

**GUÍA DE MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE
SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS**

ROLAND MAURICIO SUAREZ BELTRAN

**UNIVERSIDAD LIBRE
INSTITUTO DE POSTGRADOS INGENIERIA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2013**

**GUÍA DE MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE
SUELOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS**

Autor:

ROLAND MAURICIO SUAREZ BELTRAN

Código: 80093250

Director:

Dr. JULIO CESAR RAMIREZ

**UNIVERSIDAD LIBRE
INSTITUTO DE POSTGRADOS INGENIERIA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2013**

CONTENIDO

	pág.
0 INTRODUCCIÓN _____	3
1 ANTECEDENTES. _____	7
2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA _____	9
3 JUSTIFICACIÓN. _____	12
4 OBJETIVOS _____	14
4.1 OBJETIVO GENERAL _____	14
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS _____	14
5 MARCOS REFERENCIALES _____	15
5.1 MARCO TEORICO _____	15
5.1.1 ETAPAS DE UNA BIORREMEDIACIÓN EFICAZ _____	20
5.1.2 LA BIORREMEDIACIÓN _____	22
5.1.2.1 MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN _____	22
5.1.2.1.1 BIORREMEDIACIÓN “IN SITU” _____	23
5.1.2.1.2 BIORREMEDIACIÓN “EX SITU” _____	28
5.1.2.2 LA BIORREMEDIACIÓN EN COLOMBIA _____	33
5.1.2.3 PRINCIPALES OLEODUCTOS DEL PAÍS _____	39
5.2 MARCO LEGAL _____	40
6 METODOLOGÍA _____	45
7 RESULTADOS _____	46
7.1 DISEÑO DE SISTEMA DE SELECCIÓN DE METODO DE BIORREMEDIACIÓN A UTILIZAR	50
7.2 DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE SISTEMA DE SELECCIÓN DE METODO DE BIORREMEDIACIÓN _____	51
7.3 APLICACIÓN DEL SISTEMA DE SELECCIÓN DE METODO DE BIORREMEDIACIÓN. _____	52
8 CONCLUSIONES _____	53
9 RECOMENDACIONES _____	54
BIBLIOGRAFÍA _____	55

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Listado de técnicas tradicionales e innovadoras _____	10
Cuadro 2. Esquema de las reacciones _____	16
Cuadro 3. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo México _	42
Cuadro 4. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo Canadá _	43
Cuadro 5. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo Ecuador _	44
Cuadro 6. Ventajas y Desventajas de los Métodos _____	47
Cuadro 7. Características determinantes para Métodos _____	48
Cuadro 8. Método a usar según el Tipo de suelo _____	49
Cuadro 9. Valoración _____	50
Cuadro 10. Ejemplo de valoración _____	52

0 INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental de los derrames de crudo en Colombia ha dejado miles de hectáreas afectadas, sin dejar a un lado los kilómetros de ríos y quebradas. Estos daños a las fuentes hídricas, suelos, aire, fauna y vegetación, causados por actos terroristas a la infraestructura petrolera o como resultado de la actividad de la extracción del petróleo, son prácticamente irremediables, ya que los procesos de descontaminación no alcanzan a cubrir todas las áreas afectadas y se realizan mucho tiempo después de que el crudo ha penetrado al ecosistema.

El petróleo es el producto de la degradación anaeróbica de materia orgánica, durante largos períodos de tiempo y bajo condiciones de alta presión y temperatura, que la convierte en gas natural, crudo y derivados del petróleo. El petróleo crudo es una mezcla extremadamente compleja y variable de compuestos orgánicos, donde la mayoría de ellos son hidrocarburos, que varían en peso molecular desde el gas metano hasta los altos pesos moleculares de alquitranes y bitúmenes. Estos hidrocarburos pueden presentarse en un amplio rango de estructuras moleculares, cadenas lineales y ramificadas, anillos sencillos, condensados o aromáticos. Los dos grupos principales de hidrocarburos aromáticos son los monocíclicos, el benceno, tolueno y xileno (BTEX) y los hidrocarburos policíclicos (HAPs) tales como el naftaleno, antraceno y fenantreno.

Desde el inicio de la actividad petrolera, el entorno en el que se desarrolla, se ve afectado por numerosas intervenciones que dañan severamente el medio ambiente. Las huellas más evidentes que se encuentran en todo el planeta donde se ha dado extracción de petróleo, frecuentemente han sido ocasionadas por accidentes en tanques de almacenamiento o en oleoductos. Sin embargo los accidentes que son los acontecimientos más notorios, no son las únicas fuentes de contaminación o degradación del medio, ni siquiera las más importantes. Todas las actividades que están envueltas en la exploración y explotación del petróleo provocan impactos potencialmente negativos sobre el medio ambiente y sobre las personas que lo usan o que están en contacto con él. Gran parte de los

ecosistemas afectados por la exploración y explotación de hidrocarburos cuentan con formas de vida muy diversas y complejas. A pesar de este hecho, la expansión petrolera muy a menudo se enfoca en dichos ecosistemas.(explotacionpetrolera.wikispaces.com)

Existen numerosas tecnologías de remediación de suelos contaminados se pueden agrupar en 3 tipos: a) biológicos (Biorremediación, Bioestimulación, Fitorremediación, biolabranza, etc.), en donde las actividades metabólicas de ciertos organismos permiten la degradación, transformación o remoción de los contaminantes a productos metabólicos inocuos; b) fisicoquímicos (electrorremediación, lavado, solidificación/estabilización, etc.), aquí se toma ventaja de las propiedades físicas y químicas de los contaminantes para destruir, separar o contener la contaminación; y c) térmicos (incineración, vitrificación, desorción térmica, etc.), en los cuales se utiliza calor para promover la volatilización, quemar, descomponer o inmovilizar los contaminantes en un suelo.

