismos en la composta y por las condiciones climáticas del lugar.

De acuerdo con lo anterior, México representa una región idónea para aplicar este tipo de tecnologías ya que aunque cuenta con gran diversidad de climas, el 50.9% del territorio nacional presenta climas identificados como cálido y templado con temperaturas que oscilan entre los 20 °C a 26 °C y 18 °C a 22 °C, respectivamente.

Asimismo, debido a que en las costas y en las regiones bajas del país (Chiapas, Oaxaca, Tampico, Veracruz, Hidalgo, entre otras.) con temperaturas medias anuales entre 25 y 28 °C (máxima de 41 °C), es donde se localiza la mayoría de los sitios contaminados por hidrocarburos del petróleo, como consecuencia de las actividades de la industria petrolera.

2.4.7.2 Etapas para la construcción de una biopila

La construcción de una biopila de composteo (alargada o estática) consiste básicamente en realizar los siguientes pasos.

1. Acondicionamiento de un área que sirva de base para la biopila, cuya dimensión dependerá de la cantidad de suelo a tratar. La base puede ser un suelo arcilloso compactado, concreto o polietileno de alta densidad. Se recomienda la instalación de un sistema de recolección de lixiviados mediante canales o tubos. Los lixiviados pueden ser almacenados en un tanque e incorporados a la biopila mediante un sistema de irrigación.
2. Excavación del suelo contaminado. Se recomienda que antes de realizar esta actividad se lleve a cabo un estudio del sitio para conocer las características del suelo y del contaminante a tratar.
3. Transportación del suelo al sitio de tratamiento. Es recomendable que éste se encuentre lo más cercano posible al sitio en donde se localiza el suelo contaminado.
4. Acondicionamiento de la biopila. En esta fase, deben adicionarse los agentes de volumen, así como los nutrientes y agua necesarios. En algunos casos se recomienda la adición de microorganismos con capacidades metabólicas para degradar al (los) contaminante (s). Para el caso de suelos intemperizados, se recomienda la adición de surfactantes para facilitar la desorción de los contaminantes.
5. Instalación del sistema de aireación. En el caso particular de las biopilas estáticas es necesario que antes de formar la biopila, se instale el sistema de aireación sobre la base.

6. Mezclado del suelo y colocación del material sobre la base. No existe una medida idealmente establecida para el largo y ancho de las pilas, esto generalmente depende del volumen de suelo a tratar y del área disponible. En el caso de biopilas estáticas, se recomienda que no excedan los 2.5 m de altura, con el fin de evitar problemas de difusión del aire a través de la composta.

7. Finalmente la biopila debe cubrirse con un material inerte (grava, aserrín, polietileno de baja densidad, entre otros). En el caso de las biopilas estáticas, se requiere de la instalación de tubos de respiración.

2.4.7.3 Optimización del proceso de compostaje por biopila

Con la finalidad de optimizar la operación de la biopila, es recomendable realizar el monitoreo y análisis rutinario del suelo contaminado durante el periodo de tratamiento. Las pruebas que generalmente se realizan son de dos tipos: a) fisicoquímicas que incluyen determinaciones de pH, temperatura, contenido de humedad y de nutrientes, concentración de oxígeno en el interior de la composta y concentración del (los) contaminante (s) y b) biológicas que sirven para cuantificar la población y actividad microbiana, así como la capacidad de biodegradación de los contaminantes presentes en el suelo. En las biopilas estáticas con sistema de inyección o extracción de aire, se puede determinar la actividad microbiana durante el tiempo real del proceso de composteo, mediante la medición del consumo de oxígeno o por la producción de bióxido de carbono en el vapor de salida de la biopila. Es recomendable realizar esta medición al menos en los primeros tres meses del tratamiento.

El resultado de estos análisis es de gran importancia para determinar el estado en el que se encuentra la biopila, lo que permite ajustar cada parámetro hasta obtener las condiciones óptimas de operación. De esta manera, es posible ajustar el pH, las velocidades del flujo de inyección o extracción de aire, el mezclado de la composta,

la adición de agua, nutrientes y, en algunos casos, microorganismos exógenos adaptados para degradar cierto tipo de contaminantes. Véase en la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Resumen de los resultados de algunos estudios realizados a escala piloto y gran escala, donde se han aplicado procesos de composteo para la biorremediación de suelos contaminados por HTP.

Tipo de biopila	Suelo (m3)	Contaminante y concentración inicial	Tiempo (días)	Remoción (%)	Referencia
Alargada	100	HTP: 20,000 ppm	104	43	Abiola et al. 1997
Estática				50	
Alargada	500	HTP: 40,000 ppm	450	70	Hiroyuki et al. 1999
Estática	250	HTP: 20,000 ppm			
Alargada	0.4	Diesel: 50,000 ppm	45	94	Cunningham y Philip 2000
Estática					
Estática	27	HTP: 30,000 ppm	154	80	Iturbe et al., 2002

2.5 BIOLABRANZA

Es una tecnología para la biorrecuperación de suelos que puede ser utilizada para descontaminación tanto “*in situ*” como “*ex situ*”, y consiste en provocar la oxidación biológica de los hidrocarburos contenidos en suelos contaminados, por medio de la estimulación de la microflora natural que se encuentra en el suelo (levaduras, hongos o bacterias) mediante el agregado de fertilizantes, arado y riego superficial. En realidad, se trata de una bioestimulación de las poblaciones necesarias que interesa activar.

