

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO,  
GAS NATURAL Y PETROQUIMICA**



**“REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS EN  
OPERACIONES DE PERFORACION Y MANEJO DEL PETROLEO  
CRUDO EN LA SELVA PERUANA”**

TITULACIÓN POR TESIS PARA OPTAR EL TITULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO DE PETRÓLEO

ELABORADO POR:

**CANASA CALVO ADRIAN**

PROMOCIÓN 2009-1

**LIMA - PERU**

**2010**

## INDICE

1	INTRODUCCION .....	4
1.1	Antecedentes .....	4
1.2	Justificación.....	4
1.3	Objetivos del Proyecto .....	5
1.4	Hipótesis .....	6
2	MARCO TEORICO .....	7
2.1	Biorremediación .....	7
2.2	El Petróleo Crudo.....	11
2.3	Biorremediación como una Alternativa Saludable .....	16
2.4	Principio Básico del Proceso de Biorremediación .....	18
2.5	Microbiología Básica .....	19
2.5.1.	Terminología.....	19
2.5.2.	Clases de Microorganismos.....	19
2.5.3.	Tamaño y forma de las bacterias.....	20
2.5.4.	Rol de las bacterias en procesos de biorremediación .....	20
2.5.5.	Clasificación de las Bacterias .....	22
3	ENMIENDAS (MEJORAS) DEL SUELO.....	25
3.1	Mejoras en la reacción del suelo .....	25
3.2	Mejoras para la Salinidad.....	26
3.3	Mejoras en la Materia Orgánica .....	26
3.4	Mejoras para la Biorremediación (fertilizantes) .....	26
4	SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DE LIMPIEZA .....	28
4.1	Evaluación de Tecnologías .....	28
4.2	Selección del Método de tratamiento .....	29
5	APLICACIÓN DE SISTEMAS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS.....	43
5.1	Medidas Biocorrectivas .....	43

5.2	Fundamento Bioquímico de la Biodegradación .....	44
5.3	Diseño y Aplicación de los Sistemas de Biotratamiento .....	46
5.3.1.	Fase de investigación y caracterización de la contaminación y del Emplazamiento .....	46
5.3.2.	Análisis y elección de las medidas biocorrectivas .....	47
5.3.3.	Diseño y evaluación del sistema.....	48
5.3.4.	Análisis e interpretación de resultados .....	49
6	TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN.....	51
6.1	AIR STRIPPING .....	51
6.2	EXTRACCIÓN DE VACÍO DE FASE DOBLE (DUAL PHASE VACUUM EXTRACTION).....	51
6.3	BOMBEO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y RECUPERACIÓN DE LIQUIDOS LIGEROS .....	52
6.4	LANDFARMING .....	53
6.5	BIOPILAS.....	56
6.6	BIOVENTING (Inyección de Aire) .....	58
6.7	WINDROW COMPOSTING.....	59
6.8	EXTRACCION DE VAPOR DEL SUELO .....	62
6.9	ASPERSIÓN POR AIRE (AIR SPARGING) .....	63
6.10	LA ATENUACIÓN NATURAL.....	65
6.11	BIOFILTRACIÓN.....	67
7	PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO PARA EL TRATAMIENTO DE CORTES .....	68
7.1	Tratamiento de los Desechos Líquidos y Sólidos.....	68
7.1.1.	Fase Liquida .....	68
7.1.1.1	Los pasos fundamentales del proceso .....	69
7.1.1.2	Productos y Pruebas Fisicoquímicas.....	71
7.1.2.	Tratamiento de los Desechos Sólidos .....	77
7.2	Procedimiento Químico de Estabilización y Enriquecimiento de cortes.....	79

7.2.1.	Seguimiento y Control de Calidad .....	79
7.2.2.	Estándares de calidad ambiental para suelos .....	80
8	COSTOS.....	82
9	CONCLUSIONES .....	83
10	BIBLIOGRAFIA.....	84
11	ANEXOS.....	86

## 1 INTRODUCCION

### 1.1 Antecedentes

El manejo inadecuado de los materiales y residuos peligrosos ha generado a escala mundial, un problema de contaminación de suelos, aire y agua. Entre las más severas contaminaciones se destacan las que se produjeron y todavía se producen a causa de la extracción y el manejo del petróleo, fluidos de perforación en todos los países productores de hidrocarburos.

En el suelo los hidrocarburos impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera, iniciando una serie de procesos físico-químicos simultáneos como evaporación y penetración, que dependiendo del tipo de hidrocarburo, temperatura, humedad, textura del suelo y cantidad vertida puede ser mas o menos lentos, ocasionando una mayor toxicidad, además de tener una moderada, alta o extrema salinidad, dificultando su tratamiento.

Altos gradientes de salinidad pueden destruir la estructura terciaria de las proteínas, desnaturalizar enzimas y deshidratar células, lo cual es letal para muchos microorganismos usados para el tratamiento de aguas y suelos contaminados.

### 1.2 Justificación

Como consecuencias ambientales del derramamiento de crudo, recortes del lodo, se realizará la remediación de los suelos de la contaminación de este hidrocarburo. En el caso del suelo, los hidrocarburos impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera, iniciando una serie de procesos físico-químicos simultáneos, como evaporación y penetración, que dependiendo del tipo de hidrocarburo, temperatura, humedad, textura del suelo y cantidad vertida pueden ser procesos mas o menos lentos lo que ocasiona una mayor toxicidad. Además de tener una moderada, alta o extrema salinidad de las aguas de formación, lo que dificulta su tratamiento, debido a que altos gradientes de salinidad pueden destruir la estructura terciaria de las proteínas, desnaturalizar enzimas y deshidratar células, lo cual es letal para muchos microorganismos usados para el tratamiento de aguas y suelos contaminados con petróleo crudo.

En el agua, al llegar a esta, la mancha generada por los hidrocarburos vertidos flota por diferencia de densidades impidiendo la entrada de luz y el intercambio gaseoso, dando comienzo a la solubilización de compuestos hidrosolubles y a la afección de diferentes poblaciones.

Sin embargo, lo que complica la problemática actual de los sitios contaminados con hidrocarburos, es que hasta hace pocos años, prácticamente no existía una conciencia del grado de dificultad y del enorme costo de la remediación de suelos, cuerpos de agua y atmósfera contaminados, lo que representa hoy para la sociedad un gran costo económico. Dicha contaminación esta ocasionando el deterioro progresivo de la calidad del medio ambiente y genera una amenaza real a la salud publica, así como la extinción de gran cantidad de especies vegetales y animales.

### **1.3 Objetivos del Proyecto**

El objetivo principal de este proyecto es:

Identificar las diferentes y principales tecnologías para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo, así como los datos que deben tomarse en cuenta para la selección de la tecnología más adecuada de acuerdo con las características del suelo y medio ambiente de la selva peruana y el tipo de contaminante.

Remediar los suelos contaminados en operaciones de perforación aplicando tecnologías adecuadas y manejo del petróleo crudo en la selva peruana.

Minimizar los daños ambientales por la contaminación del petróleo crudo

Estudiar las técnicas biológicas que se pueden aplicar en un derrame de petróleo.

#### **1.4 Hipótesis**

La biorremediación es una solución saludable, frente al deterioro progresivo de la calidad del medio ambiente por el derramamiento de crudos, ya que esta problemática genera una amenaza real a la salud pública, así como la extinción de gran cantidad de especies vegetales y animales.

Se presentarán y definirán las principales tecnologías de remediación de suelos utilizadas en otros países. Para los propósitos de exposición, las tecnologías de remediación para suelos fueron divididas con base en su principio de acción o tipo de tratamiento: biológicas, fisicoquímicas y térmicas. Adicionalmente, se presentan los costos y tiempos estimados para la remediación de un sitio contaminado.

## 2 MARCO TEORICO

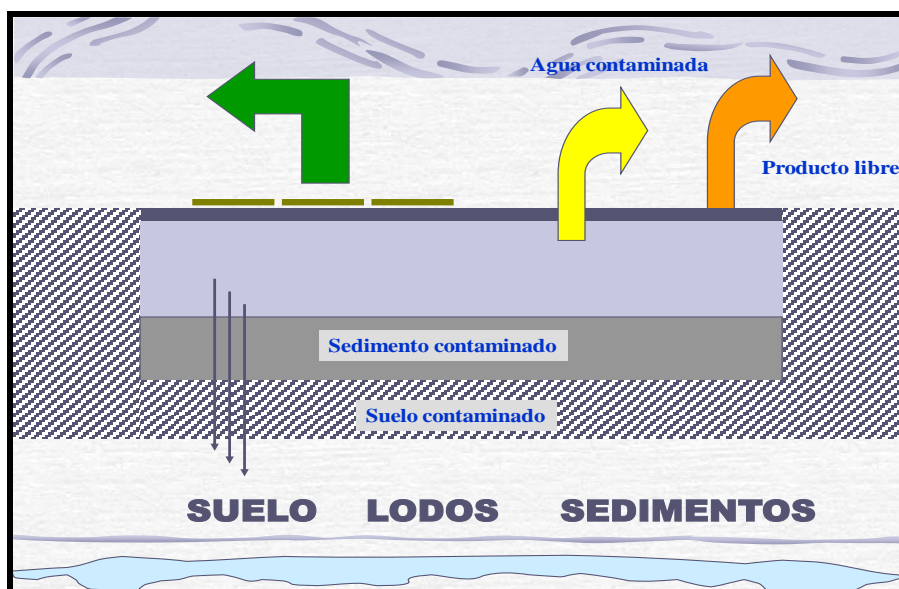
### 2.1 Biorremediación

La Biorremediación es considerada como la más deseable aproximación a la remediación de suelos contaminados en contraste a alternativas más costosa y de menor aceptación pública como la incineración.

Los tratamientos biológicos de degradación en suelos pueden ser eficientes y económicos si las condiciones de biodegradación son optimizadas.

Se define como Biorremediación al proceso de aceleración de la tasa de degradación natural de hidrocarburos por adición de fertilizantes para provisión de nitrógeno y fósforo.

El tratamiento biológico de suelos contaminados involucra el uso de microorganismos y/o vegetales para la degradación de los contaminantes orgánicos. La actividad biológica altera la estructura molecular del contaminante y el grado de alteración determina si se ha producido biotransformación o mineralización.



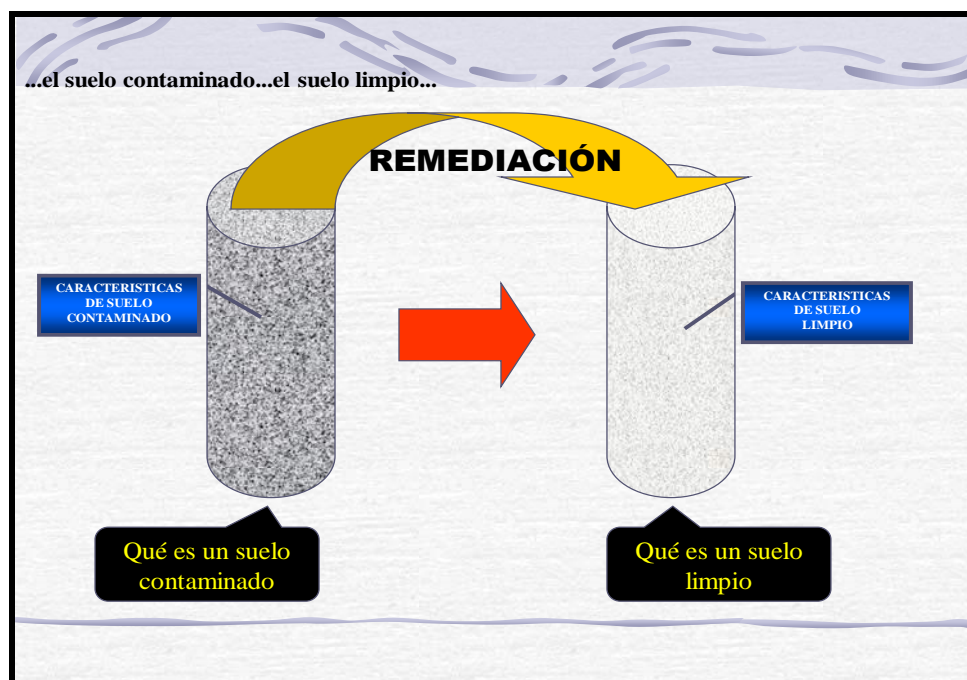
La biotransformación es la descomposición de un compuesto orgánico en otro similar no contaminante o menos tóxico, mientras que la mineralización es la descomposición a dióxido de carbono, agua, y compuestos celulares .

Los procesos biológicos se aplican frecuentemente al tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos.

Se pueden aplicar técnicas in-situ (en el lugar donde se encuentra el suelo contaminado) o ex-situ (cuando el suelo se traslada a una instalación para su tratamiento).



El tratamiento ex-situ de suelos, sedimentos y otros sólidos contaminados con hidrocarburos se puede realizar en un variado número de procesos en fase sólida y en fase lodo.



**Fig. Transformación de un suelo contaminado a suelo limpio**

Los procesos en fase sólida son aquellos en donde el suelo se trata con un contenido de agua mínima. En los casos de los procesos en fase lodo se suspende el suelo en agua.

Para la Biorremediación de los suelos contaminados con hidrocarburos han sido muy utilizadas diversas estrategias de compost aprovechando la versatilidad de algunos microorganismos para catabolizar moléculas recalcitrantes.

Las matrices de compost son ricas en microorganismos xenobióticos, incluyendo bacterias, actinomicetos y hongos lignolíticos que pueden lograr la degradación de contaminantes hasta compuestos inocuos como dióxido de carbono y agua, ó transformarlos en sustancias menos tóxicas.

Las tecnologías conocidas como Landfarming, Land Treatment o Land Application, son métodos de remediación de hidrocarburos de petróleo a través de la biodegradación.

Una de las técnicas de Biorremediación más difundidas es el Landfarming que consiste en un vertido controlado de hidrocarburos sobre una superficie de terreno, el cual se somete a un proceso de remoción mediante arado y riego

superficial con agregado de fertilizantes, con o sin incorporación de microorganismos.

Estas tecnologías consisten en el uso de microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias menos tóxicas o que no sean tóxicas.

Los microorganismos, igual que los seres humanos, comen y digieren sustancias orgánicas, de las cuales obtienen nutrientes y energía.

Ciertos microorganismos pueden digerir sustancias orgánicas peligrosas para los seres humanos, como combustibles o solventes.

Los microorganismos descomponen los contaminantes orgánicos en productos inocuos, principalmente dióxido de carbono y agua. Una vez degradados los contaminantes, los microorganismos se reduce porque ha agotado su fuente de alimentos.

Las poblaciones pequeñas de microorganismos sin alimentos o los microorganismos muertos no presentan riesgos de contaminación.

Algunos microorganismos pueden utilizar hidrocarburos para su crecimiento como única fuente de carbono, entre ellos se incluyen bacterias, actinomicetes, levaduras y mohos.

Los gérmenes producen una serie de catalizadores biológicos denominados enzimas, que se liberan al exterior de la célula y atacan las moléculas de hidrocarburo transformándolas en formas más fácilmente asimilables.

Solo unas pocas especies son capaces de degradar hidrocarburos gaseosos, mientras que los hidrocarburos parafínicos líquidos son atacados por un mayor número de especies.

La degradación de hidrocarburos alifáticos saturados es un proceso básicamente aeróbico, el oxígeno es necesario para iniciar el ataque microbiano a la molécula, mientras que la degradación de hidrocarburos alifáticos insaturados puede efectuarse en forma aeróbica y anaeróbica, al igual que los aromáticos.

Las técnicas de Biorremediación generalmente son aplicadas en suelos con concentraciones de hidrocarburos totales del orden del 5 a 8 %, extendiéndose estos valores a rangos mayores para suelos fácilmente aireables; debe destacarse que la determinación cuantitativa de hidrocarburos en suelo es compleja ya que la mayor parte de las técnicas se basan en la extracción de las

diversas fracciones por solventes, según sea el método utilizado para determinación de hidrocarburos se obtendrán valores diferentes, que para determinados tipos de suelos e hidrocarburos pueden ser muy marcados.

De esto surge la importancia de especificar el método analítico a utilizar.

Las efectividades de esta metodología dependen de innumerables factores, entre ellos se encuentran:

- Tipo y concentración de contaminante.
- Concentración de microorganismos.
- Concentración de nutrientes.
- Aireación.
- Condiciones macroambientales.
- Presencia de inhibidores.
- Biodisponibilidad del contaminante.
- Características agronómicas.
- Topográficas y microbianas del suelo receptor, etc.

Se puede resumir que en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, la Biorremediación es un de las mejores alternativas por sus diversas ventajas como son:

- Posibilidad de aplicarse in situ o ex – situ.
- Bajo costo de operación.
- Como subproducto se obtiene un suelo útil para la agricultura debido a la adición de nutrientes.
- No requiere de equipamiento especializado para su aplicación.

Sus desventajas fundamentales son:

- Tiempo de proceso largo.
- Aplicación efectiva a suelos con concentraciones de hidrocarburos < 30 %.
- Contaminantes no tóxicos para los microorganismos.

La biorremediación de suelos contaminados con petróleo también se realiza para limpiar y disminuir el contenido de hidrocarburos de diferentes niveles de toxicidad presentes en los suelos después de ocurrido un derrame; son

numerosas las metodologías biológicas que se utilizan con este propósito, pero todas se basan en la capacidad de los microorganismos de biotransformar compuestos orgánicos, por lo general hacia productos menos tóxicos o de más fácil degradación.

La biorremediación permite reducir notablemente las concentraciones de petróleo residual. Este tratamiento se aplica básicamente de 2 formas:

- Por bioestimulación
- Por bioaumentación.

**La bioestimulación** consiste en nutrir los suelos donde está el petróleo para posibilitar el crecimiento microbiano.

Otras tecnologías que permiten la limpieza de los suelos son el bioventeo, que consiste en poner aire a la materia orgánica, y la biolabranza, que consiste en agricultura que coloca bacterias, hongos, levaduras u otros microorganismos para estimular la actividad biológica del suelo.

Remediar un suelo toma de tres a seis meses, por lo que se requiere estudiar las condiciones que deben ajustarse, es decir, qué microorganismos utilizar, o cuáles serían los nutrientes a emplear, o cómo suministrarles agua y oxígeno. Ahora bien, cuando la tecnología biológica no resulta suficiente se buscan otras alternativas, como la química o una combinación de ambas.

La industria petrolera también utiliza procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos para la remediación de afluentes y aguas residuales.

## **2.2 El Petróleo Crudo**

El petróleo crudo es una mezcla de hidrocarburos con pequeñas cantidades de compuestos de azufre, oxígeno, nitrógeno y ciertos metales como: vanadio, níquel, sodio y otros, que se consideran impurezas del petróleo, las cuales afectan su calidad.

Esta mezcla compleja de hidrocarburos (parafinas, naftenos, asfalténicos y aromáticos) debe procesarse para desarrollar productos de mayor valor agregado como el gas licuado de petróleo (GLP), la gasolina, el diesel, disolventes, el queroseno, destilados medios, el aceite residual y el asfalto.

El petróleo puede describirse fácilmente en términos de ligero y pesado, este último se caracteriza por un incremento del contenido de carbono, nitrógeno, azufre y oxígeno.