La biolabranza (llamada también cultivo de la tierra) consiste en esparcir los suelos contaminados (Figura. 2.9) excavados en una capa delgada sobre una superficie impermeable estimulando la actividad microbiana mediante aireación y adición de nutrientes y humedad. El sistema lleva implícito un colector de lixiviados que escurran. Sobre la superficie impermeable suele depositarse suelo tratado y se añade suelo contaminado para reiniciar el proceso. Periódicamente se voltea o “labra” la tierra esparcida para estimular la actividad degradativa de las poblaciones indígenas

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



Figura. 2.9 *Esparcimiento del suelo de un sitio contaminado.*

2.5.1 Aplicaciones, ventajas, desventajas, limitaciones y propiedades de la biolabranza

APLICACIONES:

- Los contaminantes tratados con éxito por biolabranza, incluyen diesel, gasolinas, lodos aceitosos, creosota y coque, además de algunos pesticidas y hidrocarburos totales del petróleo (HTP's).
- Es una tecnología de gran escala, que se practica en los Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Holanda, Suiza, Dinamarca, Francia.

VENTAJAS:

- Relativamente simple de diseñar e Implementar.
- La biolabranza es de corta duración: usualmente 6 meses a 2 años bajo óptimas condiciones.
- Los costos son competitivos: \$30-60 dólares/tonelada de suelo contaminado.
- Efectivo con componentes orgánicos con baja biodegradación.

DESVENTAJAS:

- Reducción de Concentraciones de >95% y concentraciones de componentes de <0.1 ppm son muy difíciles de alcanzar
- No sería muy efectivo con alta concentración de componentes (>50000 ppm total de hidrocarburos de petróleo)
- La presencia de metales pesados con concentraciones (>2500 ppm) pueden impedir el crecimiento de los microorganismos.
- Los componentes volátiles tienden a evaporarse en vez de ser biodegradados durante el tratamiento
- Requiere un amplio espacio para el tratamiento
- La generación de polvo y vapor durante el Landfarming pueden producir algunos problemas con la calidad del aire

LIMITACIONES:

- Requiere de grandes emplazamientos para su aplicación
- Algunas condiciones que afectan la degradación biológica de los contaminantes (temperatura y lluvia) son incontrolables, incrementando el tiempo en que se efectúa la biorremediación.

La biolabranza debe manejarse con cuidado para prevenir la contaminación de acuíferos, superficies de agua, aire o en la cadena alimenticia. El mayor problema es la posibilidad de lixiviados de los contaminantes hacia el suelo y el agua. Otra limitante para su utilización, es que por la incorporación de suelo contaminado en suelo limpio, se genera un gran volumen de material contaminado. No es recomendable su uso para contaminantes diluidos, ni tampoco cuando no todos los contaminantes son biodegradables.

Costos y tiempos de remediación. Es una tecnología de mediano a largo plazo. El costo para su aplicación en desechos peligrosos oscila entre 30 y 70 USD/ m³.

PROPIEDADES:

Concentración del contaminante, presencia de nutrientes, aireación, condiciones ambientales, presencia de inhibidores, concentración de microorganismos, etc.

2.5.2 Tecnología de biolabranza (Landfarming)

El landfarming es una tecnología de biorremediación ex-situ que requiere la excavación de los suelos contaminados y su disposición sobre una superficie impermeable (normalmente algún tipo de geomembrana). Esta geomembrana está dispuesta sobre la superficie del terreno adyacente a la zona contaminada o en una pequeña piscina excavada cerca de esta zona y sobre la que se vierte el suelo a

tratar. Además, el proceso cuenta con un sistema de drenaje para la recolección de lixiviados, que deberán recibir algún tratamiento posterior (Figura. 2.10).

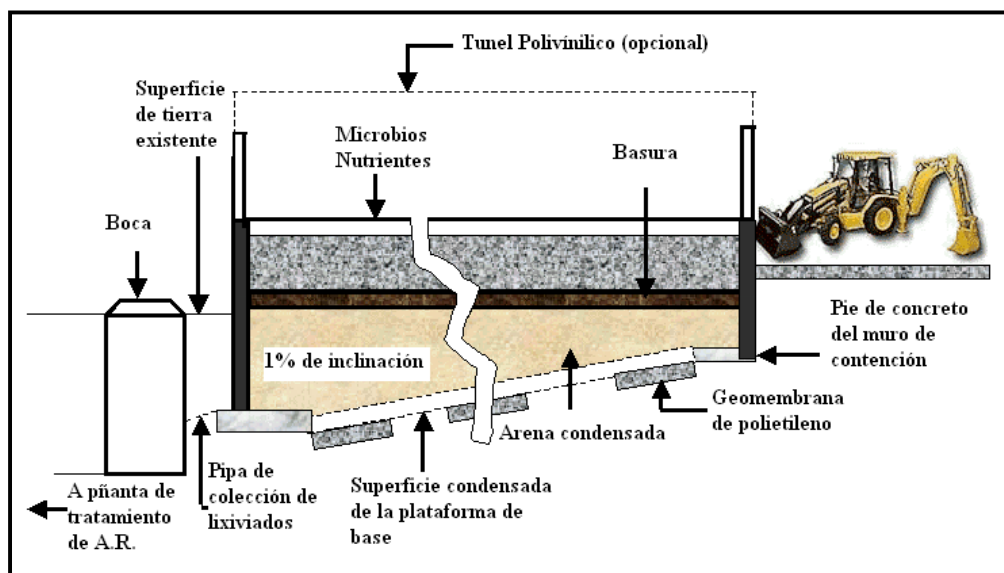


Figura 2.10 Proceso de Biolabranza ex-situ que cuenta con un sistema de drenaje para la recolección de lixiviados, que deberán recibir algún tratamiento posterior.

2.5.2.1 Variables de control en el proceso de Landfarming

La descontaminación se basa en la acción de los microorganismos presentes en el suelo, por lo que la utilidad de tratarlos ex situ reside en poder controlar fácilmente las condiciones óptimas de biodegradación de los compuestos orgánicos.