El azufre, nitrógeno y algunos metales como el níquel y el vanadio se concentran principalmente en la fracción pesada del petróleo y tienen una mayor resistencia a los procesos químicos convencionales, razones que dificultan su eliminación de los productos petrolíferos.

El proceso de refinación comprende la realización de varias operaciones térmicas y catalíticas para convertir a las moléculas de la fracción pesada en moléculas más pequeñas llamadas fracciones ligeras.

Los metales pesados que contienen el petróleo, principalmente vanadio y níquel, son corrosivos, inhibidores de los catalizadores utilizados en la refinación y se emiten en forma de óxidos tóxicos durante la combustión de los combustibles.

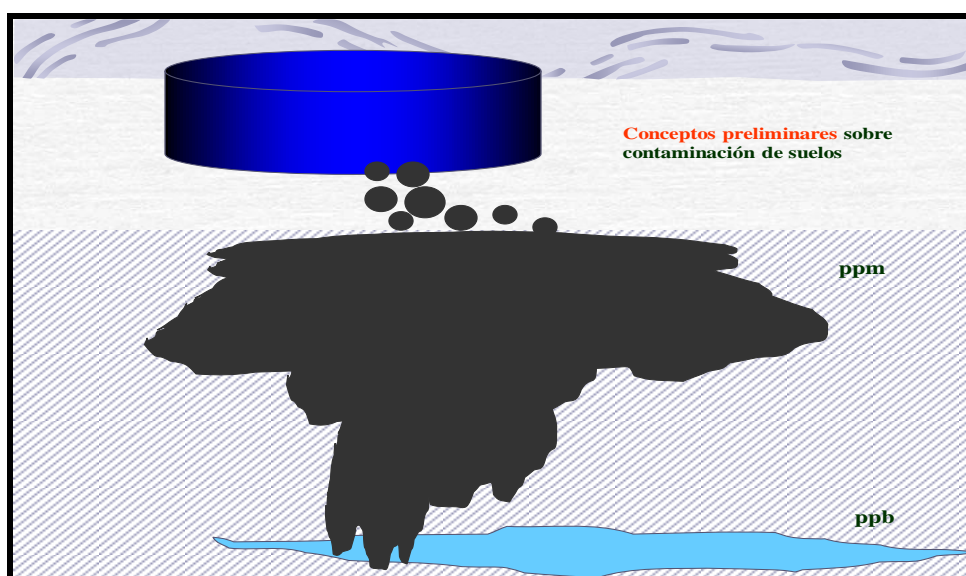


Fig. Contaminación de suelos con petróleo

La biotecnología ha empezado a utilizarse en proyectos de investigación que permiten el bioprocesamiento del petróleo y la disminución de la contaminación; por ejemplo, la remoción biológica de azufre por bacterias; la remoción de metales por enzimas y la transformación de asfaltenos en crudos más ligeros por acción biológica.

Se logra un doble propósito: el producto tiene mayor valor agregado y el bioproceso es más limpio y barato.

La biorrefinación del petróleo, es decir, la aplicación de biotecnologías en su fraccionamiento y mejoramiento, puede contribuir a la reducción de la contaminación y del consumo de energía y a la obtención de productos de mejor calidad.

La utilización de biocatalizadores y microorganismos seleccionados o modificados genéticamente, permite perfeccionar los procesos productivos, disminuir el consumo energético y de materias primas, así como una menor producción de residuos.

Las biotecnologías asociadas con la industria de la refinación del petróleo son: la biodesulfuración microbiana, la biodesulfuración con la utilización de enzimas, la desulfuración/desnitrógenación por adsorbentes poliméricos selectivos, la biodesnitrógenación, y la biodesintegración del petróleo.

La biodesulfuración, o eliminación de azufre del petróleo mediante microorganismos vivos, es un proceso en que se busca restar los compuestos de azufre sin que se disminuyan ciertas características del combustible, como el poder calorífico.

El proyecto de biodesulfuración por células viables ha alcanzado una escala comercial, y muestra claramente cómo esta nueva tecnología reduce el consumo de energía, disminuye la inversión requerida y, sobre todo, se alcanzan niveles de azufre compatibles con las políticas establecidas para la obtención de combustibles más limpios.

En tanto la biodesulfuración específica fue ampliamente estudiada en los últimos años, existe poca información sobre la eliminación biológica de compuestos organonitrógenados del petróleo y derivados sin afectar su valor calorífico.

El nitrógeno se encuentra de forma natural en el petróleo como compuestos de tipo no básico y básico y son el carbazol y la quinolina, los compuestos más

estudiados con respecto a su biodegradación. La eliminación parcial de los compuestos nitrogenados del gasóleo por una desnitrificación permite en una desulfuración posterior reducir el contenido de azufre en tanto que el gasóleo no desnitrificado contiene más azufre.

La quinolina es quizás el compuesto organonitrógeno más estudiado en lo que respecta a biodegradación, por considerarse como representante de muchos compuestos comúnmente hallados en el petróleo. Se ha observado que muchos cultivos aeróbicos y anaeróbicos microbianos pueden degradar la quinolina. De forma que el uso de estos cultivos en una aplicación de biorrefinería de petróleo requeriría que el nitrógeno sea selectivamente retirado de la quinolina, dejando intacto el valor carbónico y calorífico de la molécula.

La comprensión de los mecanismos biológicos que intervienen en la biodesulfuración, biodesnitrificación y mejoramiento del petróleo permitirán diseñar y producir catalizadores específicos de alta actividad y robustez.

Un estudio de carácter prospectivo establece que la biotecnología permitirá suministrar productos industriales y energéticos, rentables, novedosos y menos contaminantes. Además, los biocombustibles se perfilan como una alternativa energética para reducir la dependencia del petróleo y el gas.

Al respecto, se identificaron 3 tendencias tecnológicas futuras en esta área:

- La biotransformación, que consiste en la conversión de un compuesto químico o bioquímico en otros mediante el uso de un catalizador de origen biológico o sintético, por ejemplo, las enzimas.
- La bioproducción, que consiste en la selección o modificación de microorganismos y plantas vegetales para la producción de compuestos. De cara al futuro, la producción de materiales y combustibles podrá realizarse por medio de materias primas biológicas, mediante producción al aire libre (ej. cultivos y plantas); en grandes fermentadores (ej. microorganismos) o en condiciones de confinamiento (ej. insectos y animales).
- La biotecnología ambiental, que permite el tratamiento y recuperación de suelos, aguas y residuos urbanos e industriales. Entre otras aplicaciones, se utilizan microorganismos seleccionados genéticamente para digerir vertidos de petróleo o enzimas para digerir residuos de papeleras industriales.

También se hace referencia a la biotecnología energética, que se caracteriza por la utilización de las cosechas agrícolas y sus residuos como fuente de energía: el almidón de maíz o trigo, los aceites vegetales de la colza o el girasol o los residuos urbanos se utilizan para la producción de bioetanol, biodiesel o biogás respectivamente, mediante la acción de enzimas que aceleran los procesos y la fermentación por microorganismos.

En esta área, el mencionado estudio identifica los biocombustibles como principal tendencia tecnológica para el futuro, porque suponen una alternativa energética que permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles (petróleo y gas), atenuar el impacto económico de la subida del precio del petróleo, disminuir la dependencia del suministro exterior y la reducción de la emisión de gases con efecto invernadero.

Un dato importante sobre el que los expertos llaman la atención en el informe, es que el desarrollo de la biotecnología industrial y energética dependerá en gran medida de la genómica.

Si bien este campo presenta novedosas y atractivas posibilidades de aplicación, es necesario considerar que las oportunidades reales de uso de estos nuevos conocimientos, están determinadas por los recursos y los grandes esfuerzos que esto requiere.

Existe también un proyecto aprobado sobre turbocombustibles contaminados por microorganismos, aunque el tratamiento que están recibiendo es físico, no biológico.

Otras cuestiones que también se investigan están relacionadas con la eliminación de los metales pesados del petróleo (sobre todo de los asfálticos y de los aromáticos) por microorganismos.

Se desarrolla un estudio sobre la obtención de biogás a partir de bacterias que metabolizan los residuos del petróleo, y se investiga, en colaboración con otros países (Brasil), sobre los biocombustibles, específicamente sobre el biodiesel.

Existe otro proyecto, aún en espera de aprobación, sobre recuperación mejorada de crudo por microorganismos, que constituye un método terciario para la extracción de petróleo, y se conoce también por biotecnología de inyección.

Para la aplicación de los microorganismos marinos en la biotecnología del petróleo, se desarrollaron y caracterizaron los bioproductos, BIOL y BIOL-FC,



capaces de degradar el petróleo que se encuentra como contaminante en aguas y tierras, y seleccionar un número considerable de cepas de microorganismos marinos capaces de producir sustancias tensioactivas e incorporarlas al proceso de descontaminación o biorremediación, con muy buenos resultados.

Es posible decir entonces que nuestro país ha dado pasos en el empleo de técnicas biotecnológicas para la descontaminación de suelos y aguas, la recuperación mejorada de crudo, la producción de biocombustibles y la obtención de combustibles más limpios. Sin embargo, aún en el sector petrolero cubano, se realizan procesos por otros métodos que no son biológicos, y de los biológicos algunos no están incorporados a la industria sino que se encuentran en fase de investigación.

### 2.3 Biorremediación como una Alternativa Saludable

Las prácticas de biorremediación consisten en el uso de microorganismos como plantas, hongos, bacterias naturales o modificadas genéticamente para neutralizar sustancias tóxicas, transformándolas en sustancias menos tóxicas o convirtiéndolas en inocuas para el ambiente y la salud humana.

La biorremediación puede clasificarse de acuerdo al organismo que efectúe la degradación del compuesto xenobiótico.

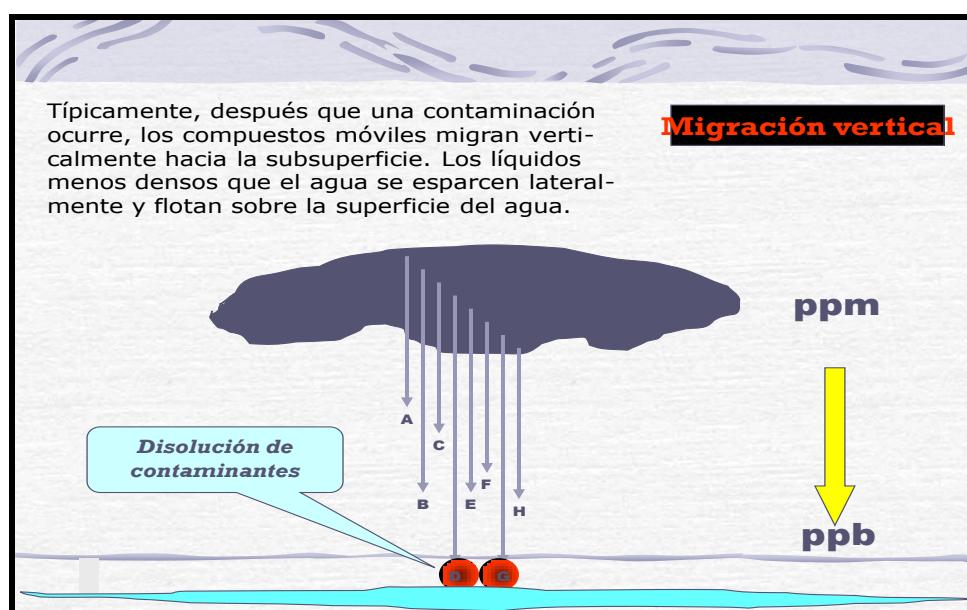


Fig. Migración vertical

La fitorremediación, es el uso de plantas para la remoción de contaminantes de suelo y aguas, es una técnica apropiada para la remoción de metales pesados

y radionucleos. Sin embargo, no se conoce sobre la habilidad de esta en el tratamiento de suelos con contaminantes orgánicos persistentes, un ejemplo lo constituye la especie *Thlaspi caurulencens* en suelos contaminados con zinc y cadmio donde se encontró que los eliminaba del suelo agrícola.

Así mismo, existen animales que actúan como agentes descontaminantes, ya que pueden desarrollarse en medios con fuerte toxicidad y poseen en su interior microorganismo capaces de retener metales pesados; tal es el caso de la lombriz de tierra (*Lumbricus terrestris*) la cuál absorbe los contaminantes a través de los tejidos y los acumula en las vías digestivas .

Las bacterias son las más empleadas en el proceso de biorremediación, aunque también se han empleado otros microorganismos como hongos, algas, Cianobacterias y Actinomicetes para la degradación de compuestos tóxicos en el suelo.

La biorremediación del suelo, puede ser dividida en estrategias in situ y ex situ. In situ corresponde a la biorremediación referente a tratamientos que no requieren excavación del suelo contaminado; ex situ es un método donde se excava el suelo o el material a tratar y se le maneja en un sistema controlado como una celda de landfarming o algún tipo de biorreactor .

Las técnicas de biorremediación insitu presentan una mayor ventaja sobre las ex situ por el menor costo y la disminución de la generación de residuos a eliminar en la superficie .

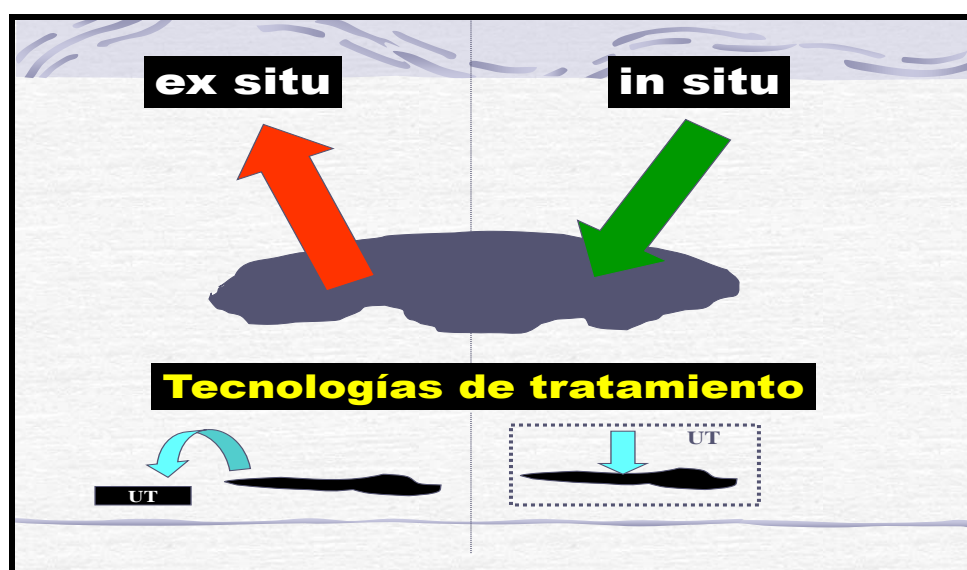


Fig. Tecnicas de biorremediación In-situ y Ex-situ

La biorremediación insitu es la más aplicada y utiliza microorganismos autóctonos, estos en el suelo pueden degradar un gran número de constituyentes de lodo pero su eficacia y su población son afectadas cuando algunos contaminantes tóxicos están presentes en altas concentraciones. La reintroducción de microorganismos aislados de un sitio contaminado ayuda a resolver este problema ya que los microorganismos pueden degradar los constituyentes y tiene una gran tolerancia a la toxicidad .

#### 2.4 Principio Básico del Proceso de Biorremediación

El principio básico del proceso de biorremediación consiste en la destrucción de la estructura de los hidrocarburos para convertirlos en los componentes no tóxicos de bióxido de carbono, agua y biomasa (Fig. 1). Esto se logra mediante el cultivo de bacterias endémicas con capacidad de adaptación a las condiciones ambientales y a las características del suelo en el sitio del tratamiento. Las respectivas muestras microbiológicas originales (blancos) fueron tomadas de los perfiles del suelo alrededor de los sitios contaminados.

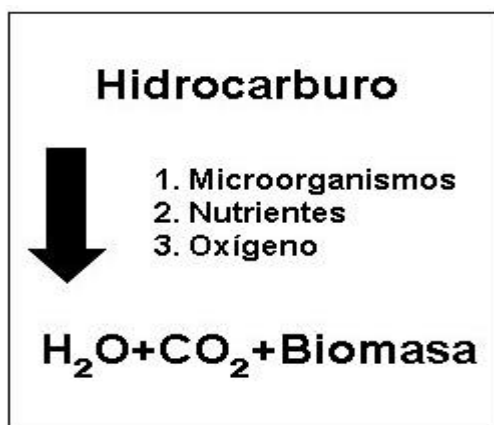
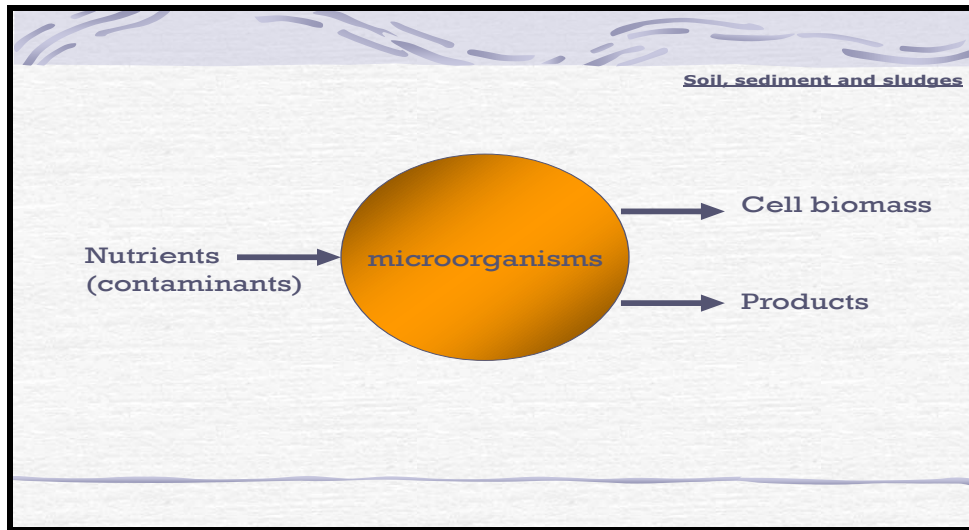


Figura Nº 1: Principio básico del proceso de biorremediación

El proceso en cuestión consistió en la inoculación del material contaminado por petróleo con varias cepas de microorganismos combinadas con aminoácidos, enzimas, vitaminas, minerales y nutrientes que mejoran la bioreceptividad y la capacidad metabólica de las bacterias aumentando su capacidad de oxigenación y mineralización de los hidrocarburos.

Tal como cualquier otro organismo, los pequeños comedores de petróleo necesitan alimentos para vivir y multiplicarse, incluso carbono, fósforo,

nitrógeno y oligoelementos; en otras palabras, con su enorme apetito por los hidrocarburos, las bacterias literalmente se los comen y van limpiando el suelo.



## 2.5 Microbiología Básica

Algunos conocimientos del comportamiento de los microorganismos es importante. Su presencia es necesaria para la biorremediación.

### 2.5.1. Terminología

Biología

Estudio de los organismos vivos y sus procesos vitales.

Es una ciencia que estudia los procesos vitales de plantas y animales.

Microbiología

Es una rama de la biología, que se concentra en las formas microscópicas, llamadas microorganismos.

Una preocupación principal en las operaciones de biorremediación es el comportamiento de microscópico, los organismos unicelulares, que son capaces de vivir bajo tipo de condiciones y se multiplican con una velocidad increíble.

### 2.5.2. Clases de Microorganismos

La forma más sencilla los microorganismos pueden ser divididos en tres grupos principales:

A) Algas: Contienen clorofila. Necesitan luz solar para crecer y puede ser un problema en los estanques superficiales, canteras a cielo abierto o agua de mar.

B) Hongos: No contienen clorofila

C) Las bacterias: Tienen algunas propiedades en común con los dos hongos y algas.

Está compuesta por la gran variedad de microorganismos de mayor interés en procesos de biorremediación.

### **2.5.3. Tamaño y forma de las bacterias**

Las bacterias son muy pequeñas (alrededor de 0,5 micras de diámetro), hay miles de especies.

Las verdaderas bacterias tienen forma de esferas, curvas rectas.

Las formas se denominan de la siguiente manera:

1. coccus
2. Bacilo
3. Vibrio, sigmoide, Spirillum

### **2.5.4. Rol de las bacterias en procesos de biorremediación**

- Es consumir o transformar los materiales orgánicos en determinadas condiciones ambientales.
- Los procesos de biorremediación son catalizadas proceso de reacción química en la cual los microorganismos provee enzimas (proteínas), el catalizador, para transformar un contaminante orgánico en una reacción de óxido - reducción.
- Para mantener la biorremediación son necesarias las siguientes:
  - Una especie de bacterias capaces de producir las enzimas y degradar el contaminante es el objetivo específico.
  - Un receptor de electrones para el redox, oxígeno para las reacciones aeróbicas.
  - Una fuente de energía.

#### **Enzimas**

Son catalizadores que reducen la energía de activación.

Proteínas orgánicas generadas por los microbios.

## Tamaño y forma de las bacterias

1. Una sola bacteria esférica: coco
  - Hay varias bacterias esféricas: cocos
  - Una cuerda o cadena de cocos que se llama un estreptococo
  - Una hoja o plano de cocos que se llama un estafilococo.
2. Varilla recta: bacilo
3. Curva en forma de una "C"
  - Sigmoide en forma de "S"
  - Spirillum y dos o más curvas en forma de un tornillo o espiral

## Las bacterias de crecimiento.

- Las bacterias pueden multiplicarse a una velocidad increíble
- Algunos pueden duplicar su población en 20 minutos en condiciones ideales, lo que significa que una sola bacteria puede llegar a ser una colonia próspera de millones de bacterias en pocas horas.
- Un volumen del agua puede contener muchas bacterias.

## Condiciones de crecimiento bacteriano.

Las bacterias son sumamente adaptable y resistente, puede soportar una gama muy amplia de:

- Temperaturas por lo menos de 14 °F a 210 °F.
- Valores de pH (alrededor de 0 a 10,5)
- Concentraciones de oxígeno (0 a 100% de oxígeno).

Condiciones ideales:

- En sistemas de agua, que crecen mejor en el rango de pH de 6-8 temperaturas de 20 y 35 °C.
- Prefieren el agua dulce, pero puede hacer muy bien en salmueras.

## Bacteria sésiles y planctónicas

Las bacterias sésiles (Mayoría de 1000 a 10.000 veces):

- Están adheridos a las superficies sólidas .
- Producen una sustancia pegajosa llamada polysaccharjde, que las bacterias utilizan a sí mismos de cemento a una superficie sólida.

- Continuando la producción de polisacáridos da como resultados la formación de un biofilm.

Las Bacterias Planctónicas:

- Están en suspensión en el agua .
- A veces es llamado "nadadores" o "moscas volantes".

### 2.5.5. Clasificación de las Bacterias

- Por el oxígeno
- Por fuente de carbono
- Por la temperatura
- Fuente de energía

#### Oxígeno

- Control de oxígeno es fundamental para la eliminación de nutrientes .
- El oxígeno puede ser disuelto molecular o químicamente ligado a otras sustancias como los nitratos, sulfatos o fosfatos.

Clasificación de las bacterias por oxígeno:

- Aeróbica
- Anaeróbica
- Facultativas

#### Estabilización aeróbica

Los microorganismos + oxígeno  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + NO<sub>3</sub> + H<sup>+</sup> + calor

- Los productos de la reacción de estabilización. crea calor y la producción de H<sup>+</sup> destruye la alcalinidad. Lo más importante es el proceso de estabilización se reduce la masa de contaminantes.

- El proceso puede ser inhibido por metales pesados

### **Estabilización anaerobia de Contaminantes**

En condición de estabilización anaeróbica de los residuos pasa por tres fases:

- a) la hidrólisis
- b) la formación de ácido
- c) la formación de metano

Los diferentes grupos de microorganismos, convierten los residuos biodegradables en líquidos solubles, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>)

El proceso se realiza en tres pasos:

- a) Paso de Estabilización anaerobia N° 1: desglose enzimas orgánicas complejas en líquidos solubles.

**La celulosa, proteínas, ligninas, grasas → grasos ácidos orgánicos, alcoholes, dióxido de carbono, amoníaco (todos soluble)**

- b) Paso de Estabilización anaerobia N° 2:

Estas bacterias forman, los organismos saprofitas, comúnmente conocida como "formadores de ácido", convierten líquidos orgánicos producidos en la primera etapa en los ácidos orgánicos o ácidos volátiles.

**Los ácidos orgánicos, alcoholes, amoniaco <sup>formadores de acidez</sup> → → → → → ácido volátil y otros productos intermedios.**

- c) Paso de Estabilización anaerobia N° 3:

Dos grupos de "fermentadores de metano", el metano de fermentación de bacterias, donde convierten los ácidos volátiles en gas metano, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua.

El metano es la reacción de fermentación que se muestra a continuación:

**Acidos volátiles y productos intermedios → dos grupos de fermentación de metano  
→ CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + agua**



### **Comentarios sobre la Anaerobia**

- Tanto el ácido fermentador y los formadores de ácido existen juntos y pueden ocurrir reacciones al mismo tiempo.
- El segundo paso es el más crítico debido a que los fermentadores de metano son más sensibles a los cambios de pH y más lento para reproducirse y reaccionan a los cambios de las condiciones que no sean los formadores de ácido.
- Si el pH cae por debajo de 6, los formadores de ácido predominan y la fuerza de la digestión en condiciones malas.

La caída del pH indica que toda la alcalinidad a sido consumida. Mientras hay alcalinidad en el sistema, el pH se mantiene estable.

Una vez que toda la alcalinidad es consumida el pH desciende.

### **Clasificación de las bacterias por fuente de carbono**

#### 1) Heterótrofos

Se alimentan de materia orgánica como fuente de carbono.

#### 2) autótrofos

Se alimentan de dióxido de carbono, bicarbonato y carbonato como fuente de carbono.

### **Clasificación de las bacterias por la temperatura:**

Temperatura de clasificación:

- Termofilicas > 40 ° C
- Mesófilas alrededor de 30 ° C
- Criofilicas <10 ° C

### **Clasificación de las bacterias por Fuente de energía**

- Fototrofos: la luz (fotosíntesis)
- Quimiotrofos: oxidación química y la reducción de

### **Macronutrientes inorgánicos**

- Carbono
- El nitrógeno
- Fósforo

### 3 ENMIENDAS (MEJORAS) DEL SUELO

Las enmiendas del suelo se clasificaran en:

- Mejoras en la reacción del suelo.
- Mejoras para la salinidad.
- Mejoras para la sodicidad
- Fase Sólida de calcio en exceso
- Mejoras en la materia orgánica
- Mejoras para la biorremediacion

#### 3.1 Mejoras en la reacción del suelo

En las mejoras del suelo se tendrán presente con lo siguiente:

- Se controlará el exceso de sulfato de aluminio,  $Al_2(SO_4)_3$ , en los suelos.
- Control del exceso de acidez de  $CaO$ .
- Se usa el carbonato de calcio  $CaCO_3$  para el ajuste final de pH, de los residuos sólidos después de la extensión sobre la tierra y la mezcla con los suelos superficiales.
- Utilizar el azufre (S), por exceso de alcalinidad.

En el cuadro siguiente veremos los objetivos del PH:

RESIDUOS	DISPOSICION TECNICA	CRITERIO de PH
Líquidos	Inyección de pozos	NA
	Descarga superficial	6-9
	Camino de propagación	6 -9
	Tratamiento de la tierra	6-8
Sólidos	Inyección de anular	NA
	Tratamiento de tierra	6-8
	Entierro de los vertederos	6-9

### 3.2 Mejoras para la Salinidad

Sólo lavando con agua limpia los suelos reducen las sales de los residuos.

Modificaciones estructurales, polímeros de vinilo-alcohol o las poliacrilamidas , ayuda el aumento de la agregación del suelo.

El disco del arado puede aflojar el suelo a una profundidad de 6 a 10 pulgadas

Es necesario perforar para suelos más profundos

### Mejoras para la Sodicidad

NaCl en agua producida

Añadir Ca para contrarrestar la sodicidad y la alta salinidad

Añadir Ca antes de la lixiviación.

### Fase Sólida de calcio en exceso

Sucede cuando el agua es derramada en suelos calcáreos y pueden producirse situaciones sódicos o salinos.

Mejoras:

- El azufre "S" es el elemento de elección, si el tiempo no es una preocupación y equipo mecánico está disponible.
- Superfosfato reacciona con  $\text{CaCO}_3$  para formar  $\text{CaSO}_4$
- El sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) también se puede utilizar.
- Cuando el tiempo o equipos mecánicos es un factor para su distribución, usar las sales solubles de Ca,  $\text{CaCl}_2$  o  $\text{CaNO}_3$ .
- El calcio soluble es efectiva cuando los suelos no han alcanzado el equilibrio.

### 3.3 Mejoras en la Materia Orgánica

La turba de musgo o estiércol, baja en sal, mejora la estructura del suelo, actúan como un sumidero de cambio de sales, y aumenta la capacidad de retención de la humedad.

### 3.4 Mejoras para la Biorremediación (fertilizantes)

En las mejoras en la biorremediación se usan los siguientes compuestos químicos:

**Nitrógeno:**

Nitrato de amonio (33%-N),  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,

Sulfato de amonio (úrea)  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

**Fósforo:**

Hiper-fosfato, al 21% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (44% P)

**Potasio:**

Oxido de potasio, 61% de  $\text{K}_2\text{O}$  (83% K)

**60 libras de fertilizante 12-12-12 significa:**

12% N,  $0.12 \times 60 = 7.2$  lbs

12%  $\text{P}_2\text{O}_5$  or (  $0.12 \times 0.44 \times 60 = 3.16$  lbs de P

12%  $\text{K}_2\text{O}$  or (  $0.12 \times 0.83 \times 60 = 5.97$  lbs de K

## 4 SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DE LIMPIEZA

La tendencia de hoy es hacia la acción remedial, porque ambos, el diseño del sitio y el regulador favorecen la limpieza en lugar de los muestreos interminables y los estudios.

Un cambio se ha dado hacia el establecimiento de los objetivos de limpieza basados en el riesgo. En lugar de ajustar una concentración del compuesto específico para todos los sitios, el límite varía de sitio a sitio dependiendo del impacto en los receptores potenciales.

Por ejemplo, un límite más exigente puede aplicar a un sitio donde los pozos de monitoreo aguas-abajo son usados para suministrar agua potable que aquellos sitios donde no hay pozos de monitoreo.

La meta de limpieza para cada contaminante de interés es esencial para la selección de las tecnologías de remediación.

En esta proyecto asumimos que la naturaleza y la extensión del contaminante son conocidas y que las metas de limpieza se han establecido para cualquier sitio contaminado.

La selección de la más apropiada tecnología de remediación envuelve la consideración de los siguientes aspectos:

- Tecnologías de tratamiento o procesos que pueden ser aplicables
- Opciones potencialmente aplicables que pueden implementarse en el sitio.
- En orden de las múltiples etapas de tratamiento que se pueden aplicar.
- La efectividad de las etapas de limpieza en cada alternativa.
- Cuánto durará y cuánto costará cada alternativa de limpiez.

### 4.1 Evaluación de Tecnologías

La EPA ha elaborado un sin número de documentos, donde establece la importancia del criterio de selección de la tecnología de remediación pero no dan datos cuantitativos para cada proceso. Sin embargo, información más completa suministra datos que puede ser usada en el barrido y comparación de los procesos, estos típicamente incluyen:

- Medio aplicable: agua o suelo.
- Si el proceso aplica in situ o ex situ.
- Porcentaje de reducción del contaminante/o mínima concentración alcanzable.
- Cambio en la movilidad del contaminante.
- Cambio en el volumen del contaminante.
- Productos secundarios, emisiones residuales y efluentes.
- Costos para aplicaciones típicas.

### **Fuentes de literatura**

Para escenarios específicos varias referencias suministran información adecuada para la selección inicial y el barrido de las opciones de tratamiento para escenarios de limpieza específica.

## **4.2 Selección del Método de tratamiento**

El procedimiento para seleccionar la alternativa más apropiada debe asegurar que el más apropiado proceso de tratamiento o conjunto de procesos es usado para eliminar los contaminantes presentes en el sitio.

Los criterios para evaluar las alternativas son:

- Efectividad.
- Implementabilidad y
- Costo.

### **El proceso de selección se desarrolla en 4 principales etapas:**

- Preparar una lista de tecnologías potencialmente aplicables.
- Formular alternativas de tratamiento que sean viables técnicamente.
- Eliminar cuantitativamente la efectividad de cada alternativa.
- Escoja entre las alternativas viables técnicamente.

### **a) ETAPA I : Selección Amplia**

#### **Objetivo**

Reducir el número de tecnologías en consideración con un mínimo de información del sitio.

## Localización

In-situ o exsitu. Biorremediación, fijación y extracción del suelo con vapor (in situ y ex situ).

## Tipo de medio

Localización del medio (in situ o ex situ).

### - In situ medios

Aguas superficiales, suelo de la zona vadosa, aguas subterráneas.

### - Ex situ medios

Se clasifican generalmente de acuerdo a su forma física: líquidos, sólidos particulados, sólidos a granel, gases y residuos de procesos.

Por ejemplo: corrientes gaseosas son generadas como parte de un tratamiento in situ tal como la extracción del suelo con vapor.

## Tipo de Contaminante.

La más simple clasificación: orgánico/inorgánico. Esta amplia clasificación es adecuada para determinar la aplicabilidad de algunas tecnologías. La incineración es aplicable a compuestos orgánicos.

Propiedades físicas y biológicas:

Volatilidad	volátil	semi-volátil	no volátil
Movilidad	móvil	inmóvil	
Biodegradabilidad	biodegradable	no-biodegradable	



Las principales propiedades físicas para caracterizar la volatilidad del contaminante son:

- **La constante de Henry.**

Es la medida de la propensión de un compuesto disuelto a volatilizarse de la fase acuosa.

Importante para contaminantes volátiles disueltos en aguas subterráneas.

- **Presión de vapor**

Importante para volátiles no disueltos en fases líquidas orgánicas. La presión de vapor de un contaminante orgánico a temperatura ambiente es usado para caracterizar volatilidad. Contaminantes orgánicos con altas presiones a temperatura ambiente tienden a ser volátiles.

- **La movilidad**

Esta categorización es fuertemente dependiente del tipo de suelo. El coeficiente de partición octanol/agua, el coeficiente de adsorción suelo/agua y el coeficiente de partición carbón/materia se usan para clasificar el contaminante como móvil o inmóvil.

El coeficiente de partición octanol/agua ( $K_{ow}$ ) relaciona la concentración de equilibrio de un compuesto orgánico en octanol a la concentración en agua. Este coeficiente mide la hidrofobicidad y ayuda a indicar si el compuesto probablemente se encuentra o migra a la fase orgánica inmisible.

Compuestos que tiene bajo  $K_{ow} < 10$  son relativamente hidrofílicos y tienden a tener alta solubilidad en agua y bajos coeficientes de adsorción suelo/sedimento.

Estos son químicos móviles que son más fáciles de remover de los acuíferos con sistemas de bombeo, tratamiento y de suelos no-saturados con flascheo de suelo o tecnologías de lavado.

Si  $K_{ow}$  es mayor que 10.000 es considerado hidrofóbico y se tiende a acumular en las superficies orgánicas tales como suelo húmico y especies acuáticas.

Estos químicos inmóviles son generalmente más fáciles de fijar en el sitio con tecnologías de adsorción o remover del suelo con extracción con solventes.



El coeficiente de adsorción suelo/agua indica como el contaminante se distribuye entre el sólido y la fase acuosa.

$$K_d = \frac{\text{Concentración contaminante en el suelo}}{\text{Concentración contaminante en equilibrio en agua}}$$

Bajo  $K_d$  indica que el contaminante tiene poca tendencia a adsorberse el sólido y será altamente móvil y con alta probabilidad de esparcirse a los suelos de los alrededores y agua; un alto  $k_d$  indica que el contaminante se absorbe fuertemente al material sólido y es menos móvil.

El coeficiente de partición carbón/material orgánica es el coeficiente de adsorción al suelo normalizado por el contenido de carbón orgánico del suelo. Esta constante es la medida de la tendencia del químico orgánico absorberse a la materia orgánica del suelo.

### **Susceptibilidad a biodegradación:**

Compuestos inorgánicos (con pocas excepciones como los nitratos) no son biodegradables y las moléculas orgánicas con gran número de halógenos son no biodegradables, la biodegradabilidad se establece con ayuda de literatura donde se referencia bajo qué condiciones: aeróbica, anaeróbica/cometabólica. Moléculas grandes de hidrocarburos se biodegradan más lentamente que moléculas pequeñas.

### **Mecanismos de liberación:**

Los mecanismos de liberación del potencial contaminante se consideran en la selección de tecnologías in situ.

Estos mecanismos de liberación determinan cuánta contaminación desde el sitio podría afectar la salud humana. Los potenciales mecanismos son:

- Infiltración a aguas superficiales
- Infiltración a aguas subterráneas
- Volatilización al aire
- Directa (ingestión de suelo/agua contaminada)

### **Ejemplo de la etapa 1.**

Problema: zona vadosa contaminada con percloroetileno (PCE)

Análisis de riesgos: Infiltración a aguas subterráneas

Información:

- Contaminante
- Medio
- Mecanismo de liberación
- Posibles tecnologías.

El tipo de medio (suelo de zona vadosa) elimina tecnologías que aplican solo al acuífero, y la tendencia de no excavar elimina todas las tecnologías ex situ.

PCE: Contaminante volátil (moderadamente) móvil en la mayoría de suelos así que tecnologías como SVE (extracción de suelo con vapor) y el flasheo de suelo son candidatos.

PCE no es fácilmente biodegradable y las tecnologías biológicas in situ se pueden descartar.

Tecnologías potenciales:

- Cubrir el sitio
- SVE: con aire del ambiente
- SVE: un aire caliente
- Calentamiento del suelo in situ
- Flasheo del suelo
- Vitrificación in situ
- Separación electrocinética

### **b) ETAPA II**

#### **Condiciones inhabilitantes y orden lógico:**

Requiere información adicional acerca del sitio, medio y contaminantes para determinar primero si esas condiciones hacen la implementación de las tecnologías no viables.