Fundamentalmente se controlan las siguientes condiciones:

- Contenido en humedad: se añade agua mediante un sistema de riego.
- Aireación: el suelo es volteado por métodos mecánicos periódicamente (Figura. 2.11).
- pH: debe permanecer cerca de la neutralidad, por lo que se añadirán enmiendas calizas en caso de aumentar la acidéz.
- Otras enmiendas: nutrientes, inoculación de microorganismos...

Por lo general, los contaminantes son tratados en levantamientos de medio metro de espesor (Figura. 2.11). Cuando se consigue el grado de depuración deseada se retira este suelo y se añade una nueva capa, aunque puede ser útil retirar sólo la parte superficial del primer montón y verter sobre el mismo nuevo residuo a tratar para que se aproveche la actividad microbiana existente.

El Landfarming se usa satisfactoriamente en el tratamiento de lodos de refinería que contienen hidrocarburos del petróleo. Si existen compuestos muy volátiles en la mezcla, éstos pueden ser emitidos a la atmósfera antes de ser degradados por los microorganismos. La tasa de degradación se reduce si:

- Los hidrocarburos son muy pesados.
- Los compuestos presentan anillos en su estructura química.
- Presentan cloro o nitrógeno.



Figura 2.11 Labreo de un sitio contaminado.

2.5.2.2 Criterios de diseño de un Landfarming

Los siguientes puntos dan a conocer ciertos criterios para el diseño del landfarming:

- El área para la construcción del landfarming puede ser determinada dividiendo la cantidad de tierra a ser tratada por la profundidad del landfarming. La profundidad puede variar entre 31 a 46 centímetros dependiendo de la capacidad de la

maquinaria para mezclar la tierra. Maquinaria de alto poder puede alcanzar hasta 61 centímetros de profundidad para airear la tierra. Tierra adicional será necesaria para la construcción de bordes en la periferia del Landfarming.

- La forma del Landfarming es usualmente configurada de acuerdo a la facilidad para el acceso de tierra para el landfarming. El Landfarming puede tener una o varias parcelas de tierra.
- La construcción del landfarming incluye: preparación del terreno, bermas, un revestidor plástico (si es necesario), un sistema para la recolección de lixiviado y sistema de tratamiento, métodos para el pretratamiento del suelo (ejemplo., control de pH), y si es necesario control y tratamiento de vapores.
- Equipo de aireación, el cual incluye el típico equipo de agricultura. El método más favorable es el equipo que es transportado por un tractor sin que las gomas del tractor tapen los surcos de aireación.
- Sistemas para el control de agua, para evitar la saturación del área de tratamiento o el barrido de la tierra del Landfarming. Estos métodos incluyen la construcción de bermas o zanjas para interceptar el agua de lluvias.
- Control de erosión de suelo producido por el viento o agua, generalmente incluye el colocar la tierra en surcos, construir sistemas que controlen el agua e irrigar el área con agua para prevenir una polvareda.

2.6 RECORTES DE PERFORACIÓN

En México, la industria petrolera ha tenido un gran impacto negativo en materia ambiental, no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos, como son la gasolina, el queroseno, el combustóleo, etc.

Para poder extraer el petróleo de su lugar de origen es necesario perforar, para ésta tarea se utiliza maquinaria especializada en perforación la cual a grandes rasgos está conformada por:

- Tubería de perforación que son tubos de acero que se van uniendo a medida que avanza la perforación.
- Brocas, son las que perforan el subsuelo y permiten la apertura del pozo.
- Malacate es la unidad que enrolla y desenrolla el cable de acero con el cual se baja y se levanta la tubería de perforación y soporta el peso de la misma.
- Fluido de perforación o lodo de perforación es el que prepara, almacena, bombea, inyecta y circula permanentemente un lodo de perforación que cumple varios objetivos: lubrica la broca, sostiene las paredes del pozo y saca a la superficie el material sólido que se va perforando.
- Sistema de cementación es el que prepara e inyecta un cemento especial con el cual se pegan a las paredes del pozo tubos de acero que componen el revestimiento del mismo.
- Motores que son el conjunto de unidades que imprimen la fuerza motriz que requiere todo el proceso de perforación.

El fluido de perforación puede ser base aceite o base agua, en este caso de estudio se utiliza un fluido de perforación base aceite que contienen menos del 5% en agua y mezclas de álcalis, ácidos orgánicos, agentes estabilizantes, asfaltos oxidados y diesel en mayor proporción.

CAPÍTULO III

**COMPOSTEO Y BIOLABRANZA DE SUELO CONTAMINADO
PROVENIENTE DE RECORTES DE PERORACIÓN**

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO CONTAMINADO

El suelo contaminado por hidrocarburos, proveniente de recortes de perforación, por lo general se encuentran en base aceite. La concentración inicial del contaminante en el recorte de perforación es de aproximadamente 27 000 ppm de Hidrocarburos Totales del Petróleo (TPH) con un 45 % de humedad. El pH del suelo se encontró en el rango de 6-7, dejando ver que son suelos de ligeramente ácidos a neutros. La temperatura medida en el suelo fue de 31 °C.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL TREN DE TRATAMIENTO QUÍMICO-BIOLÓGICO

El tren de tratamiento químico-biológico está integrado por una etapa química y una biológica. La primera etapa utiliza una sustancia química denominada surfactante (GT-2000SR®) para dejar disponible el contaminante en la siguiente etapa. La segunda etapa es de tipo biológica y está integrada por dos tecnologías de tratamiento, el compostaje y la Biolabranza.