Es importante resaltar que una tecnología puede no ser aplicable al medio en un estado inicial, pero la aplicación de una tecnología de pre-tratamiento quita la condición inhabilitante y permite el uso de la tecnología.

Sitio y condiciones del medio (ambiente)

Medio (soporte)

Distribución de partículas del suelo son importantes in situ y ex situ - tratamientos del suelo.

Contenido de materia orgánica.

Materiales sueltos, arenas, finas gruesas en bajo carbón orgánico son fáciles de tratar.

Limo fino, arcilla tienen áreas superficiales altas, tienden a retener grandes cantidades de agua y unir contaminantes, decreciendo movilidad de fase orgánica.

Fuertes uniones de los contaminantes reduce la efectividad del lavado del suelo, y el flasheo del suelo. La alta capacidad de retener agua produce bajas conductividades hidráulicas y baja permeabilidad al aire.

Esto es importante en la zona vadosa y el suelo del acuífero y pueden reducir la efectividad del pump & treat (bombeo y tratamiento) y muchas tecnologías in situ, incluyendo flasheo del suelo, air sparging, biodegradación y extracción del suelo con vapor (SVE).

PH = Afecta movilidad, pH puede hacer algún contaminante inorgánico inmóvil; no puede removerse con operaciones de pump y treat. Otras tecnologías requieren pretratamiento.

Concentración de sólidos: taponan lechos, afectan la eficiencia de oxidantes, requieren pretratamiento: sedimentación, floculación, coagulación.

### **Contaminantes:**

Cantidad de específico contaminante: afecta aplicabilidad de tecnología.

Por ejemplo, las altas concentraciones de contaminante orgánico afectan la biodegradación y sobrecarga otros procesos como carbón activado.

La habilidad para extraer un contaminante está relacionada con la movilidad del contaminante y las propiedades del suelo.

### **Orden lógico de tecnología**

Se hace categorizando las tecnologías individuales y mirando el orden lógico de esas amplias categorías. Estas se manejan diferenciadamente para problemas in situ y ex situ.

Las tecnologías in situ caen dentro de un amplio grupo de tratamiento:

- Inmovilización y
- Control.

Las tecnologías de tratamiento destruyen o transportan una porción del contaminante del sitio, dejando la mayoría del medio in situ (SVE).

### **Ejemplo de la Etapa II**

Se requiere información adicional del suelo para determinar si la corta lista de tecnologías generadas en la primera etapa se pueden implementar en el sitio. Si el sitio hipotético tiene arcilla en la zona vadosa con baja permeabilidad, tecnologías tales como el SVE y SVE mejorado con aire caliente no son factibles porque las cantidades suficientes de aire no pueden ser transportadas a través del suelo para remover contaminación.

También el flasheo del suelo no es práctico con baja permeabilidad, si adecuadas cantidades de agua no se pueden infiltrar.

Asumiendo que el contaminante ha penetrado a 5 m de profundidad, la vitrificación in situ sería impráctica. Esto deja sólo 3 tecnologías que podrían ser aplicadas exitosamente en el sitio – recubrimiento, calentamiento del suelo in situ, separación electrocinética.

El ordenamiento lógico indicaría que esas 3 tecnologías son usadas en combinación y el recubrimiento sería aplicado de último.

El calentamiento in situ precedería la electrocinética para maximizar las concentraciones de orgánicos volátiles y semi-volátiles extractados para ser tratados en extracción de gas del suelo y tratamiento asociado con calentamiento in situ del suelo.

### **c) ETAPA III**

#### **Estimación cuantitativa de la efectividad**

Las dos primeras etapas en el proceso de selección de un tren de potenciales aplicables tecnologías que pueden aplicarse al sitio.

La tercera etapa consiste en usar modelos que requieran mínima información para estimar cuantitativamente la efectividad y ayudar a determinar si los objetivos establecidos en el sitio se alcanzaron.

## **Protocolo para Biorremediación de un suelo contaminado**

Para la evaluación e implementación de biorremediación involucre diferentes etapas.

Información relacionada con el contaminante y el medio contaminado. Esta se debe coleccionar durante la caracterización del sitio y los estados del estudio de factibilidad.

Estudio de Tratabilidad:

se realiza para desarrollar información sobre la efectividad de la biorremediación para el contaminante y el medio contaminado específicos y para optimizar parámetros de proceso. Las velocidades de remoción de contaminante, los parámetros de escalado deben considerarse antes de la etapa de diseño de un proceso.

### **Procesos convencionales:**

Los procesos convencionales de tratamiento por suelos contaminados típicamente son modificaciones o mejoras al proceso aerobio, los cuales fueron originalmente desarrollados para el landfarming de residuos.

Los tratamientos in situ: Inyección/infiltración de TEA, nutrientes y bacterias.

Componentes requeridos para biodegradación:

- Microorganismos
- Fuente de carbono
- Nutrientes
- Agua

El estudio de biotratabilidad evalúa la presencia de estos componentes y si necesitan complementarse, se requiere información sobre:

- Balance de masa.
- screening de lab
- Características del sitio y contaminante para determinar aplicaciones y limitaciones para usar en la tecnología de remediación de un sitio específico, la cual usualmente se refiere a:

1. Tiempo requerido para limpieza
2. Nivel de limpieza alcanzable

### 3. Costo de limpieza

Los factores ambientales que afectarán los esfuerzos de Biorremediación son:

- Disponibilidad de oxígeno y nutrientes
- Contenido de humedad del suelo
- pH
- Estructura del suelo y materia orgánica
- Temperatura
- Solubilidad del contaminante
- [Contaminante]
- [Microorganismo]

#### **Microorganismos:**

La disponibilidad y viabilidad de microorganismos indígenas del medio contaminado se determinan durante los estudios de tratabilidad. Es deseable mejorar la actividad microbiana de organismos indígenas, más que usar microorganismos exógenos porque los microorganismos indígenas están aclimatados al material de desecho.

#### **Requerimientos de sustrato:**

Microorganismos requieren un sustrato primario, el cual es la fuente de carbón y energía; también llamado donador de e-, en la reacción redox gobernando la oxidación de hidrocarburo.

Idealmente el contaminante de interés sirve como sustrato primario. Si el contaminante de interés no puede ser degradado como sustrato primario, un compuesto análogo debe adicionarse y el contaminante de interés puede metabolizarse o degradarse como sustrato secundario.

#### **Requerimiento de nutrientes:**

Los nutrientes incluyen ambos los macro y los micronutrientes y están basados en la composición de las células. Los macronutrientes incluyen nitrógeno, fósforo, azufre, hierro, potasio, calcio, magnesio, y manganeso.

El nitrógeno y el fósforo son los principales requerimientos en los sistemas de biorremediación de suelo porque el suelo les suministra los otros nutrientes, los cuales se necesitan en muchas más pequeñas cantidades.

**Requerimientos de oxígeno:**

Los requerimientos de oxígeno para sistemas aeróbico, se determinan por balance de masa.

**Foco y objetivos de estudios de tratabilidad:**

Hay dos objetivos fundamentales de los estudios, los cuales definen el alcance del estudio.

- Forma rápida y no costosa de evaluar la susceptibilidad de los suelos a tratamiento biológico.
- Determinar la velocidad y la extensión de tratamiento que puede lograrse.

Objetivo secundarios:

- Mejor entendimiento

**Fase I:**

Realizada durante la investigación e estudio de factibilidad, para obtener información comparativa para la selección de la tecnología.

Determinar si la biorremediación es una actividad apropiada, dadas las características hidrogeológicas y características del contaminante.

**Fase II:**

El estudio de tratabilidad es apropiado después de que la biorremediación ha sido seleccionada como tecnología de tratamiento, para suministrar criterio de diseño para un proyecto de remediación a escala industrial.

Elementos primarios de protocolo de tratabilidad del suelo:

El protocolo se basa en la premisa de que los contaminantes químicos deben primero desorberse y difundirse desde el suelo y entrar a la fase acuosa para que puedan asimilarse por las bacterias y degradados.

El protocolo del estudio de tratabilidad está diseñado para evaluar:

- Relaciones del equilibrio de sorción.
- Cinética de sorción.
- Oxidación biológica

**La fase I** consiste de la caracterización completa del suelo para los parámetros físicos.

Durante la fase II la velocidad y la extensión de la desorción del contaminante. La habilidad de los microbios a biodegradar los contaminantes en condiciones aerobias o anaerobias puede evaluarse.

Estos tests no intentan simular los procesos de tratamiento del suelo sino examinar la biodegradabilidad de los contaminantes en condiciones ambientales óptimas. Los reactores tipo slurry maximizan la transferencia de masa del contaminante y aseguran la velocidad de desorción del suelo al agua lo más rápido posible.

El reactor slurry y el test de desorción se usan para determinar la relación entre la extensión de la desorción del contaminante y la extensión de la biodegradación.

Los resultados de desorción también suministran un indicativo de la percolación de los contaminantes del suelo.

#### **Fase I. Caracterización del suelo:**

Objetivo: definir características químicas, microbiológicas y físicas del suelo.

Análisis químicos: usados para identificar los químicos de interés y su concentración para un sitio particular. Ayudan a determinar la cantidad del suelo, nutrientes y otros aditivos requeridos para la desorción del suelo y test en slurry.

Los siguientes test deben realizarse:

- GC análisis de compuestos orgánicos volátiles y contaminantes extractables de interés
- Carbono orgánico total
- NH<sub>4</sub>, fósforo
- NO<sub>3</sub>
- Potasio
- Sulfato



- pH
- Humedad
- Potencial Redox
- Metales: Hierro, manganeso, magnesio, cobre y níquel

Enumeración y composición microbiana:

La caracterización microbiana incluye la enumeración de microbios totales y degradadores de contaminantes específicos.

Este monitoreo se hace con un recuento en placa. Un barrido preliminar de los degradadores específicos de hidrocarburos se realiza en un medio que suministra solo los nutrientes inorgánicos necesarios requeridos para el crecimiento necesario y no una fuente de carbón. El contaminante sirve como única fuente de carbón. Los aislados sin o pobre crecimiento, se consideran no degradadores.

Los restantes aislados se usaran en los sistemas de reacción a escala banco.

Pruebas de toxicidad:

Bioensayos se usan para determinar si las sustancias tóxicas inhiben la biodegradación.

El microtox es un ensayo de toxicidad en fase acuosa que mide la reducción de la luz como respuesta a la presencia de contaminante.

Caracterización física:

La distribución del tamaño de partícula se usa para interpretar los resultados de desorción y en las pruebas del reactor slurry , determinar si la biorremediación in situ es factible con respecto a las consideraciones.

## **Fase II**

### **Etapas I: pruebas de desorción abiótica**

La determinación experimental de los coeficientes de partición suministran una rápida indicación de la extensión a la cual los químicos orgánicos lixivian, el grado en el cual los químicos desorben del suelo a la solución están directamente correlacionados con su susceptibilidad a biodegradar.

Si un específico químico orgánico se detecta cerca de la solubilidad en agua, entonces se espera que la biodegradación ocurra, de otro lado si el compuesto no se detecta en solución, entonces es improbable que la biorremediación ocurra.

## **Etapas II**

Ensayo en reactor biológico slurry:

Se opera para examinar la habilidad de los microorganismos para biodegradar los orgánicos desorbidos en condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

En el biorreactor se maximizan las velocidades de biodegradación reduciendo o eliminando las limitaciones de transferencia de masa, suministrando las concentraciones de equilibrio alcanzables en un período corto de tiempo.

Las pruebas de biodegradación se completan en un período de 4-8 semanas. En el evento de que las bacterias indígenas no sean suficientes para la biodegradación del orgánico en la fase acuosa, el protocolo puede involucrar bioaugmentación usando microorganismos cultivados.

Después de que la viabilidad se establece, se completan los tests a escala banco y piloto para determinar los parámetros de operación del sistema, los cuales se listan así:

- Tiempo de retención de sólidos biológicos
- Tiempo de retención hidráulico.
- Sólidos totales suspendidos
- Sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado
- DBO, DQO, COT, N, P: eficiencias de remoción
- Coeficientes de rendimiento del lodo
- Velocidades del consumo de oxígeno disuelto
- Requerimientos de adición de surfactante
- Investigación potencial de nitrificación

### **Etapa III**

Ensayos en microcosmos eras/ensayos en columna: se usan para determinar la cinética de reacción, dependiendo de la opción in o ex situ que se elija.

Pruebas en microcosmos eras:

Este sistema simula el proceso de biorremediación en suelo y representa el sistema convencional para definir los parámetros de diseño, para el tratamiento biológico de suelos contaminados.

Pruebas en columna:

Este proceso simula la biodegradación de contaminantes orgánicos in situ en ambientes subterráneos.

Una columna vertical de suelo contaminado se usa, permitiendo a la solución de agua, microorganismos y nutrientes fluir a través del sistema.

La conductividad hidráulica puede evaluarse, así como el potencial taponamiento debido a la generación de biomasa.

El bioensuciamiento, común con sistemas in situ, es causado por la pobre permeabilidad del suelo e inhibe el flujo de materiales aplicados a través de la matriz. El resultante taponamiento impide el mantenimiento de la actividad biológica.

El protocolo para el estudio de tratabilidad está diseñado para suministrar máxima información con respecto a la viabilidad y eficiencia de biorremediación, con un mínimo de esfuerzo de laboratorio.

La fase I suministra la información con respecto a parámetros químicos y microbiológicos requeridos para determinar si la biorremediación es factible, dadas las condiciones del sitio.

Una vez la biorremediación se ha relacionado como tecnología apropiada, la fase II suministra información relacionada con el punto final alcanzable.

El análisis de datos puede predecir la velocidad de remoción.

## 5 APLICACIÓN DE SISTEMAS DE BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS

### 5.1 Medidas Biocorrectivas

Las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación consisten principalmente en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas en sustancias de carácter menos tóxico o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana.

Las medidas biocorrectoras se llevan empleando en la descontaminación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos desde hace décadas con importante éxito.

Estas técnicas biológicas pueden ser de tipo aerobio, si se producen en condiciones aerobias (presencia de un medio oxidante), o bien de tipo anaerobio, en condiciones anaerobias (medio reductor).

El presente artículo se centrará en tres tipos de medidas biocorrectoras de tipo aerobio: la ventilación forzada del aire en el suelo o bioventing, el compostaje de suelos o biopilas, y la biorrecuperación natural del suelo o atenuación natural.

Estos sistemas de descontaminación se basan en la digestión de las sustancias orgánicas por los microorganismos, de la cual obtienen la fuente de carbono necesaria para el crecimiento de sus células y una fuente de energía para llevar a cabo todas las funciones metabólicas que necesitan sus células para su crecimiento.

Para que estos procesos metabólicos se lleven a cabo, y puedan ser utilizados como una técnica remediativa, será necesario que existan en el medio unas condiciones fisico-químicas óptimas.

Cada uno de estos sistemas, bioventing, biopilas y atenuación natural, precisarán de unos parámetros de evaluación adecuados a cada uno, que deben encontrarse dentro de un intervalo óptimo para que la aplicación de dicha técnica sea factible y efectiva.

En general, se necesitará la existencia de determinadas poblaciones de microorganismos autóctonos capaces de utilizar los hidrocarburos como fuente

nutricional y de energía. A su vez, será necesario un determinado número de aceptores de electrones que enzimáticamente oxide los carbonos procedentes de los hidrocarburos, así como unas condiciones adecuadas de pH, nutrientes, temperatura, humedad, textura y estructura del suelo, y concentración de los contaminantes.

El diseño de estos sistemas de tratamiento se llevará a cabo estableciendo varias etapas de trabajo:

- Investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento
- Análisis y elección de las medidas biocorrectivas
- Evaluación de la efectividad del sistema elegido
- Diseño y evaluación del sistema
- Evaluación del control y seguimiento
- Análisis e interpretación de resultados

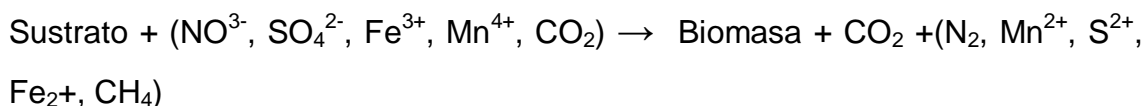
## 5.2 Fundamento Bioquímico de la Biodegradación

El fundamento bioquímico de la biorremediación se basa en que en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células, se van a producir una serie de reacciones de óxido-reducción cuyo fin es la obtención de energía. La cadena la inicia un sustrato orgánico (compuestos hidrocarburos) que es externo a la célula y que actúa como dador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustancia.

Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio (ver las reacciones).

### Degradación aerobia:



**Degradación anaerobia:**

La concentración y composición de la comunidad microbiana y la tasa de transformación de contaminantes está influenciada por diversos factores:

- **Necesidad de nutrientes:** El metabolismo microbiano está orientado a la reproducción de los organismos y éstos requieren que los constituyentes químicos se encuentren disponibles para su asimilación y sintetización. Los nutrientes principalmente requeridos son el fósforo y el nitrógeno. Por lo general suele haber en el suelo una concentración de nutrientes suficiente, sin embargo, si estos no se encontrasen en el rango normal se puede adicionar mayor cantidad al medio. El rango normal de C:N:P depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1.
- **pH del suelo:** Afecta significativamente en la actividad microbiana. El crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre 6 y 8. Así mismo el pH también afecta directamente en la solubilidad del fósforo y en el transporte de metales pesados en el suelo. La acidificación o la reducción del pH en el suelo se puede realizar adicionando azufre o compuestos del azufre.
- **Temperatura:** Generalmente las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 15 y 45 °C (condiciones mesófilas), decreciendo la biodegradación por desnaturalización de las enzimas a temperaturas superiores a 40 °C e inhibiéndose a inferiores a 0 °C.
- **Humedad:** Los microorganismos requieren unas condiciones mínimas de humedad para su crecimiento. El agua forma parte del protoplasma bacteriano y sirve como medio de transporte a través del cual los compuestos orgánicos y nutrientes son movilizados hasta el interior de las células. Un exceso de humedad inhibirá el crecimiento bacteriano al reducir la concentración de oxígeno en el suelo. El rango varía en función de la técnica.

- **Estructura química del hidrocarburo:** la inherente biodegradabilidad de un hidrocarburo depende, en gran medida, de su estructura molecular. Siendo los parámetros que más van a afectar la halogenación, la existencia de ramificaciones, la baja solubilidad en el agua y la diferente carga atómica.

### 5.3 Diseño y Aplicación de los Sistemas de Biotratamiento

El diseño de estos sistemas de tratamiento se llevará a cabo estableciendo varias etapas de trabajo, como sigue:



Diagrama: Esquema de diseño y aplicación de los sistemas de biotratamiento

#### 5.3.1. Fase de investigación y caracterización de la contaminación y del Emplazamiento

El primer paso para preparar el diseño de biotratamiento en el suelo es la realización de una completa investigación del medio, que incluye

principalmente el estudio exhaustivo de la caracterización del emplazamiento y del tipo y concentración de la contaminación existente.

La caracterización del emplazamiento se llevará a cabo mediante el estudio del mismo detallando la volumetría del suelo a tratar, las condiciones geológicas e hidrogeológicas, analizando las características del suelo y sus propiedades (pH, granulometría, humedad, porosidad, etc).