3.2.1 Sistema de tratamiento

Para llevar a cabo el primer tratamiento (químico), en la celda conformada por pilas, se aplica un agente (surfactante) de manera que los contaminantes sean separados. Después, en las biopilas se les agrega materia orgánica y se homogeniza, se aérea de 2 a 3 veces por semana. Posteriormente se lleva a cabo la biolabranza en la que se esparce la tierra tratada y con maquinaria especializada (Rototiler) se desmoronan y se extienden los grumos formados durante el tratamiento anterior.

3.2.2 Pretratamiento del suelo

El material contaminado que es ingresado a la empresa CEI S.A. de C.V. (Figura 3.1) es depositado en el recibidor de suelo contaminado; ahí es removido el aceite. El aceite removido se deposita en una pileta para su posterior aprovechamiento. La base sólida es trasladada a una celda de tratamiento, que está protegida por una membrana de polietileno de alta densidad con espesor de 40 milésimas de pulgada para evitar la migración de lixiviados al suelo. Dentro de estas celdas de tratamiento se forman pilas con el material a tratar para darle un mejor manejo y posteriormente se aplica cal para estabilizar el pH, así mismo darle cuerpo, volumen y consistencia a las biopilas.



Figura 3.1 Ingreso de material contaminado a CEI S.A. de C.V.

3.2.3 Tratamiento químico

Al inicio y al final del tratamiento químico se realizó el muestreo del material tratado para confirmar la eficiencia en la remoción de contaminantes. El tratamiento químico consiste en añadir una solución química al suelo que favorezca el proceso de remoción del contaminante.

Utilización del surfactante

Antes de que se inicie la aplicación de bacterias se favoreció y facilitó la degradación biológica, esto se logró mediante la aplicación de un agente tensoactivo o surfactante, que permite el incremento de la desorción del contaminante (hidrocarburo), facilitando la recuperación, además el surfactante tiene la finalidad de poner al contaminante disponible para que los microorganismos degradadores actúen con mayor efectividad debido al aumento del área superficial.

El surfactante utilizado es biodegradable, inocuo al ambiente, (GT-2000SR®) (Fig. 3.2) éste se diluye en agua en una proporción de 1:5, la aplicación del surfactante es con apoyo de bombas autocebantes o maquinaria especializada y se distribuye sobre el material a tratar; se efectúa el movimiento del material para la integración homogénea. Se reposa el material de 48 a 72 horas para permitir la acción del surfactante.



Figura 3.2 Aplicación del surfactante (GT-2000SR®) sobre al material.

3.2.4 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico consistió en su primera etapa del proceso de compostaje en biopilas y en una segunda etapa del método denominado landfarming o biolabranza. Ambos tratamientos requieren de un monitoreo continuo de la temperatura, humedad y el pH.

El primer tratamiento biológico llamado compostaje en biopilas requirió del dimensionamiento de las pilas de tratamiento, a continuación se comentan los datos de diseño utilizados para las celdas de tratamiento y las biopilas.

3.2.4.1 Dimensiones de las pilas de tratamiento biológico

Se construyó una celda de tratamiento (biocelda) con las siguientes características (Figura. 3.3):

- a) Con dimensiones de 2.74 m por 5.5m por 1.8 m de altura (2.74x5.5x1.8). Un volumen máximo de 9441.36 m³ tomando como base el nivel natural del suelo, esto con el fin de evitar algún derrame del material por el proceso y/o por incremento del nivel por las lluvias que se presenten en la región.
- b) La base de la celda se compactó al 80 % de la prueba Proctor.
- c) Se colocó una capa de 0.60 m de espesor de arcilla compactada al 85 % de la prueba Proctor.
- d) Se colocó una membrana de polietileno de alta densidad con espesor de 40 milésimas de pulgada en la base, como los taludes de la celda cuyas uniones fueron termoselladas.
- e) Se colocó una capa de arcilla de 0.40 m de espesor compactada al 95 % de la prueba Proctor, después de la membrana de polietileno de alta densidad.
- f) Se construyó un cárcamo en la parte más baja con el objeto de captar los escurrimientos de hidrocarburos y agua, para posteriormente regresarlos al proceso de tratamiento. Así mismo, se construyó un sistema de drenaje y/o canales los cuales están protegidos también con una membrana de polietileno de alta densidad de 40 milésimas de pulgada cuyas uniones están termoselladas.



Figura 3.3 Medidas características de una biopila

La maquinaria que se utilizó para su construcción fue un vibrocompactador, una excavadora, una motoconformadora y camiones de volteo.

3.2.4.2 Etapas del tratamiento biológico

Composteo en biopilas

Primeramente se aplicaron bacterias WMI-2000, en una proporción de 0.14 kg por m^3 de suelo a tratar, a través de bomba autocebante por toda la pila y se hicieron maniobras de homogenización dos veces por semana con maquinaria pesada (Figura. 3.4). Este proceso tuvo una duración de aproximadamente 30 días, durante este tiempo se realizó el monitoreo de variables ambientales para tener un resultado óptimo. Las variables fueron: pH, temperatura y humedad. Al momento de agregar las bacterias degradadoras de hidrocarburos al suelo, se inició el proceso de tratamiento denominado biorremediación.



Figura 3.4 Bacterias WMI-2000

Mientras el material se encontró en proceso de biorremediación, se le realizaron análisis intermedios, los cuales solo sirvieron de control para el proceso de tratamiento, por lo que no fue necesario que se realizaran por laboratorios acreditados ante la EMA.

Durante el proceso de compostaje, se le dio aireación a las biopilas tres veces por lo menos al mes, luego se introdujeron residuos agrícolas (frutas y verduras) provenientes de la central de abastos y hojarasca (Figura. 3.5) que actuaron como agentes esponjantes. También se le añadió fertilizante llamado comercialmente triple 17 preparado en solución. Por último se le roció agua para controlar la humedad o bien, en los días de lluvia se cubría la biopila, para evitar un exceso de humedad.