La caracterización del contaminante se centrará en la investigación del tipo y concentración del mismo, así como la biodisponibilidad de los compuestos en el suelo (aceptores de electrones, metales pesados, nutrientes, etc).

### **5.3.2. Análisis y elección de las medidas biocorrectivas**

De la fase de investigación inicial, una vez identificadas las características del emplazamiento, del suelo y del contaminante, se podrá pasar al análisis y elección de las medidas biocorrectivas más adecuadas. Para ello será necesario:

**1.** Identificar y cuantificar los contaminantes. Definiendo sus propiedades físico-químicas más importantes.

- Identificación y clasificación de compuestos.
- Concentración en suelos y aguas subterráneas.
- Caracterización de la presión de vapor, constante de Henry, densidad y grado de solubilidad.

**2.** Conocer los factores que influyen en la transformación biológica de los contaminantes.

- Factores ambientales: tales como humedad, oxígeno disuelto, temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes.
- Factores microbiológicos: presencia de microorganismos y aclimatación de las poblaciones microbianas.

**3.** Designar las medidas biocorrectivas. En función de los factores anteriormente expuestos, se elegiría el sistema de biotratamiento más adecuado.



### 5.3.3. Diseño y evaluación del sistema

Para el diseño de un sistema de biorrecuperación es necesario establecer unas etapas de trabajo, en las cuales se determinan y evalúan los parámetros fundamentales necesarios para su eficacia.

Las etapas a seguir en el diseño de un sistema de biotratamiento son:

1. Evaluación de la viabilidad de la técnica. Se estudiarán los parámetros de evaluación que definen el sistema elegido, así como se evaluará las condiciones de biotratabilidad, los objetivos de limpieza exigidos y los costes de tratamiento necesarios.
2. Evaluación del diseño. Se estudiarán los factores que afectan la eficacia de la técnica y las posibles mejoras o acondicionamientos a aplicar.
3. Evaluación del control y seguimiento.

### Control y Seguimiento

Para asegurar la correcta ejecución y un progreso adecuado del tratamiento se debe llevar a cabo un plan de control y seguimiento del sistema.

Para una correcta optimización se deberán controlar los siguientes puntos:

1. Control de las condiciones de degradación y biodegradación. Se registrará la variación de concentración de TPH, BTEX, COV's, CO<sub>2</sub> desprendido y Oxígeno disuelto, variación de nutrientes (N, P, etc)

<p><b>VOCs</b></p> <p><b>SVOCs</b></p> <p><b>Fuels</b></p> <p><b>Inorgánicos</b></p> <p><b>Radionuclides</b></p> <p><b>Explosivos</b></p>	<p><b>TPH</b></p> <p><b>BTEX</b></p> <p><b>HAPs</b></p> <p><b>Metales</b></p>
---	---

**Las sustancias que más frecuentemente se derraman son hidrocarburos tales como petróleo crudo, diesel, así como gasolinas.**

El petróleo crudo es una mezcla compleja de miles de compuestos orgánicos. La mayoría de ellos son hidrocarburos, entre los que destacan alcanos, cicloalcanos, alquenos e hidrocarburos aromáticos.

2. Control de los parámetros que afectan directamente en el funcionamiento del sistema .

#### **5.3.4. Análisis e interpretación de resultados**

En esta última etapa se analizan los resultados obtenidos, haciendo un balance de los objetivos alcanzados y los marcados inicialmente. En este punto, si fuese necesario, se deberán proponer y estudiar aquellas mejoras o modificaciones necesarias para la optimización del sistema.

#### **Cromatografía.**

Sirve básicamente para separar los componentes de una mezcla de sustancias e identificarlos con estándares adecuados.

Se ponen en contacto dos fases inmiscibles, una fase móvil y la otra estacionaria. Al final del proceso, se obtiene cada uno de los componentes de la muestra en orden creciente de interacción con la fase estacionaria.

Hay diferentes tipos de cromatografías, dependiendo principalmente del estado físico de las fases móvil y estacionario, que se combinan con diferentes detectores, según las sustancias que se desean identificar.

Para el análisis de hidrocarburos la cromatografía mas apropiada es la de gases acoplada a masa, pues con ella se cuantifican los compuestos orgánicos volátiles en diferentes tipos de matrices sólidas y en agua.

El método 8260 se basa en el procedimiento de purga y trampa con cromatografía de gases acoplada a masas (CG/EM). Esta técnica es de gran utilidad para la caracterización de compuestos específicos, por ejemplo, benceno, tolueno, etilbenceno, xileno y muchos otros compuestos volátiles más, como los hidrocarburos halogenados

#### **Espectrofotometría de Absorción Atómica**

Es una técnica selectiva y sensible que puede determinar cerca de 70 elementos que se encuentran como componentes menores o traza en la muestra (en concentraciones de hasta partes por millón).

La muestra se introduce por un capilar para hacerla llegar a una flama donde se evapora el disolvente, se disocia la sal y el elemento se reduce al estado basal, quedando apto para absorber la energía de determinada longitud de onda que proporciona, generalmente, una lámpara de cátodo hueco.

<b>Métodos analíticos recomendados</b>		
<b>Contaminante</b>	<b>Parámetro indicador</b>	<b>Método analítico</b>
Gasolina	Hidrocarburos base gasolina	EPA 8015B
Gasolina	BTEX's	EPA 8040 EPA 8060 EPA 8020 / 8021 EPA 8260 524.2 / 624 EPA S2 846
Gasolina	Benceno	EPA 8240 EPA 8260B
Diesel, turbosina, kerosene, aceites lubricantes, vaselinas y aceites combustibles ligeros	Hidrocarburos base diesel	EPA 8015B
	Hidrocarburos poliaromáticos	EPA 8310 EPA 8100 EPA 8270
Aceite gastado, Combustóleo, Petróleo crudo Emulsiones Asfalto Parafina	Hidrocarburos recuperables de petróleo	EPA 418.1 ASTM 3921

## 6 TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

Mencionaremos las tecnologías para realizar la remediación de los suelos contaminados con hidrocarburos.

### 6.1 AIR STRIPPING

Este método se emplea para la remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles tanto de la zona vadosa del suelo, como en la fase líquida. Se realiza una inyección controlada de aire en la zona saturada del suelo, para volatilizar y biodegradar los compuestos orgánicos de la napa.

Los contaminantes volátiles son arrastrados por el aire inyectado y son recogidos mediante un sistema de extracción de vapores y tratados por oxidación térmica, oxidación catalítica o adsorbida en carbón activado.

Los valores típicos de reducción de contaminantes en la zona saturada del suelo son de entre el 90% y el 99% en 9 a 15 meses. La efectividad del tratamiento se mide realizando análisis químicos de monitoreo periódicos, en función de medir el grado de degradación de los compuestos contaminantes.

### 6.2 EXTRACCIÓN DE VACÍO DE FASE DOBLE (DUAL PHASE VACUUM EXTRACTION)

La ventaja de esta tecnología es que trata al mismo tiempo el agua subterránea y los suelos contaminados con componentes volátiles.

El proceso se realiza en tiempos menores que el tradicional método de bombeo y tratamiento, usualmente aplicado en éste tipo de circunstancias.

El método de Extracción de 2 Fases (o Dual Phase) consiste en la extracción simultánea de líquidos y vapores del subsuelo.

Dicha tecnología consta de la extracción por medio de la aplicación de vacío en el subsuelo. Los productos extraídos pueden ser vapores del suelo (zona no saturada) y/o fase líquida de la zona saturada, pudiendo ésta ser producto libre sobrenadante (o Fase Libre No Acuosa) o agua subterránea con contaminante disuelto.

Esto se logra mediante la aplicación focalizada de vacío a los distintos pozos de extracción que componen un “sistema de extracción”. El descenso de la napa freática alrededor de cada pozo, hace que el suelo quede expuesto y permita una remoción más eficiente de los contaminantes mediante la

volatilización y la extracción de esos vapores. En el equipo de extracción, la fase líquida y la fase vapor se separan y pueden ser tratadas posteriormente en forma independiente.

La experiencia en la aplicación de esta metodología permite señalar que una gran ventaja, entre otras y radica en la reducción de los tiempos de remediación y la extracción de las dos fases con un solo equipo de bombeo y pozos doble propósito.

Esto significa un importante ahorro en los costos de instalación y de operación, comparado con el proceso de bombeo y tratamiento tradicional donde cada sistema opera con sus pozos específicos y sistemas de bombeo independientes complementados con extracción de vapores del suelo.

### **6.3 BOMBEO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y RECUPERACIÓN DE LIQUIDOS LIGEROS**

La recuperación de líquidos ligeros de la superficie del agua subterránea se considera una medida de corto plazo para evitar mayores daños al suelo y aguas subterráneas, sirviendo como tecnología suplementaria de otras técnicas de remediación in situ.

La extracción del producto libre se realiza por medio de bombas equipadas con dispositivos oleofílicos/hidrofóbicos que permiten la eliminación selectiva de hidrocarburos livianos.

Esta tecnología puede reforzarse con la utilización de una bomba más profunda para abatir la napa de agua, originando de esta manera un mayor gradiente hidráulico favoreciendo la movilidad del producto sobrenadante, adicionalmente se puede realizar una inyección de aire caliente en el subsuelo, disminuyendo de esta manera la viscosidad de los líquidos en la fase no acuosa, esto disminuye la saturación residual aumentando la cantidad de producto libre móvil para su eliminación.

## 6.4 LANDFARMING

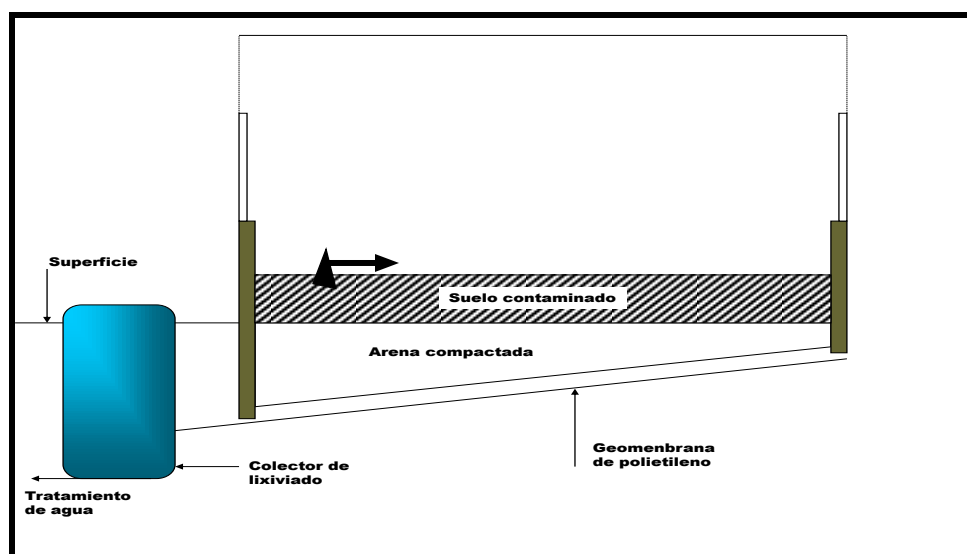
Esta metodología de tratamiento de suelo contaminado si bien se realiza dentro del predio donde se encuentra la contaminación, es una técnica ex situ, ya que se debe realizar la remoción del suelo contaminado para su adecuación al tratamiento.



El landfarming es un proceso donde se utilizan las bacterias nativas para degradar los componentes de petróleo que ocurren en el suelo, la bacteria degrada el componente orgánico, produciendo dióxido de carbono y agua.

Para el desarrollo eficiente de este proceso es necesario proveer las condiciones óptimas para el crecimiento de la población bacteriana.

Esta metodología de tratamiento está especialmente recomendada para productos semivolátiles a pesados y en predios donde existen suelos arcillosos (en el caso de no existir suelos arcillosos, se dispondrá de una impermeabilización artificial para evitar toda posibilidad de percolación de lixiviados).



El landfarming constituye en un método simultáneo de tratamiento y disposición final, donde el residuo es mezclado con la superficie del suelo para ser degradado o transformado mediante un adecuado manejo.

Comparado con otros tratamientos de disposición final como el Land Fill, el landfarming es un método de monitoreo rápido, bajo mantenimiento y alto potencial de degradación.

El landfarming constituye en un método simultáneo de tratamiento y disposición final, donde el residuo es mezclado con la superficie del suelo para ser degradado o transformado mediante un adecuado manejo.

Comparado con otros tratamientos de disposición final como el Land Fill, el landfarming es un método de monitoreo rápido, bajo mantenimiento y alto potencial de degradación.

El landfarming utiliza la superficie del suelo para descomponer los residuos aeróbicamente. Como la superficie del suelo se aísla de las aguas subterráneas por capas impermeables, es un método seguro en cuanto a las probabilidades de contaminar las napas freáticas.

El manejo de un Landfarming implica la investigación preliminar del residuo, el control del sitio de degradación, su actividad biológica, el clima, actividad de laboratorio, etc.

La velocidad de degradación depende de la disponibilidad de nutrientes, ausencia de sustancias biotóxicas y de otros parámetros como: salinidad, capacidad de intercambio iónico, pH, textura, aireación, capacidad de retención de humedad, drenaje interno y temperatura.

El suelo debe reunir condiciones que favorezcan la actividad biológica tales como buena porosidad, humedad óptima, presencia de nutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, etc.) con buena aireación y temperaturas medias.

El manejo de un Landfarming implica la investigación preliminar del residuo, el control del sitio de degradación, su actividad biológica, el clima, actividad de laboratorio, etc.

La velocidad de degradación depende de la disponibilidad de nutrientes, ausencia de sustancias biotóxicas y de otros parámetros como: salinidad, capacidad de intercambio iónico, pH, textura, aireación, capacidad de retención de humedad, drenaje interno y temperatura.

El suelo debe reunir condiciones que favorezcan la actividad biológica tales como buena porosidad, humedad óptima, presencia de nutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, etc.) con buena aireación y temperaturas medias.

En un landfarming las cepas bacterianas que se aplican al suelo dependen del residuo que se esté tratando. El área de tratamiento se debe dividir en zonas para residuos con hidrocarburos y zonas para residuos sin hidrocarburos, dado que el cultivo bacteriano es específico para cada uno y los índices de rotación son distintos. La combinación de cepas puede degradar sustancias tales como hidrocarburos, ésteres grasos, éteres, celulosa, proteínas y otras sustancias, transformándolas en agua, dióxido de carbono y biomasa con su posterior transformación en humus.

El manejo de un Landfarming implica la investigación preliminar del residuo, el control del sitio de degradación, su actividad biológica, el clima, actividad de laboratorio, etc.

La velocidad de degradación depende de la disponibilidad de nutrientes, ausencia de sustancias biotóxicas y de otros parámetros como: salinidad, capacidad de intercambio iónico, pH, textura, aireación, capacidad de retención de humedad, drenaje interno y temperatura. El suelo debe reunir condiciones que favorezcan la actividad biológica tales como buena porosidad, humedad óptima, presencia de nutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, etc.) con buena aireación y temperaturas medias.

En un landfarming las cepas bacterianas que se aplican al suelo dependen del residuo que se esté tratando. El área de tratamiento se debe dividir en zonas para residuos con hidrocarburos y zonas para residuos sin hidrocarburos, dado que el cultivo bacteriano es específico para cada uno y los índices de rotación son distintos.

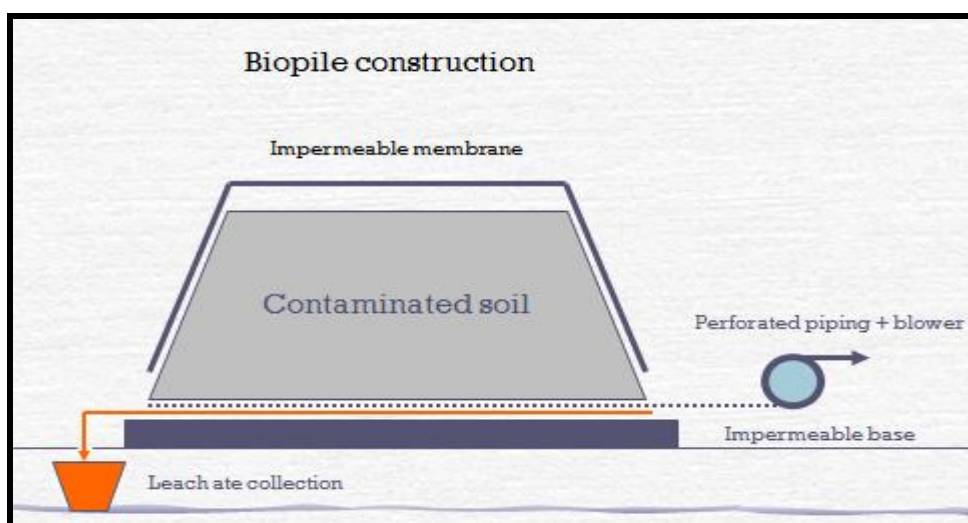
La combinación de cepas puede degradar sustancias tales como hidrocarburos, ésteres grasos, éteres, celulosa, proteínas y otras sustancias, transformándolas en agua, dióxido de carbono y biomasa con su posterior transformación en humus.



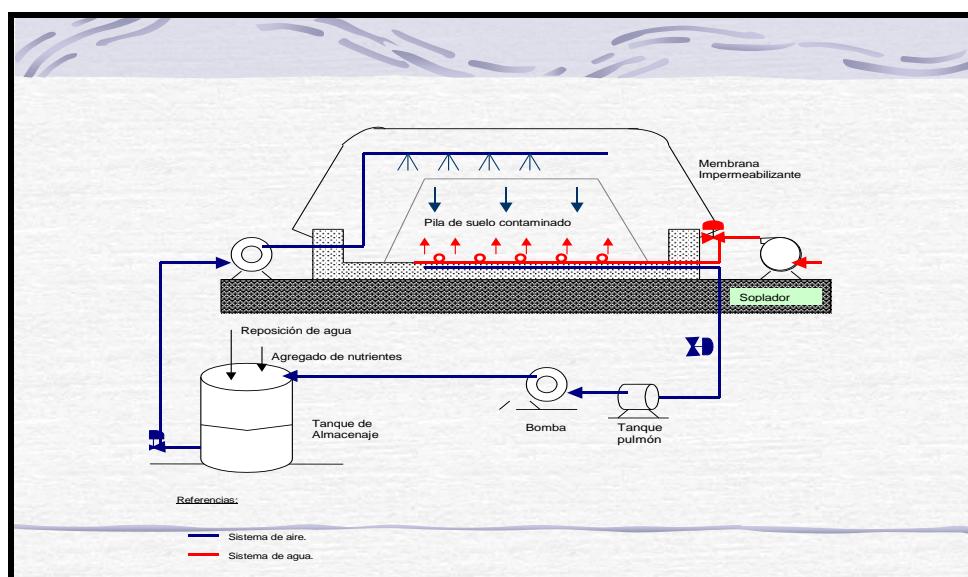
## 6.5 BIOPILAS

Si bien la biorremediación no puede manejar metales y algunos compuestos orgánicos clorados, esta tecnología puede destruir muchos compuestos peligrosos incluyendo algunos que resisten otras formas de tratamiento.

El tratamiento microbiológico es más caro que técnicas tales como extracción de vapor del suelo (SVE), pero más barato que los tratamientos ex situ (incineración en plantas de tratamiento y disposición final) y más rápido que otros métodos de remediación.