Figura 3.5 Introducción de hojarasca y residuos agrícolas a las biopilas.

3.2.5 Biolabranza

Se protegió la superficie del suelo planificado para el tratamiento por biolabranza con un material impermeable denominado lyner, de un calibre de 40 a 60 mm de espesor. El suelo del cual se redujo la contaminación inicial, se trasladó al área de tratamiento que fue diseñado con una pendiente para hacer posible la captación de lixiviados en un cárcamo. Posteriormente se esparció el suelo tratado bajo el método de Composteo. Una vez hecho esto se pasó por encima del suelo una máquina (tractor rototiller), para desmoronar los grumos más duros presentes en el suelo, luego se labró y se hicieron surcos en el material en tratamiento, para realizar pruebas de siembra de diferentes especies.

Las diferentes especies utilizadas fueron: Maíz, frijol, cilantro, rábano, girasol, tomate, albahaca y chile (Figura. 3.6).

El maíz y el frijol fueron muy susceptibles a la contaminación que aún se encontraba en el suelo, además de que se anegó por el mal clima en esos días (mucho lluvia) , el cilantro y el rábano dieron excelentes resultados de resistibilidad. El resto se dió pero los insectos como grillos y gusanos, detuvieron su crecimiento.



Figura 3.6 Generación de maíz, rábano y cilantro.

En esta etapa del proceso, se controlan parámetros de temperatura, humedad, y pH.

- Temperatura

Las temperaturas de los suelos a profundidades de 30 y 50 cm se medirán empleando un termómetro de vidrio y un termómetro para composta. La temperatura de los suelos constituye una función del clima, suelo, humedad del suelo, profundidad y entorno geográfico. Este protocolo recoge datos que ayudan a explorar estas interacciones.

Con la finalidad de proporcionar a las bacterias nativas y exógenas específicas el medio propicio para sus actividades de degradación y reproducción, se efectuaron mediciones de temperatura de forma diaria, cuidando que no rebase el rango de 25 a 40 °C, ya que se tiene comprobado que la actividad celular de los sistemas enzimáticos, responde al calor, produciéndose, al ir aumentando la temperatura un brusco aumento de la velocidad de crecimiento hasta que se alcanza el recomendable nivel de reproducción. Un aumento de unos pocos grados por encima del óptimo, hace disminuir drásticamente el crecimiento por activación de los sistemas enzimáticos, y reduce la capacidad reproductora. Exposiciones continuas a elevadas temperaturas pueden desnaturalizar los lípidos de la membrana y en consecuencia, producen la muerte celular.

- Remoción de nutrientes

Esta operación se realizó por lo menos cada tres días, para asegurar una homogenización (Figura. 3.7) efectiva con los materiales de aporte del proceso de descontaminación, además de proporcionar la oxigenación necesaria para una respiración aerobia, debido a que las bacterias utilizan oxígeno como aceptor final de electrones de los compuestos orgánicos oxidados. De forma general, en el caso de biotransformación, el oxígeno se incorpora a la molécula orgánica y el hidrógeno se elimina. Tras la completa mineralización, el oxígeno se reduce a agua y el carbono orgánico se oxida a dióxido de carbono.



Figura 3.7 Homogenización de nutrientes.

Para la remoción del material a tratar se cuenta con excavadoras CAT-320, para homogenizar, se utiliza el equipo Compost Turners WILD CAT y Fresadora Agrícola.

3.3 MONITOREO DE BIOPILAS

En esta etapa se evaluó el comportamiento de parámetros, como materia orgánica, nitrógeno, fósforo, pH, humedad e hidrocarburos totales del petróleo (TPH's).

3.3.1 Variables de control

Humedad

La humedad del suelo se calculó por la diferencia de peso de una misma muestra húmeda y secada en la estufa hasta obtener peso constante. Se determinó mediante el peso de la muestra de suelo en húmedo y se dejó reposar a temperatura ambiente por tres días y se tomó el peso de la muestra de suelo en seco para determinar humedad o contenido de humedad en suelo.

Técnica de peso constante llevada a cabo dentro del laboratorio de CEI S.A. de C.V:

1. Lavar, limpiar e identificar los vidrios de reloj a utilizar (puede utilizarse papel aluminio).
2. Poner los vidrios de reloj en la estufa a 105 °C por 8 horas, registrar el peso y volver a introducir a la estufa hasta alcanzar peso constante, todo este procedimiento previo al enfriamiento de los vidrios de reloj que se colocan en un desecador por un mínimo de 2 horas.
3. Sacar los vidrios de reloj del desecador de vacío utilizando las pinzas, hasta enfriar.
4. Pesar los vidrios de reloj, éste será el peso (PB).
5. Pesar una muestra de suelo de 2 g y colocarlos en el vidrio de reloj.
6. Pesar el vidrio de reloj con el suelo húmedo y tapar con papel aluminio, éste será el peso del vidrio de reloj más el peso del suelo húmedo (PB + Psh).
7. Destapar el vidrio de reloj con el suelo húmedo, e introducir en la estufa a 105 °C.
8. Sacar el vidrio de reloj de la estufa después de 24 horas, tapar y colocar en el desecador hasta que se enfríe, posteriormente pesar el vidrio de reloj con la muestra seca, éste será el peso del vidrio de reloj más el peso del suelo seco (PB + Pss)
9. Meter el bote a la estufa en intervalos de 30 minutos hasta obtener un peso constante.

Se humedeció el material a tratar para que se efectúe la biodegradación por dos razones:

1. Para el desarrollo celular, ya que el 75 u 80% de su masa es agua.
2. Para su utilización como medio de desplazamiento de los microorganismos hacia el sustrato, o viceversa.

El riego se efectuó como mínimo dos veces a la semana y por lo menos una de forma extensiva (entender por extensiva una cantidad agua que permita llegar al 50% de humedad, que es reportada como necesaria para el tratamiento de suelos

contaminados con residuos de hidrocarburos). El riego extensivo se lleva a cabo por “rodamiento”, se efectúa un canal en medio de la biopilas y sobre él se descarga toda el agua necesaria en tiempo y volumen. Los demás riegos pueden hacerse con pipas y de manera superficial, su objetivo es ayudar a mantener la humedad del material.

Temperatura

1. Se realizaron las mediciones en las biopilas para el estudio de variación de temperatura y humedad del suelo (Figura-3.8). Se estudiaron los puntos de muestreo que se describen en las estrategias y/o plan de muestreo, que ilustran ubicaciones de muestreo aceptables de acuerdo al volumen de suelo a tratar.
2. Se selecciona el punto de muestreo, y se trata de encontrar un área con características uniformes en un diámetro de 50 cm (la tierra no debe estar compactada).
3. Con ayuda de una varilla de fierro, del mismo largo del termómetro, se inserta en el punto de muestreo y se hacen dos orificios piloto, separados uno del otro por 5 cm de distancia. Si la tierra es tan dura que debe emplear un martillo, entonces se termina el orificio piloto hasta la profundidad total. Esto para abrir camino al termómetro, con el objeto del cuidado del mismo.
4. Se retira el clavo usando un movimiento de torsión. Si la tierra se resquebraja y se abulta al momento de retirar el clavo piloto, se busca otro lugar a 25 cm de distancia y se vuelve a intentar. Se minimizó al máximo la alteración que causa en el suelo.
5. Se insertó el termómetro de vidrio y el termómetro de composta, cada uno en un respectivo orificio a través del bloque. Se empujó el termómetro suavemente y con movimiento de torsión hasta que la cabeza repose sobre el bloque. No se forzó ya que puede dañar el instrumento.

6. Se leyó la temperatura del suelo a 30 cm. Se esperó por lo menos 2 minutos; se leyeron los termómetros. Se espera otro minuto, y se vuelven a leer los termómetros. Se repite hasta que las lecturas consecutivas estén dentro de 0,5 a 1,0° C uno de otro. Se registra este valor en la bitácora de campo.

7. Se retiró el termómetro y el bloque. Se empleó un movimiento de torsión, tratando de no alterar mucho el suelo.

8. Se hizo una anotación en la bitácora de campo escribiendo como observaciones el estado del tiempo del día anterior y en el momento de la medición.



Figura 3.8 Medición de temperatura y humedad del suelo.

Calibración de termómetros

Se verificó la exactitud una vez al mes. Esto es particularmente importante si es que se está utilizando más de un termómetro, ya que las diferencias o sesgos entre dos termómetros hacen que los datos sean imposibles de interpretar. Se siguió este procedimiento para la calibración:

1. Se colocaron los termómetros en agua a temperatura ambiental; y se registraron las lecturas de la temperatura luego de 2 minutos.
2. Se obtuvo como resultado menos de 2 °C de diferencia entre las lecturas de cada termómetro.

pH

Se observaron cambios en el pH, iniciando el 30 de Enero al 6 de Febrero con una unidad arriba de 7 y una abajo en un periodo de 2 meses, posteriormente tuvo aumentos mínimos hasta llegar a un pH de 7.82 unidades el 12 de junio (día 147 del proceso de biorremediación). Lo cual es debido principalmente al manejo implementado en la técnica de biorremediación, en lo referente al movimiento del material (aireación) y adición de biocomposta.

Aireación

La biopila debe contar con un sistema de aeración que suministre oxígeno suficiente para que los microorganismos degraden los compuestos. El suministro puede ser activo o pasivo. En ambos casos se requiere la instalación de drenes, tuberías ranuradas o perforadas que se colocan a diferentes alturas a través de la biopila de manera que el aire penetre. En el método pasivo se deja que el aire penetre naturalmente a los drenes. Los sistemas de ventilación activa consideran sistemas de inyección y extracción de aire. Estos sistemas deben actuar de manera que el flujo de aire esté justo arriba de las condiciones de oxígeno a fin de prevenir exceso de volatilización de los hidrocarburos que reduzcan las emisiones de vapor hacia el exterior. Si los vapores son excesivos se instala un sistema de carbón activado para la eliminación de vapores. Cuando se trata de hidrocarburos pesados como los provenientes de diesel, no se requiere sistema de extracción de vapores.

3.3.2 Nutrientes

Los nutrientes inorgánicos principales para la biodegradación son el nitrógeno y el fósforo. El primero 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. El nitrógeno puede perderse rápidamente en el suelo debido a la lixiviación del amonio y nitratos 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.

El monitoreo de nutrientes en el suelo, se llevó a cabo utilizando un pH-metro, el cual se introdujo en la parte media de la biopila realizando así, la medición del pH. Se analizaron los siguientes parámetros: nitrógeno, fósforo, elementos menores, materia orgánica, hierro y potasio, los cuales eran llevados al laboratorio de CEI S.A. de C.V. para su respectivo análisis.

- Nitrógeno total.

Disminuyó en su concentración inicial en el suelo natural de 352 mg/kg (medianamente pobre) a 122 mg/kg (pobre) a los pocos días de haber ocurrido el derrame, para llegar a una concentración de 64 mg/kg (pobre), además de las lluvias durante el protocolo de pruebas, a pesar de la adición de fertilizantes químicos.

- Fósforo.

Al momento del derrame éste no afectó la cantidad de fósforo en el mismo ya que se encontró una concentración de 146.84 mg/kg, muy semejante a la del suelo natural (142.63 mg/kg), aunque si disminuyó al final del proceso de biorremediación a 49.63 mg/kg esto en parte debido a que el fertilizante agregado durante el proceso el 80% del mismo pasa a formar parte del fósforo orgánico a los pocos días de ser aplicado no destacándose en los análisis finales realizados.