Las biopilas se utilizan cuando la sustancia contaminante es demasiado volátil como para ser tratada con la metodología de Landfarming (ya que las emisiones gaseosas serían elevadas), o cuando se quiere acelerar el proceso de remediación (esta tecnología utiliza tiempos más cortos de remediación).



Las biopilas consisten en pilas o acopios regulares de suelo situados sobre una cama de grava de 10 a 15 cm de espesor, y que contienen en su interior tuberías de aireación de PVC que son colocadas durante la construcción.

Estas cañerías están interconectadas a un soplador de presión negativa, que fuerza el pasaje del oxígeno atmosférico a través de la pila de suelo. De esta manera se tiene un alto control sobre las condiciones de remediación y el medio.

La técnica de biopilas es un tratamiento de biorrecuperación de tipo “**ex situ**” en condiciones no saturadas, consistente en la reducción de la concentración de contaminantes derivados del petróleo en suelos excavados mediante el uso de la biodegradación.

La técnica consiste en la formación de pilas de material biodegradable de dimensiones variables, formadas por suelo contaminado y materia orgánica (compost) en condiciones favorables para el desarrollo de los procesos de biodegradación de los contaminantes.

Estas pilas de compost pueden ser aireadas de forma activa, volteando la pila, o bien de forma pasiva, mediante tubos perforados de aireación.

En principio, las biopilas se pueden aplicar a la mayoría de los compuestos orgánicos, siendo más eficaz en los compuestos de carácter más ligero.

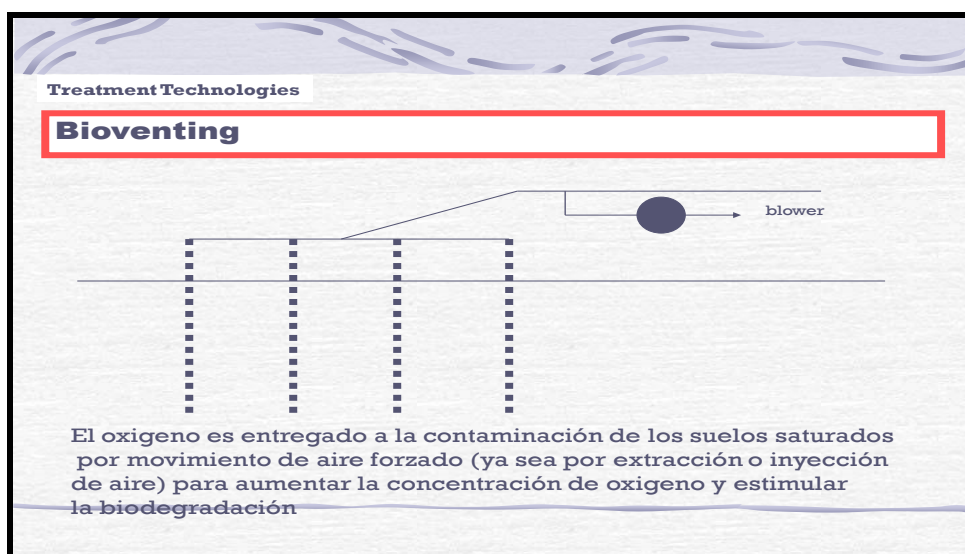
Entre los factores que influyen en la aplicación de las biopilas destacan:

- Los hidrocarburos deben ser no halogenados y deben encontrarse en el suelo en concentraciones menores a 50.000 ppm., superficie de trabajo relativamente grandes, necesidad de una población microbiana mayor a 1000UFC (Unidades Formadoras de Colonias) por gramo de suelo.
- Dada la necesidad de excavación y posterior depósito del suelo contaminado, se requiere una superficie de trabajo relativamente grande cuyas dimensiones dependen del volumen de suelo a tratar.
- Necesidad de una densidad de poblaciones microbianas (>1.000 CFU/gramo de suelo), condiciones de humedad (40-85% de capacidad de campo), temperatura (10 y 45°C), textura (baja proporción de arcillas), pH del suelo adecuadas (6 y 8) y baja presencia de metales pesados (< 2.500 ppm).
- La concentración de nutrientes en el suelo cuyo rango normal de C:N:P sea de 100:10:1.

- El tiempo de actuación puede ser alto (meses a años) y el coste bajo.

## 6.6 BIOVENTING (Inyección de Aire)

Este método se emplea para la remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's) y no Volátiles de la zona vadosa. Esta técnica consiste en aplicar un caudal bajo de aire en la zona vadosa, optimizando la ventilación de modo tal que maximice la biorremediación y se minimice la volatilización. Las concentraciones de oxígeno requeridas / necesarias para promover la biorremediación son muy inferiores a las suministradas por un sistema de SVE o Air Sparging , en general una tasa del 4% del volumen de suelo es suficiente. Esta es la razón por la cual el sistema de Bioventing, es una buena alternativa de remediación para sitios contaminados, especialmente donde los compuestos son semivolátiles, en los cuales otras tecnologías alternativas no serían efectivas.



Como se mencionaba la técnica del bioventing es un tratamiento de biorrecuperación de tipo "in situ", consistente en la ventilación forzada del suelo mediante la inyección a presión de oxígeno (aire) en la zona no saturada del suelo a través de pozos de inyección.

Debido a la aireación del suelo se va a favorecer la degradación de los hidrocarburos por dos motivos: por volatilización, facilitando la migración de la fase volátil de los contaminantes, y por biodegradación, ya que al incrementar la oxigenación del suelo se van a estimular la actividad bacteriana.

Los factores a tener en cuenta en la aplicación del bioventing o inyección de aire natural son:

- Se degradarán más fácilmente las moléculas más pequeñas (hasta C<sub>20</sub>), siendo más fácilmente biodegradables los compuestos parafinados o de cadena lineal que los compuestos aromáticos. En general, son favorables los compuestos de alta volatilidad (presión de vapor mayor de 10 mm de Hg a 20°C).
- Los suelos deben contener bajos contenidos en arcilla y ser lo más homogéneamente posible, con un valor de permeabilidad al aire adecuado ( $> 10^{-10}$  cm<sup>2</sup>).
- El principal problema es la biodisponibilidad de los microorganismos. Cuanto menor es la solubilidad de los contaminantes menor será la biodisponibilidad.
- Los aportes de oxígeno deben ser suficientes, así como la existencia de fuentes de carbono, aceptores de electrones y energía suficientes.
- No debe existir de producto libre en flotación sobre el nivel freático.
- Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 y 8), de humedad (12-30% en peso), potencial redox mayor de -50 mV, temperatura entre 0 y 40 °C y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.
- Necesidad de tiempos de actuación cortos (meses) y coste medio-alto.

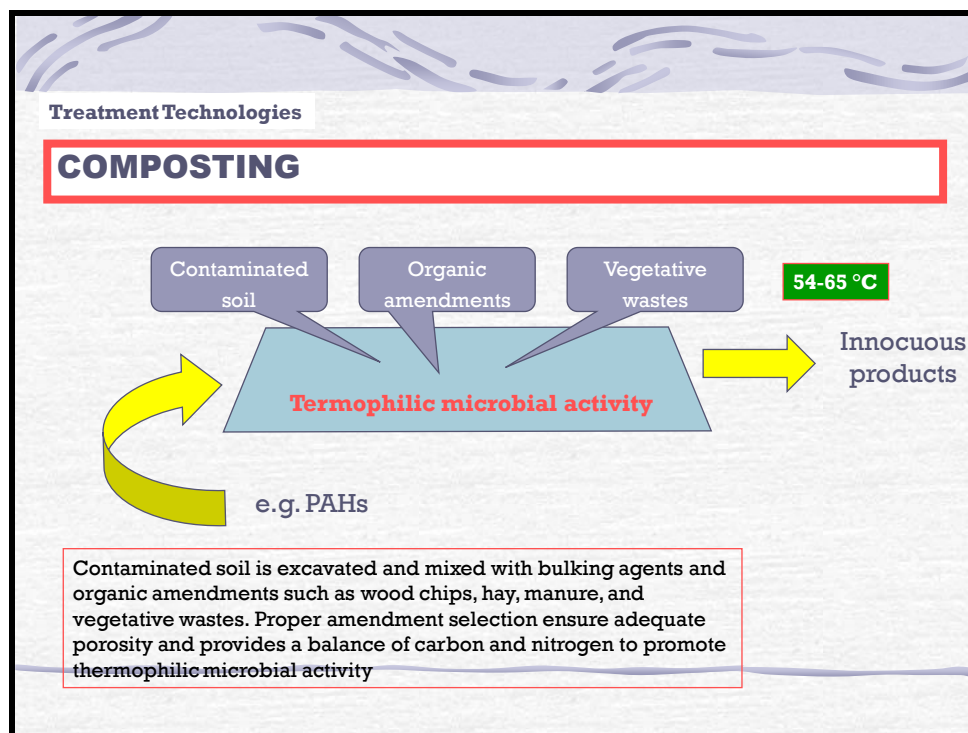
## 6.7 WINDROW COMPOSTING

La biorremediación en filas de compostaje es una tecnología de remediación de suelos de superficie, que reduce concentraciones de los constituyentes de petróleo en suelo a través de la biorremediación.

Esta tecnología usualmente involucra el esparcido en filas sobre la superficie, del suelo contaminado excavado y la estimulación de las actividades microbiana aeróbica presente en los suelos, a través de aireación y adición de minerales, nutrientes y humedad.

La mejora de la población microbiana resulta en la degradación del petróleo adsorbido a través del metabolismo de los microorganismos.

El suelo normalmente contiene un gran número de diversos microorganismos tales como, bacterias, algas, hongos, microorganismos unicelulares, y actinomicetes. En suelos con buen drenaje, los cuales son más apropiados para esta tecnología, estos organismos son generalmente aeróbicos. De éstos, las bacterias son las más numerosas y bioquímicamente más activas.



### Aplicabilidad

Composting es aplicable a suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables.

Proyectos piloto y en escala full han demostrado que el composting es capaz de reducir la concentración de explosivos como TNT a niveles aceptables.

El composting termofílico aeróbico es aplicable a suelos contaminados con HAPs.

### Limitaciones

- Se requiere espacio generalmente grande
- Se requiere excavar el suelo y puede haber desprendimiento de volátiles
- El composting resulta en un incremento de volumen
- No se pueden tratar metales pesados

Cuando no existen microorganismos nativos, es posible inocular al suelo microorganismos cultivados o estiércol de animales (típicamente de vacas o pollos). Incorporando estiércol se están realizando dos cosas, por un lado se está aumentando la población microbiana y por otro lado se está proveyendo nutrientes adicionales.

Para sostener el crecimiento de la población bacteriana, las pilas de compostaje deben mantener un rango de pH entre 6 y 8 durante su operación, siendo 7 un valor óptimo. Suelos fuera de este rango requerirán un ajuste, si el pH está por debajo del mencionado rango, este puede aumentarse con la adición de cal y en caso contrario, puede disminuirse con la adición de azufre.

Los microorganismos requieren de una fuente de carbono para el crecimiento celular y una fuente de energía para mantener las funciones metabólicas requeridas para su crecimiento. Las fuentes de carbono pueden provenir del contaminante, del carbono contenido en fertilizantes o aditivos y agentes de esponjamiento (“bulking agents”) del suelo tales como: paja, viruta de madera, aserrín.

Estos microorganismos también requieren de nitrógeno y fósforo para su crecimiento celular. Los fertilizantes utilizados en horticultura pueden suplir la demanda de nutrientes requerida por los microorganismos activos en este tipo de procesos de biorremediación, y son mucho más económicos que la preparación de estos micronutrientes a partir de la combinación de los elementos originales.

Los microorganismos del suelo además necesitan de una hidratación adecuada para su correcto desarrollo. De todos modos, una excesiva hidratación del suelo restringe el movimiento del aire en el subsuelo y reduce la disponibilidad de oxígeno el cual es sumamente necesario para los procesos metabólicos aeróbicos de las bacterias.

El rango ideal de hidratación del suelo es de 20 a 30 % en peso. En estas procesos de biorremediación en pilas de compostaje el suelo debe ser hidratado periódicamente ya que se seca con facilidad como consecuencia de la evaporación, la que a su vez se ve incrementada durante las operaciones de aireación y bajo condiciones de clima cálido especialmente

en verano. En suelos de grano fino, durante operaciones de compostaje e hidratación puede producirse su apelmazamiento.

Cuando esto ocurre, el oxígeno no puede infiltrarse a través de las cortezas de estos grumos. Como resultado, la población de bacterias disminuye y por ende el proceso de degradación de hidrocarburo se vuelve más lento.

Para evitar este apelmazamiento, el "cultivo" del suelo puede implementarse con la adición de agentes de esponjamiento durante la distribución inicial y preparación ("cultivo") del suelo.

Para comenzar el tratamiento se construye una pista de trabajo impermeabilizada mediante la preparación de un suelo cemento pobre, y con el ajuste de las pendientes hacia un sumidero, se logrará un control total y absoluto de los lixiviados, los cuales serán reinyectados en el suelo a tratar, generando un ciclo semi - cerrado de circulación de agua.

Se excava el suelo en los sitios contaminados denominado como "hot spots" (localizaciones específicas con alta contaminación) para luego trasladarlo a una zona de tratamiento específica.

Se distribuye el suelo en filas o en pilas de se 1,5 m de altura por 2,1 a 2,5m de ancho. Los nutrientes biológicos se agregarán de acuerdo a las necesidades para lograr y mantener una relación C:N:P apropiada. Los agentes de esponjamiento tales como paja, cáscaras de semillas y/o estiércol se agregarán para proveer una fuente adicional de carbono.

El agua se provee junto con las nutrientes para lograr una óptima hidratación, la que se medirá en el campo utilizando un tensiómetro. Así suelo, nutrientes y otros aditivos son exhaustivamente mezclados por un extenso mecanismo de compostaje.

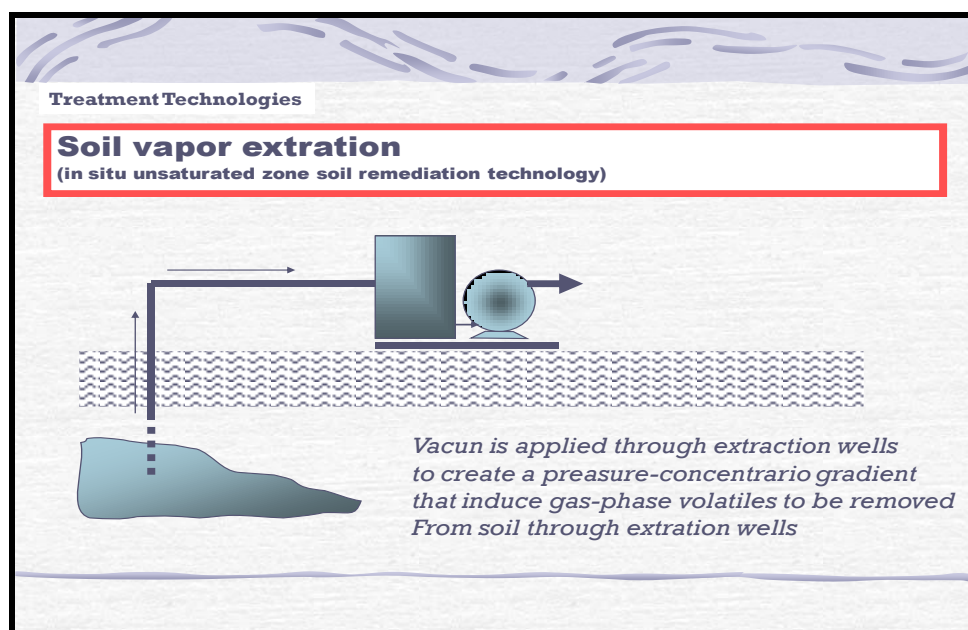
Las cavas originadas por el retiro de estos "hot spots", son tapadas con suelo limpio. Luego se prosigue con la operación del sistema de remediación, realizando una volteo periódico del suelo en tratamiento.

## **6.8 EXTRACCION DE VAPOR DEL SUELO**

Este método se emplea para la remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles de la zona vadosa del suelo. El proceso consiste en el paso de una corriente de aire a través del suelo, produciéndose así la transferencia de los contaminantes desde la matriz del suelo a la corriente de aire.

Los vapores extraídos son destruidos por el calor o por oxidación catalítica o adsorbidos en carbón activado.

Esta técnica promueve un bioventing debido al incremento del flujo de aire, lo que estimula la biodegradación natural. Para optimizar el sistema es necesario una apropiada ubicación de los pozos y una adecuada selección del tamaño de las bombas.



## 6.9 ASPERSIÓN POR AIRE (AIR SPARGING)

Este método se emplea para la remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's) tanto de la zona vadosa del suelo (adsorbido), como en la fase líquida (disuelto). Las características del contaminante que favorecen este método son: alta volatilidad, baja solubilidad y bajo coeficiente de adsorción.

Con estas características el contaminante tenderá situarse en la fase gaseosa durante la aplicación de este método de remediación.

El mecanismo de remoción es un proceso físico químico de desorción de los contaminantes de la fase disuelta y/o adsorbida, logrado gracias a la circulación de aire forzado dentro de la matriz del suelo.

La aspersion por aire (AS) significa introducir aire a presión en el subsuelo, a través de un pozo practicado hasta un punto por debajo de la zona contaminada.



Los contaminantes volátiles son arrastrados por el aire inyectado, los que son recogidos mediante la extracción de vapores del suelo.

Con la aspersion, se crea un de sorbedor de aire en la zona saturada, donde el suelo actúa como empaque.

El aire es inyectado y se le permite fluir a través de la columna de agua sobre el empaque.

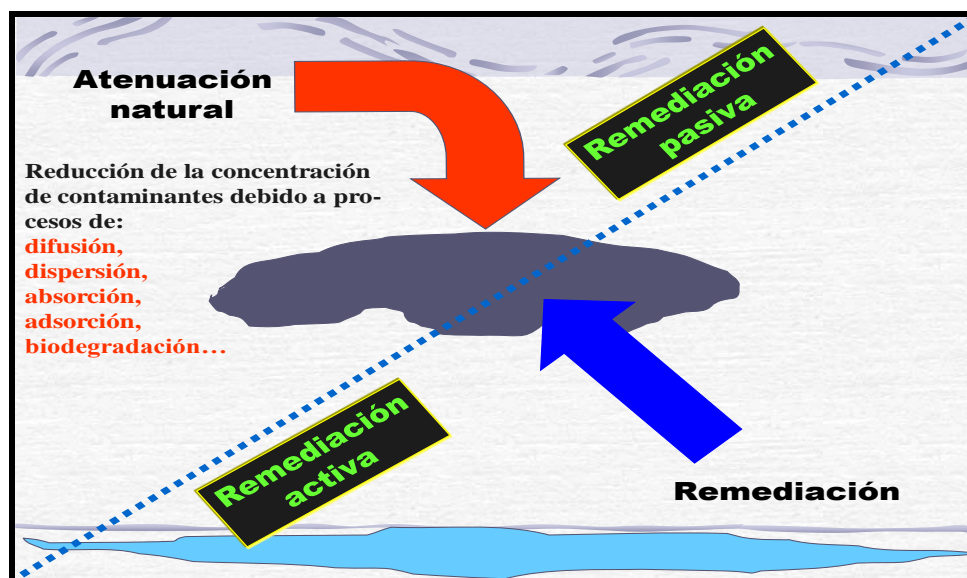
Es un método in situ que combina el efecto de la ventilación con la utilización de los microorganismos autóctonos para degradar compuestos orgánicos absorbidos por el suelo en la zona saturada. En este el aire y los nutrientes se inyectan en la zona saturada para mejorar la actividad de los microorganismos presentes.