- Elementos menores.

En el caso del cromo, magnesio y zinc, disminuyó la concentración al final del proceso de biorremediación, en el caso del cromo de 6.5 a 0.04 mg/kg, para el magnesio de 107 a 3.52 mg/kg y finalmente para el zinc de 11.1 a 0.83 mg/kg.

- Materia orgánica.

Inicialmente en el suelo natural la materia orgánica fue de 0.8 % (pobre), aumentando a 1.21 % (medianamente pobre) al final del tratamiento de biorremediación, debido posiblemente a la adición de composta.

- Fierro.

En suelo natural tuvo una concentración de 5.611 mg/kg disminuyendo drásticamente a 4.11 mg/kg que lo convierte en un nivel adecuado en el análisis del 8 de junio.

- Potasio.

Este disminuyó de 716 mg/kg en suelo natural a 513 mg/kg de suelo biorremediado, causado posiblemente por la lixiviación del material ya que es un elemento móvil dentro de la solución del suelo y al aplicarle riegos periódicos este se perdió de las capas superiores donde se muestreó, de ahí su disminución al final del proceso.

3.4 CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTE

El cálculo de la concentración del contaminante se explica con el software de aplicación sencilla proporcionado por el Dr. Randy Adams (Figura 3.9). Se introdujeron los datos al software, tales como peso de la muestra, diluciones, volumen de solvente y el resultado se generó en ppm de manera automática.

Figura. 3.9 Software creado por el Dr. Randy Adams.

El resultado del calculo de remoción de contaminantes, obtenido del software de aplicación del Dr. Randy Adamas fue de: 25.6 %.

3.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

En la figura 3.10 se presentan las gráficas correspondientes al monitoreo de parámetros en las biopilas de tratamiento con material contaminado. Durante el primer mes de monitoreo (Mayo) se tomaron las mediciones los días lunes y jueves; se observó que mantuvieron una humedad media del 55 %, una temperatura promedio de 42 °C y un valor medio de pH de 6.5.

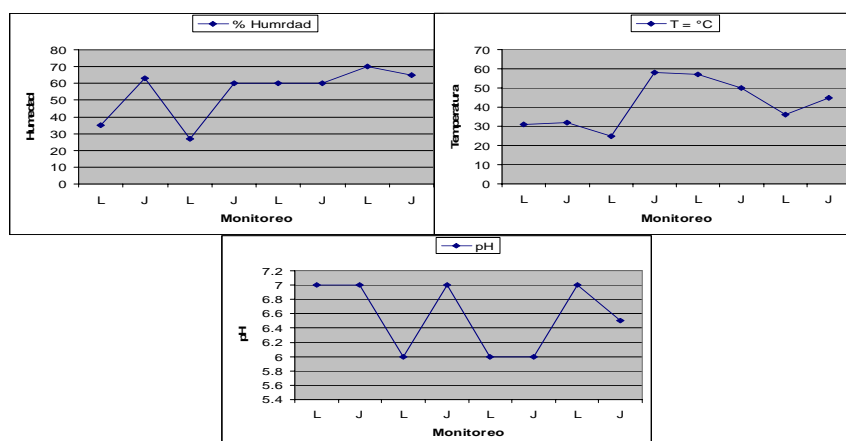


Figura. 3.10 Gráfico de tendencia de humedad, temperatura y pH pertenecientes al mes de Mayo.

La figura 3.11 corresponde al monitoreo de parámetros en las biopilas de tratamiento con material contaminado que en el segundo mes de monitoreo (Junio) se tomaron las mediciones los días lunes y jueves; se observó una humedad media de 70 %, una temperatura promedio de 46 °C y un valor media de pH de 6.5

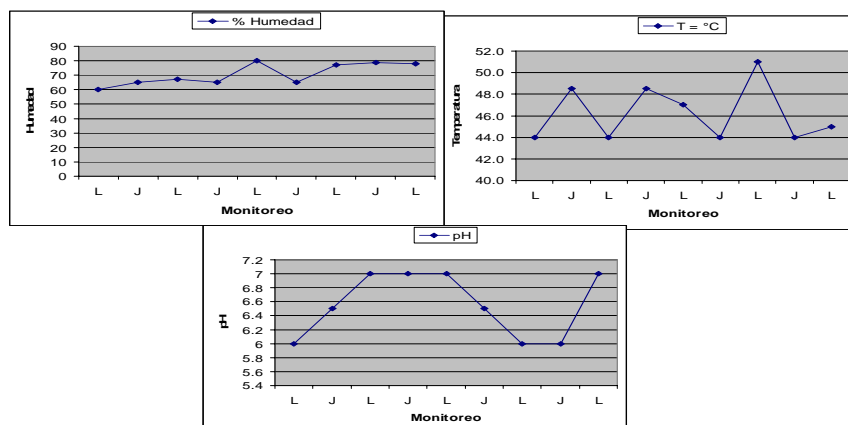


Figura. 3.11 Gráfico de tendencia de temperatura, humedad y pH pertenecientes al mes de Junio

La figura 3.12 corresponde al monitoreo de parámetros llevados acabo, en el tercer mes de monitoreo (Julio) tomándose mediciones los días lunes y jueves; se observó una humedad media de 78 %, una temperatura promedio de 44 °C y un pH medio de 7.