Esta técnica se utiliza para la degradación de compuestos orgánicos en el suelo y aguas subterráneas.

## 6.10 LA ATENUACIÓN NATURAL

La atenuación natural, aunque no está considerada como una técnica de descontaminación propiamente dicha, está englobada dentro de las técnicas de remediación in situ de muy bajo costo.

Su característica principal es la utilización de los procesos fisico-químicos de interacción contaminante-suelo y los procesos de biodegradación que tienen lugar de forma natural en el medio. Estos procesos se conocen como procesos de biotransformación natural.



Los procesos de biotransformación natural son aquellos que van a reducir la concentración de los contaminantes y entre los que se encuentran la dilución, dispersión, volatilización, adsorción, biodegradación y aquellas reacciones químicas que se producen en el suelo o en el agua y que contribuyen de alguna forma a la disminución de la contaminación.

Las técnicas de recuperación para acuíferos contaminados más empleadas son:

- El bombeo de agua contaminada y posterior tratamiento en superficie.
- Inyección de soluciones acuosas con reactivos e
- Inyección de aire para eliminar sustancias volátiles y el uso de microorganismos para transformar y degradar el contaminante.

Esta técnica se aplica en aquellos casos en los que exista contaminación tanto en suelos como aguas subterráneas producida por hidrocarburos de tipo halogenado o no halogenado.

Entre los factores que influyen en la eficacia y viabilidad de la atenuación natural destacan:

- La exigencia de protección y el riesgo de los potenciales receptores durante el tiempo que dura la atenuación.
- La existencia de unas condiciones geológicas y geoquímicas favorables.
- Las necesidades de reducción de la masa contaminante en un intervalo razonable de tiempo (meses a años), tanto en la superficie del suelo como en la zona más subsuperficial del mismo, así como de la calidad de las aguas subterráneas.
- Confirmación de la existencia de los tipos y número de poblaciones de Microorganismos que puedan biodegradar los contaminantes.
- Producción y conservación en el medio de subproductos de carácter persistente o más tóxico que los iniciales, durante y después de la atenuación natural.
- No existencia de producto libre en flotación sobre el nivel freático
- Para condiciones aerobias la condición ambiental óptima de concentración de oxígeno disuelto en el agua debe ser superior a 0,5 mg/l.
- La concentración de los compuestos utilizados como aceptores de electrones en condiciones anaerobias debe ser superior a 0,21 mg/l para nitratos, la de  $\text{Fe}^{3+}$  para que pueda ser reducido a  $\text{Fe}^{2+}$  debe ser superior a 21,8 mg/l y la de sulfatos mayor de 0,21 mg/l.
- El potencial redox debe estar situado entre un rango de -400 y 800 mV.
- Existencia de un coeficiente de retardo favorable para que se produzcan los fenómenos de sorción con suficiente eficacia.
- Que se produzca una dilución suficiente para que la concentración se vea disminuida aguas abajo del foco contaminante.
- La dispersión de los contaminantes aguas abajo del foco y en la dirección de flujo debe ser adecuada para que exista una mayor disponibilidad proporción entre los contaminantes y los aceptores de electrones.

### **6.11 BIOFILTRACIÓN**

En esta entra el aire contaminado a unos biorreactores en los cuales la flora microbiana degrada los contaminantes volátiles en dióxido de carbono, agua y biomasa.

## **7 PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO PARA EL TRATAMIENTO DE CORTES**

### **7.1 Tratamiento de los Desechos Líquidos y Sólidos**

En este tratamiento, se permite presentar el sistema que se aplicara en el tratamiento de las fases liquidas y solidas contenidas en cada poza a tratar. Diseñando un sistema, que con la ayuda de coagulantes primarios, secundarios y ajustadores de propiedades, con sus dosificaciones indicadas, se obtengan resultados óptimos de calidad, sin originar otro tipo de problema ambiental.

Pues un exceso de material o una mala aplicación del mismo, dará como resultado un fluido con calidades deficientes para su disposición final. Se deben tener en cuenta todos los valores que establece el D.S. N° 037-2008-PCM que Aprueba los Límites Máximos Permisibles de Efluentes Líquidos para el Subsector Hidrocarburo.

#### **7.1.1. Fase Liquida**

La forma de manejo, tratamiento y disposición final de los fluidos residuales de perforación a seguir, se desarrollará de la siguiente forma:

Los fluidos residuales (agua de escorrentía, lavado y todo fluido que salió del sistema activo del lodo de perforación y/o terminación) que resultaron durante la ejecución de los trabajos de la perforación y/o terminación del pozo y que están almacenados en la fosa de sólidos, se les adicionara por medio de la bomba Griffin modelo 4MHL de alta circulación, diseñada para bombear fluidos de alta viscosidad y con alto contenido de sólidos, de acuerdo a los análisis de jarras, practicados por el ingeniero de la empresa de servicios asignado al proyecto, la dosificación correcta de reguladores de pH, floculante, coagulante y ajustadores necesarios, para lograr la clarificación y parámetros requeridos antes de su evacuación.

La fracción líquida obtenida, se bombeara al tanque, para ajustar sus propiedades antes de proceder a su evacuación. El agua tratada que cumpla los parámetros de vertimiento establecidos por el D.S. N° 037-2008-PCM que Aprueba los Límites Máximos Permisibles de Efluentes Líquidos para el Subsector Hidrocarburo. Se bombea a la piscina de agua, para reunir las con las que están almacenadas en esta poza y que son solamente aguas

lluvias, para que después de verificar sus propiedades se proceda a la evacuación de las mismas en el punto autorizado por la empresa operadora y a la rata de bombeo pactada en el plan de manejo ambiental.

El contenido de grasas y aceites, si las tiene la fase líquida, serán retiradas con cintas oleofílicas e hidrofóbicas y serán almacenadas en canecas para su tratamiento final. Si queda alguna película en la fase líquida, se aplicará el producto especializado SUPERALL, para eliminar el hidrocarburo presente.

Para poder garantizar la eficiencia del proceso de FLOCULACION - COAGULACION, es necesario eliminar las grasas y aceites que tenga el fluido.

#### **7.1.1.1 Los pasos fundamentales del proceso**

**Separación de grasas y aceites:** Las etapas de coagulación, floculación y separación, serán eficientes si se retiran adecuadamente todas las grasas o aceites presentes. Cuando se tiene aceite o derivados de este en el fluido, estos impedirán que los flóculos se densifiquen y por consiguiente se sedimenten, impidiendo la precipitación y separación de sólidos. La cantidad que exista en las piscinas, tendrá que ser separada y se recogerá con cintas oleofílicas e hidrofóbicas para garantizar su eliminación, así como la aplicación de SUPERALL para la eliminación del hidrocarburo.

**Coagulación:** Después de tener el fluido libre de aceites, se procederán a mezclar, con la ayuda de la bomba de alta circulación, a una velocidad apropiada los coagulantes primarios y secundarios.

Las dosificaciones a utilizar de estos productos son muy variables y solo dependen de las condiciones fisicoquímicas de los fluidos a tratar. De esta manera, el Ingeniero de aguas, correrá pruebas de Análisis de Jarras, donde se determinarán concentraciones óptimas de coagulantes y floculantes (Catiónicos, Aniónicos y No Iónicos) a adicionar.

**Floculación:** Para aumentar el tamaño de la partícula del flóculo y facilitar la separación se utilizarán floculantes seleccionados del tipo

aniónico, catiónico y no iónico. La floculación se estimula mediante una mezcla, a una determinada velocidad, que reúne los flóculos y requiere de tiempos de retención determinados.

**Separación:** Después de lograr la coagulación y floculación, se espera la densificación de los flóculos con los sólidos del sistema para lograr la separación, por decantación debido a la diferencia de densidades.

**Clarificación:** El efluente líquido que se obtenga se bombeará al tanque para ajustar sus propiedades, mediante la adición de productos químicos ajustadores, antes de ser enviada el agua obtenida a la piscina de aguas.

**Aireación:** Los fluidos clarificados enviados hacia la piscina de agua tratada serán oxigenados con la ayuda de bombas aspersoras, con el fin de mejorar su contenido final de oxígeno.

**Entrega de aguas para vertimiento o irrigación:** Cuando el Ingeniero haga el análisis de la calidad del agua, y esta cumpla con todos los requisitos exigidos por las normas tanto de la Compañía como las gubernamentales, se procederá hacer la instalación de la línea de conducción para realizar el respectivo vertimiento en el punto asignado y a la tasa de flujo preestablecida.

### 7.1.1.2 Productos y Pruebas Fisicoquímicas

Se utilizarán los productos y se realizarán las pruebas fisicoquímicas in-situ, las cuales serán mencionadas más adelante.

#### Productos Químicos

Para cumplir con el tratamiento y dejar un fluido con las propiedades exigidas, se usarán los siguientes materiales:

- Floculante Aniónico
- Floculante Catiónico
- Floculante No Iónico
- Regulador de pH
- Coagulantes
- Otros Seleccionados
- Bactericidas
- Superall

#### Análisis Físico-Químicos:

Los Ingenieros y técnicos, cuentan con un espectrofotómetro, titulador digital y reactor para controlar y realizar diariamente los análisis fisicoquímicos de los fluidos antes y después de los tratamientos.

**TABLA 1. Análisis Fisicoquímicos**

PARAMETRO	DESCRIPCION
<b>1. ANALISIS DE JARRAS</b>	❖ Es el método más usual del que se dispone para controlar los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación. El procedimiento requiere como datos previos mínimos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda.



	❖
<b>2.DETERMINACION de Ph</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ El pH indica el grado de acidez o alcalinidad relativa del fluido. La alcalinidad y acidez son las capacidades neutralizantes de ácidos y bases de un agua. Cada agua tiene un rango de pH en el cual ocurre una buena coagulación en el menor tiempo, o en un tiempo dado con una mínima dosis de coagulante.</li> <li>❖ Para ello se cuenta con dos métodos para efectuar esta determinación: <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Método Colorimétrico.</li> <li>✓ Método Electrométrico.</li> </ul> </li> </ul>
<b>3. TURBIEDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersa en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. Esta determinación se efectúa con un turbidímetro portátil.</li> </ul>
<b>4. COLOR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Las aguas naturales están coloreadas a menudo por sustancias húmicas, partículas de arcilla o combinaciones de hierro. El color puede estar producido por sustancias disueltas, pero también por sustancias finamente dispersas.</li> <li>❖ Esta determinación se efectúa por medio del espectrofotómetro y por kits colorimétricos.</li> </ul>
<b>5.-SÓLIDOS TOTALES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ El contenido total de sólidos se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación.</li> <li>❖ Se utiliza la retorta Ministill y es reportado en porcentaje en volumen.</li> </ul>
<b>6. ALCALINIDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. La alcalinidad ayuda a regular</li> </ul>

	<p>los cambios de pH producidos por la adición de ácidos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ La alcalinidad se determina por medio de: <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El espectrofotómetro.</li> <li>✓ Valoración volumétrica, (titulación)</li> </ul> </li> </ul>
<b>7. CLORUROS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ El ión cloruro es siempre el principal anión en salmueras. La concentración del ión cloruro se usa como una medida de la salinidad del agua. Normalmente se determina por medio del espectrofotómetro o por valoración volumétrica (titulación)</li> </ul>
<b>8.DUREZA TOTAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ La dureza total del agua se debe principalmente a los iones de calcio y magnesio presentes y es independiente de los iones ácidos que los acompañan. La dureza total se mide en términos de partes por millón de carbonato de calcio o partes por millón de calcio.</li> <li>❖ Los métodos empleados para esta determinación son: El espectrofotométrico y valoración volumétrica (titulación)</li> </ul>
<b>9. SULFATOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Este ión se encuentra en el agua debido a la presencia del gas H<sub>2</sub>S, el cual reacciona y forma ácido sulfúrico que al disociarse aporta al agua iones de sulfato.</li> <li>❖ Los métodos empleados son el espectrofotométrico y el colorimétrico. Se reporta en partes por millón de iones SO<sub>4</sub><sup>=</sup></li> </ul>

PARAMETRO	DESCRIPCION
<p><b>10.METALES PESADOS</b></p>	<p>❖ En los desechos sólidos generados por la perforación se pueden encontrar metales pesados aportados por los productos químicos usados en la fabricación del fluido de perforación o por la formación perforada y/o la grasa usada en la tubería. Estos deben ser controlados para que su concentración no supere los valores exigidos en la norma gubernamental, por tal razón es necesario determinar su presencia cualitativa y cuantitativa. Existen varios métodos para efectuar la determinación de estos metales pesados.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existen varios métodos para efectuar la determinación de estos metales pesados. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Método espectrofotométrico.</li> <li>- Método Colorimétrico.</li> </ul> </li> </ul>

Usando la experiencia de trabajos anteriores y conociendo los procesos, productos, así como la capacitación de los Ingenieros y técnicos; se puede entregar unos efluentes con las siguientes propiedades:

**TABLA 2. Propiedades de los Efluentes**

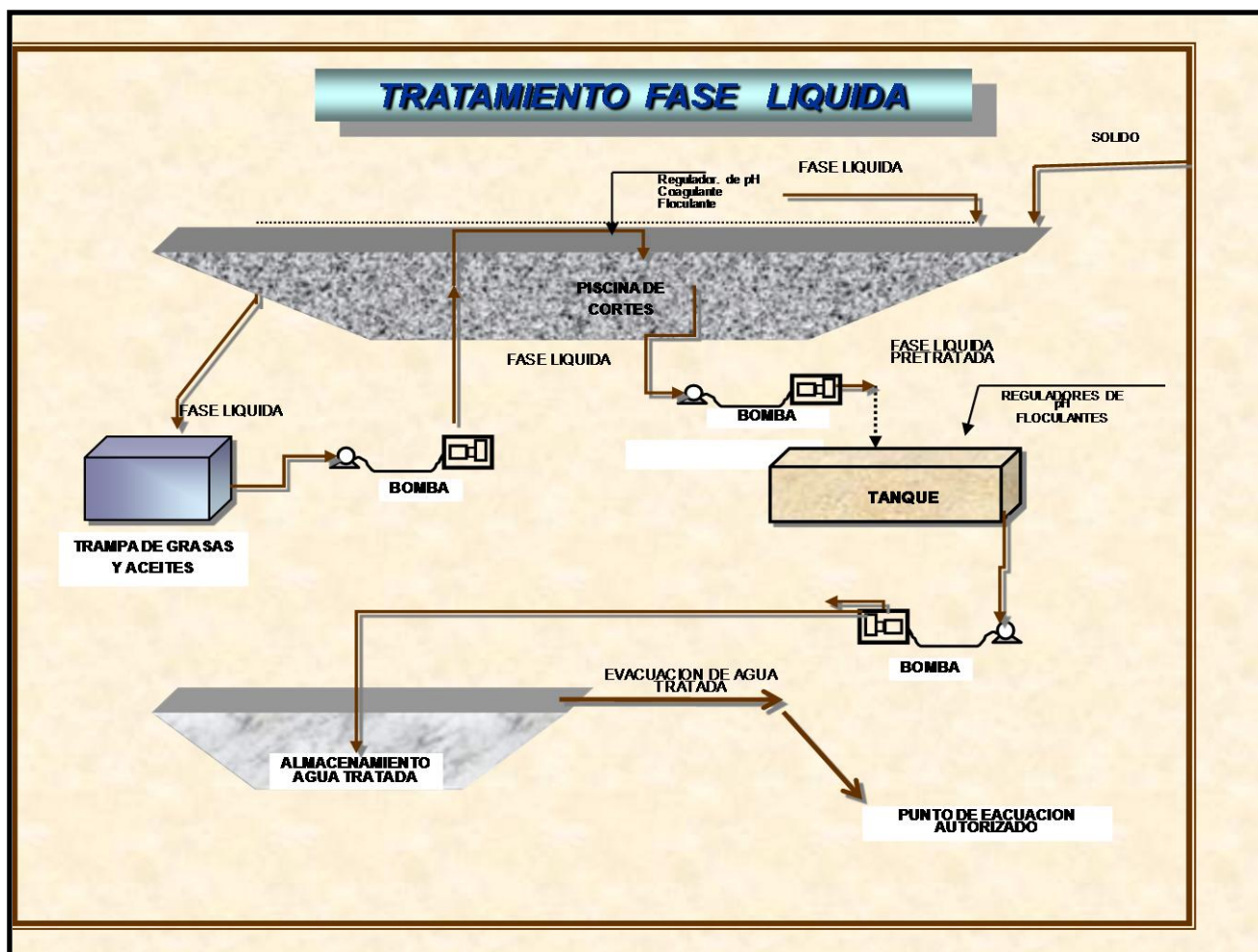
Límites máximo permisibles para efluentes

<b>Parámetro Regulado</b>	<b>Límites Máximo Permisibles (mg/l)</b> <b>(Concentraciones en cualquier momento)</b>
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	20
Cloruro	500 (a ríos, lagos y embalses) - 2 000 (estuario)
Cromo Hexavalente	0,1
Cromo Total	0,5
Mercurio	0,02
Cadmio	0,1
Arsénico	0,2
Demanda Bioquímica de Oxígeno	50
Demanda Química de Oxígeno	250
Cloro residual	0,2
Nitrógeno Amoniacal	40
Coliformes totales (NMP/100 ml)	<1 000
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	<400
Fósforo	2
Bario	5
pH	6,0-9,0
Aceites y grasas	20
Plomo	0,1
Incremento de temperatura	< 3°C

### Retiro de Geomembrana

Terminada la evacuación de la fase líquida, se procederá a retirar la geomembrana de la piscina de líquidos, para ser puesta en la localización donde se estarán depositando transitoriamente los baches de sólidos tratados y que quedan en espera a los resultados de los parámetros medidos, en el laboratorio de SGS, en la ciudad de Lima.

De esta manera quedara desocupada y sin geomembrana, la poza de agua, para ser usada como receptáculo de los sólidos tratados y que den cumplimiento a las normas preestablecidas.



### 7.1.2. Tratamiento de los Desechos Sólidos

En este tratamiento de los sólidos, basado en su larga trayectoria en el manejo y disposición de cortes de perforación se desarrollará la mejor alternativa, considerando tanto la optimización del procedimiento técnico como la factibilidad de la parte económica.

#### **Cortes Lodo Base Agua.**

En este sistema es muy importante tener en cuenta; la mezcla y homogenización de los productos a adicionar, para lograr los parámetros requeridos en los **“Estándares de calidad ambiental para suelos agrícolas”**.

Se tendrá una plataforma inclinada, paralela al perímetro de la piscina de lodos, Los sólidos se mezclaran y sacaran mecánicamente con la unidad de mezcla y carga (retrocargador) entre 40 a 80 mt<sup>3</sup>/ día, sobre ellos se esparce tierra parental y materiales deshidratante y beneficiante de acuerdo a lo requerido y planteado en la propuesta original.