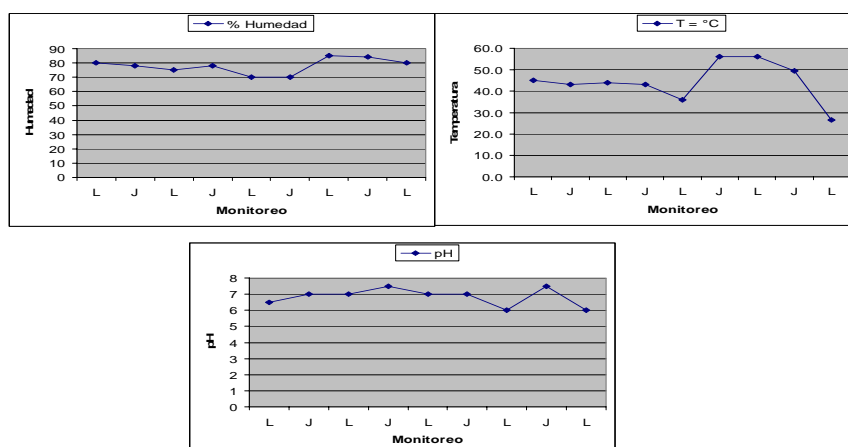


Figura. 3.12 Gráfico de tendencia de temperatura, humedad y pH pertenecientes al mes de Julio.

La figura 3.13 corresponde al monitoreo de parámetros en las biopilas de tratamiento con material contaminado. Monitoreándose durante el cuarto mes (Agosto), tomándose mediciones los días lunes y jueves; se observó una humedad media de 77 %, una temperatura promedio de 34 °C y un pH medio de 6.5.

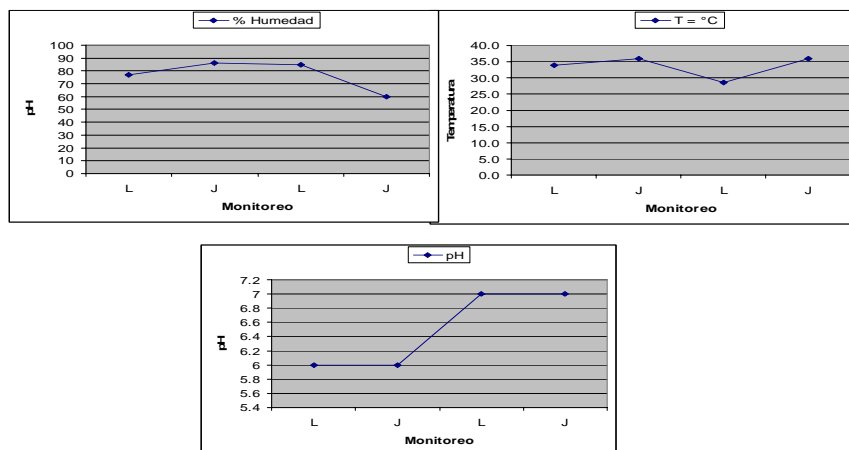


Figura. 3.13 Gráfico de tendencia de temperatura, humedad y pH pertenecientes al mes de Agosto.

CONCLUSIONES

Durante las actividades de remediación de suelos contaminados realizadas en CEI S.A. de C.V., se observó que el ingreso de suelo fué de un alto contenido de contaminantes, los cuales se eliminaron por medio de un tren de tratamiento, para posteriormente tener como resultado un suelo descontaminado y reutilizable para fines medio ambientales.

Es necesario contar con el equipo y maquinaria pesada que se encuentra dentro de la empresa, para poder realizar las actividades de limpieza y la restauración eficaz de suelos contaminados.

Mencionando específicamente el tratamiento de remediación, se puede decir que es el método mas eficaz hoy en día para remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, teniendo como problema el tiempo de biodegradación, pues depende en gran parte de los procesos naturales, como es el metabolismo de bacterias y el tiempo que éstas se llevan eliminando cantidades específicas de hidrocarburos.

Se debe recapitular que esta experiencia de trabajo me ha permitido conocer el uso adecuado de una celda de tratamiento, para monitorear desde el pH. Temperatura, humedad y concentración de TPH's, de un suelo contaminado provenientes de recortes de perforación y lo más importante, descontaminar este suelo a través de ciertos procesos biológicos.

Se concluye este trabajo haciendo mención de los parámetros óptimos: 70 % de humedad, 42 °C y 6.5 pH, los cuales fueron los adecuados para el monitoreo, llevado acabo en la realización de éste trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Alexander, M. 1994. Biodegradation and Bioremediation. Academic Press, San Diego. 302 pp.
- 2.- Bavière, M. y otros. Remediation of oiling in mussel beds after the Exxon Valdez oil spill. Marine Environmental Research 51 (2): 167-190, 2001.
- 3.- Bruton y Cols. Goodman & Gilman 9a ed. 2004
- 4.- Compilado por el equipo docente de Ecología Humana, Universidad Nacional de Educación a Distancia [UNED], 2003.
- 5.- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. SISTA S., A. de C. V. México. (1994).
- 6.- Dorronosco, Carlos. 2009. universidad de Granada España. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Lección 10, 2pp.
- 7.- Jim Field, 1995. Universidad de Arizona, Dpto. Ingeniería Química y Medioambiental - <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/outreach.html>.
- 8.- Löser C. Seidel H., Zehnsdorf A. Stottmeister U8, Microbial degradation of hydrocarbons in soil during aerobic/anaerobic changes and under purely aerobic conditions. Appl. Microbiol. Biotechnol 49:631-636,. 1998.
- 9.- Luque, J. y otros. Características edáficas de suelos afectados por derrames de petróleo. BIP (junio): 10-16,1995

EN INTERNET

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Remediacion>
2. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/6>
3. <http://www.ambientalrosario.com>.
4. <http://www2.ine.gob.mx/> l
5. <http://www.unmsm.edu.pe/quimica/>
6. <http://www.eco2site.com>.
7. <http://www.google.com/>