Estos sólidos son transportados mecánicamente (retrocargador), hasta la geomembrana que se retirara de la poza de aguas y que se extiende temporalmente en la localización, donde se depositaran temporalmente los sólidos tratados, en espera de los resultados de los parámetros medidos por el laboratorio.

Después de recibir los resultados, si se necesita ajustar algún parámetro se harán en esta geomembrana, hasta lograr los valores requeridos. Si se encuentran, como suponemos, dentro de los rangos exigidos, entonces se trasladaran a la poza desocupada de agua disponiéndolos en niveles, hasta llegar a su nivelación.

Los sólidos tratados y enviados a la piscina quedarán con una remoción de hidrocarburos dejándolos con una concentración máxima de TPH menor o igual a 1000 p.p.m. y todos los parámetros exigidos en los pliegos licitatorios. Estos valores serán evaluados mediante análisis a realizar con los equipos

de laboratorio que se encuentra en el campo, por el personal asignado a la labor.

Comprobados por los resultados practicados en el laboratorio, dichos valores serán reportados.

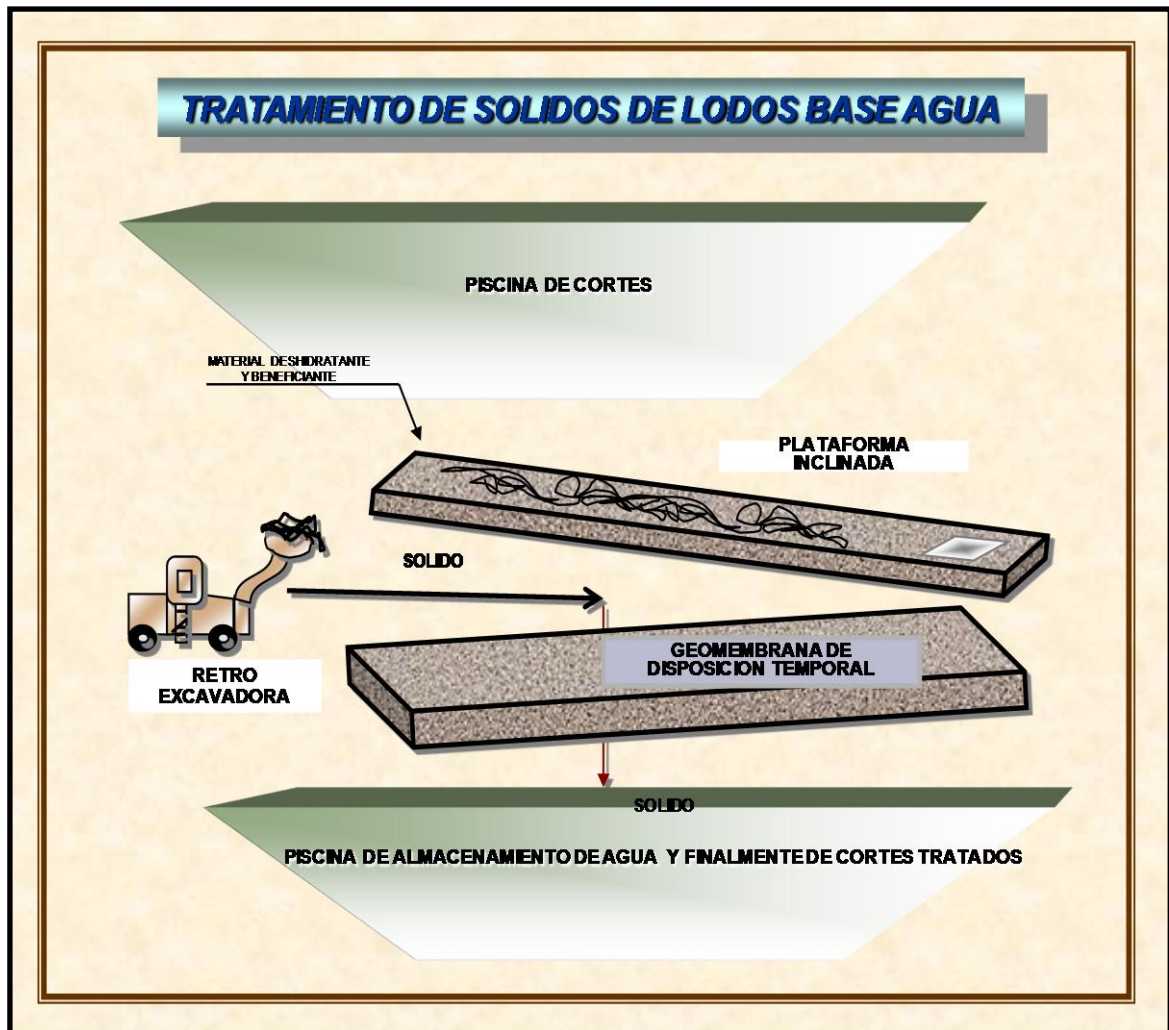


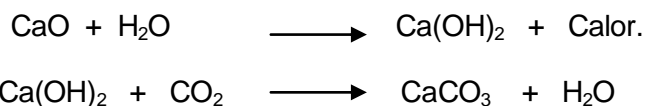
Figura: Tratamiento de sólidos de lodo base agua

## 7.2 Procedimiento Químico de Estabilización y Enriquecimiento de cortes

Una mezcla controlada y eficiente con el Oxido de Calcio se utiliza para:

- ✓ Deshidratación
- ✓ Alcalinización
- ✓ Desinfección
- ✓ Fijación de iones metálicos
- ✓ División de cadenas poliméricas de aditivos del lodo.
- ✓ División de polímeros usados en el tratamiento de aguas.
- ✓ Formación de hidróxidos
- ✓ Eliminación de microorganismos
- ✓ Desorción de gases originados en procesos de descomposición.

• **Dosificación del CaO.** Variable del 0.5% al 3.0% o más dependiendo de la deshidratación requerida, regulada mediante un manejo adecuado de los valores de pH de los sólidos hasta 11 unidades y temperaturas de 35 - 50 °C.



### 7.2.1. Seguimiento y Control de Calidad

Esperamos obtener sólidos estabilizados y con bajos contenidos de humedad del 15 al 20% como máximo, control que se efectuará en campo diariamente mediante análisis de retorta y se anotará en el respectivo reporte de tratamiento de sólidos.

La cantidad de material celulósico se determinará mediante análisis de material orgánico.

Se determinarán mediante pruebas in-situ pH, conductividad eléctrica, aceites y grasa. Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Níquel, Plomo, Selenio, Zinc, Plata, Mercurio, TPH, entre otros.

Los productos agregados para la estabilización química y solidificación son:



- Cal Viva, Oxido de Calcio Activo.
- Material Orgánico
- Tierra parental
- Superall

### 7.2.2. Estándares de calidad ambiental para suelos

	USOS	SUELO AGRÍCOLA	MÉTODO DE ENSAYO
N°	Parámetros		
<b>I</b>	<b>BTEX</b>		
1	Benceno (mg/kg MS)	0,03	EPA 8 260-B
2	Tolueno (mg/kg MS)	0,37	EPA 8 260-B
3	Etilbenceno (mg/kg MS)	0,082	EPA 8 260-B
4	Xileno (mg/kg MS)	11	EPA 8 260-B
<b>II</b>	<b>Compuestos orgánicos volátiles – COV</b>		
5	Naftaleno (mg/kg MS)	0,1	EPA 8 260-B
<b>III</b>	<b>Hidrocarburos</b>		
6	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	1 000	EPA 8 015-8 015-DE
<b>IV</b>	<b>Hidrocarburos aromáticos policíclicos PAH</b>		
7	Benzo(a)pireno (mg/Kg MS)	0,1	EPA 8 270-D
<b>V</b>	<b>Metales/metaloideos</b>		
8	Arsénico total (mg/kg MS)	50	EPA 200,7
9	Bario total (mg/kg MS)	750	EPA 6 010-B

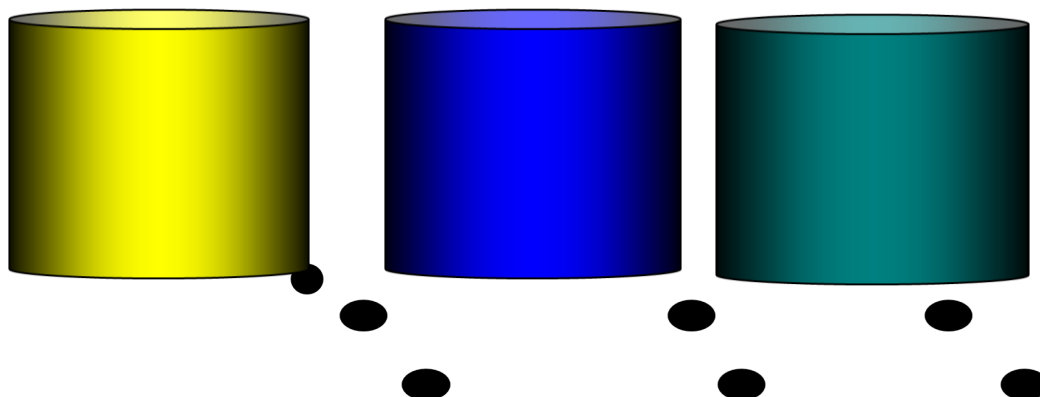
10	Cianuro libre (mg/kg MS)	0,9	EPA 9 013A
11	Cadmio total (mg/kg MS)	1,4	EPA 6 010-B
12	Cromo VI (mg/kg MS)	0,4	DIN 19 734
13	Mercurio total (mg/kg MS)	6,6	EPA-7 471-A
14	Plomo total (mg/kg MS)	70	EPA 6 010
<b>VI</b>	<b>Bifenilos policlorados-PCB</b>		
15	PCB (mg/kg MS)	0,5	EPA 8 270-D

1/ Se pueden emplear también métodos equivalentes

Nota 1: MS= Materia Seca.

R.P. Consejo Directivo N° 199-2007-CONAM/PCD

## 8 COSTOS



**Remediación de Suelos contaminado con petróleo es aproximadamente:**  
US\$ 10 0000 – 125 0000

**Remediar el Agua Subterránea es aproximadamente:**  
US\$ 10 0000 – 1' 000 000

## 9 CONCLUSIONES

- Las medidas biocorrectivas o los sistemas de biorremediación son técnicas de descontaminación suficientemente estudiadas y evaluadas, basados en los procesos de biodegradación y fácilmente aplicables.
- Es necesario una investigación y caracterización de la contaminación y del emplazamiento de forma rigurosa para evaluar y elegir la medida biocorrectiva más adecuada y diseñar el sistema de manera óptima, así como es necesario llevar a cabo un control y seguimiento del mismo.
- Las técnicas tradicionales de tratamiento son de fácil aplicación y sus costos de operación son relativamente bajos, exceptuando las técnicas de Incineración y Solidificación.
- La mayoría de las técnicas innovadoras que existen en la actualidad para el tratamiento de los suelos contaminados requieren equipos especiales y consumos elevados de recursos energéticos y de otro tipo para su aplicación.
- En Perú estas técnicas encuentran serios problemas de aplicación debido a las limitaciones técnico - económicas.
- La Biorremediación es el tratamiento más apropiado a seguir en suelos contaminados con hidrocarburos en nuestro país por sus ventajas conocidas.
- La tecnología de biopila utilizada para el tratamiento de suelo es muy versátil ya que responde a diferentes características del suelo y agentes contaminantes
- La metodología de tratamiento utilizado (biopila) permite obtener suelos con Total Concentración de Hidrocarburos menos de 5000 ppm en un plazo razonable de tiempo a costos competitivos.

## 10 BIBLIOGRAFIA

- Restrepo R. : Derrame de hidrocarburos. Impacto en los ecosistemas tropicales. ECOPETROL 2002.
- Randy H. Schroeder A, Domínguez V, García L. Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo.
- Siva S, Brett R, Tessa M, Vogeler I, Clothier B, Grant L. Northcott and Don McNaughton : Bioremediation of soils contaminated with organic compounds. 2004.
- Schmidt W. : Suelos contaminados con hidrocarburos: la biorremediación como una solución ecológicamente compatible
- Plaza G, Otero M, Torres N, Velásquez M, Corbalan E, Rodríguez T. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.2001.
- DANIEL, D. Geotechnical Practice for waste disposal. Ed. Chapman & Hall. (1993)
- LAGREGA, M. et al. Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos.
- LEVIN, L.; GEALT M. Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos. Selección, estimación,
- NATONAL RESEARCH COUNCIL. In situ Bioremediation.
- RISER-ROBERS, E. Remediation of petroleum Contaminated Soils. Biological Physical, and Chemical Processes. Ed. LLC. (1996).
- USEPA. Soil Vapor extraction (SVE) enhancement technology resource guide: air sparging, bioventing,
- USEPA. Bioremediation of hazardous waste sites: practical approaches to implementation. EPA 625-K-96-001. (1996).
- USEPA. Aerobic biodegradation of BTEX in Acuifers Material; Enviromental Research Brief. EPA 600-
- Restrepo R. Derrame de hidrocarburos. Impacto en los ecosistemas tropicales. ECOPETROL Instituto Colombiano de Petróleo. 2002.

- Siva S, Brett R, Tessa M, Vogeler I, Clothier B, Grant L. Northcott and Don McNaughton. Bioremediation of soils contaminated with organic compounds. 2004.
- Schmidt W. Suelos contaminados con hidrocarburos: la biorremediación como una solución ecológicamente compatible
- Plaza G, Otero M, Torres N, Velásquez M, Corbalan E, Rodríguez T. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.2001;5: 163-167.
- CONCAWE 1985. Sludge farming : a technique for the disposal of oily refinery wastes. Report N° 3.
- Anderson, T. ; Guthrie, E. and B. Walton. 2000. Biorremediación. Environ.
- Alexander, M. 1999. Soil Microbiology. Ed. J. Wiley.
- Calabresse, E. and P. Kostecy. 1993. Principles and practices for petroleum contaminated soils. Lewis Publishers USA.

## 11 ANEXOS

NIVELES GUIA DE CALIDAD DE SUELOS-LEY 24051			
METALES			
mg/kg			
CONTAMINANTE	USO AGRICOLA	USO RESIDENCIAL	USO INDUSTRIAL
Pb	375	500	1000
Cd	3	5	20
V	200	200	nd
Cu	150	100	500
Mn	nd	nd	Nf
Cr total	750	250	800
Hg	0.8	2	20
Zn	600	500	1500
Sn	5	50	300

**Nivel de referencia:** concentración de un componente por debajo del cual la posibilidad de efectos adversos es despreciable

**Nivel de riesgo máximo aceptable:** concentración de un componente por encima del cual el riesgo de efectos adversos es inaceptable

**Nivel de intervención:** nivel de concentración por sobre el cual el suelo debe ser descontaminado

**Ejemplo: "mineral oil"**

**Nivel de referencia: 50 ppm**

**Nivel de riesgo máximo aceptable: 2525 ppm**

**Nivel de intervención: 5000 ppm**

## Circular on target and intervention values

### *Circular on target values and intervention values for soil remediation*

Anexo A contiene:  
valores "target"  
valores de intervención  
valores indicativos para contaminaciones serias

**Anexo A**

Anexo B contiene:  
Regulaciones para análisis y mediciones para suelo/sedimentos  
y aguas subterráneas para las sustancias del anexo A

**Anexo B**

Anexo C da los datos necesarios para determinar urgencia y  
"deadline" de remediación para las sustancias de la parte A

**Anexo C**

Anexo D provee una guía para sustancias de las cuales no hay  
standards

**Anexo D**

**ANEXO A** Netherlands regulations for contaminated soil

**Annex A of the Circular on target values for soil remediation**

El punto de partida en fijar estándares como política ambiental es el riesgo involucrado

Ej.:Cd  
Valor de Intervención  
12 ppm

**Tabla 1** Valores de intervención y valores "target"

**Tabla 2** Valores indicativos para seria contaminación del suelo y valores "target"

**Annex A of the Circular on target values for soil remediation**

**Valores de Intervención en remediación de suelos**  
Indican cuándo las propiedades funcionales del suelo para la vida humana, animal o vegetal han sido seriamente dañadas o amenazadas

**Niveles indicativos para contaminación seria**  
Indican el nivel de sustancias que no poseen valor de intervención  
*El Nivel Indicativo es mucho más incierto que el Valor de Intervención*

**Valores "target"**  
Indican el valor al cual existe una calidad de vida sostenible

Netherlands regulations for contaminated soil

**Valores de Intervención**

**Los valores de intervención en remediación de suelos está basados en estudios extensivos de ambos, efectos sobre humanos y ecotoxicológicos de los contaminantes del suelo**

**Los efectos toxicológicos sobre humanos** son cuantificados en forma de concentración en el suelo sobre el cual el llamado riesgo máximo permisible (maximum permissible risk, MPR) para humanos puede ser excedido

**Los efectos ecotoxicológicos** son cuantificados en la forma de concentración en el suelo sobre la cual el 50 % de las especies potencialmente presentes y procesos pueden experimentar efecto negativo



## Valores "target"

Los valores "target" indican el nivel que se debe alcanzar para una recuperación total de las propiedades funcionales del suelo para la vida humana, vegetal y animal.

**El principio es que el suelo en áreas relativamente no contaminadas debe cumplir con los valores "target"**

Tabla 1

Target values and soil remediation intervention values and background concentrations soil/sediment for **metals** (mg/kg dry matter)

	National background concentration	Target value	Intervention value
antimony	3	3	15
arsenic	29	29	55
cadmiun	0.8	0.8	12
mercury	0.3	0.3	10

## Analisis y Mediciones

Standards for earth. The standards apply to terrestrial and aquatic soils unless stated otherwise

Substance	Analysis standard	Analysys technique	sampling	Sample preservation	Sample treatment
Antimony (metal)	NEN 6426	AES-ICP	NEN 5742	NEN 6426	NEN 5751
Fluoride (inorganic comp.)	NEN 6483	POT	NEN 7542	VPRC85-06	VPRC85-06
Benzene (aromatic comp.)	Draft NVN 5732	PET TD-GC	NEN 7543	Draft NVN 5732	NVN 5730
PAHs (sum 10) (polyc. Arom.comp.)	2 <sup>nd</sup> draft NEN 5731	HPLC	NEN 5742	NEN 5742	NVN 5730
Pentachlorophe nol (chlor.hydroc.l)	VPR C85-14	GC	VPRC85-14	VPRC85-14	NVN5730

Annex C.  
Data for determining remediation urgency and remediation deadline

**Maximun permissible risk level for humans (MPR)**

**Ecotoxicological HC-50 values (hazardous concentration 50% that is to say concentration at which 50% of the species and process in an ecosystem are completely protected) in mg/kg soil/sediment (dry weight)**

**Log  $k_d$  values for metals, log Koc values for organic compounds (equilibrium partitioning coefficients) which are required to determine the dispersal risk in l/Kg**

**Human MPR-values, HC50-values (standard soil) and Kd/log Koc values for substances which intervention values have been set**

	Human MPR ( $\mu\text{g}/\text{kgbw}/\text{d}$ )	HC50 (mg/kg)	Kd/logKoc (l/kg)
Antimony	0.9	2900	80
Cyanide-free	50	-	0.1
Benzene	4.3	25	1.9
PAH (sum 10)	-	40	-