La degradación microbiana constituye el principal proceso de descontaminación natural (Prince, 1993). Este proceso se puede acelerar y/o mejorar mediante la aplicación de tecnologías de Biorremediación (Alexander, 1999). La Biorremediación surge de la necesidad de disminuir el impacto ambiental que esto conlleva, con el fin de retirar los contaminantes en los diferentes ambientes (mares, lagos, ríos, estuarios y suelos) usando microorganismos, plantas o enzimas de estos, de manera estratégica. Gracias a la biotecnología se han desarrollado diversas estrategias con el fin de restaurar el suelo y la calidad ambiental, de acuerdo con las necesidades y dimensiones del problema.

La Biorremediación puede emplear organismos autóctonos del sitio contaminado o de otros sitios (exógenos), puede realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de Biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes, explosivos, clorofenoles,

pesticidas, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos, en procesos aeróbicos y anaeróbicos.

La Biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (fundamentalmente bacterias, pero también hongos y levaduras) para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes, y, por tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas (Glazer y Nikaido, 1995).

Su ámbito de aplicabilidad es muy amplio, pudiendo considerarse como objeto cada uno de los estados de la materia (Atlas y Unterman, 1999)

- Sólido. Con aplicaciones sobre medios contaminados como suelos o sedimentos, o bien directamente en lodos, residuos, etc.
- Líquido. Aguas superficiales y subterráneas, aguas residuales.
- Gases. Emisiones industriales, así como productos derivados del tratamiento de aguas o suelos.

También se puede realizar una clasificación en función de los contaminantes con los que se puede trabajar (Alexander, 1999; Eweis et al., 1999)

- Hidrocarburos de todo tipo (alifáticos, aromáticos, BTEX, HAPs,...).
- Hidrocarburos clorados (PCBs, TCE, PCE, pesticidas, herbicidas,...).
- Compuestos nitro aromáticos (TNT y otros).
- Metales pesados. Estos no se metabolizan por los microorganismos de manera apreciable, pero pueden ser inmovilizados o precipitados.
- Otros contaminantes compuestos organofosforados, cianuros, fenoles, etc.

Los microorganismos transforman y metabolizan aeróbicamente los hidrocarburos y otros compuestos orgánicos hasta dióxido de carbono, agua y fuentes de alimento para sustentar su crecimiento y reproducción, es decir, la biodegradación ocurre naturalmente. Es conocido que los microorganismos indígenas tienen la

capacidad de adaptarse y eventualmente degradar cualquier compuesto orgánico natural sin asistencia del hombre; sin embargo, esta adaptación requiere la presencia de condiciones ambientales apropiadas tales como el pH, temperatura, el aceptor final de electrones (que en procesos aeróbicos es el oxígeno), concentraciones de contaminante no tóxicas para los microorganismos y adecuadas condiciones de humedad y conductividad del medio, entre las más importantes. La ausencia de alguna o varias de las anteriores condiciones puede limitar parcial o totalmente la actividad biológica y es cuando la mano del hombre juega un papel fundamental en la optimización del proceso, ya sea mejorando estas condiciones para aumentar la población de microorganismos (Bioaumentación) y/o manipulando genéticamente los microorganismos para la degradación específica de algunos compuestos químicos.

1 ANTECEDENTES.

Debido a que la sociedad moderna utiliza productos de petróleo, la contaminación en el medio esta potencialmente distribuida por todo el ambiente.

La actividad petrolera en sus diferentes etapas ocasiona contaminación y cambios en el uso del suelo, remoción de materiales para la construcción de vías e instalaciones y pozos, contaminación de aguas superficiales y subterráneos, modificaciones bióticas sobre hábitats naturales, modificación de patrones socio-culturales. En general los efectos ambientales que la actividad petrolera en Colombia ha causado sobre los ecosistemas y el hombre se refieren a:

1. Remoción de cobertura vegetal y construcción de trochas de penetración a zonas, entre las que se pueden contar varios Parques Nacionales Naturales y zonas de Reserva Forestal.
2. Alteración de los patrones naturales de drenaje que en los casos más severos ha conducido al secamiento de grandes áreas de humedales.
3. Inducción de procesos de desestabilización de subcuencas y de procesos de erosión en áreas de fallas geológicas
4. Contaminación de aguas superficiales y acuíferos por inexistencia o deficiencia en el tratamiento de las aguas asociadas a la explotación y refinación del petróleo, presentando una importante migración a los acuíferos.
5. Salinización de suelos por aguas asociadas al petróleo en lugares abiertos o bajos pantanosos que varían entre 15 y 48 partes por mil, que es hasta un tercio más salina que el agua de mar.

El interés por el destino de los residuos del petróleo es relativamente reciente. Las necesidades de una sociedad cada vez más consumista, han llevado a un crecimiento de la industria petroquímica con un fuerte impacto sobre la calidad del ambiente

La contaminación por petróleo suelen tener gran repercusión sociológica cuando es de carácter masivo. Sin embargo, la proximidad cotidiana a la contaminación

por petróleo no tiene su origen en estos episodios escandalosos. Nuestro uso energético cotidiano, las redes de almacenaje y distribución de los productos energéticos, probablemente nos sitúan ante riesgos ambientales, no por desconocidos menos significativos. Tan es así que, son más frecuentes las actividades para descontaminar ambientes desconocidos por la opinión pública, que aquellos contaminados en episodios de mayor significación mediática

Las causas más frecuentes de contaminación en la industria petrolera por transporte por medio de tubería u oleoducto, son: Falla operacional, Fatiga de Materiales, Hurto, Acto terrorista. (Ministerio,1999)

Se tiene un número considerable de sitios contaminados con hidrocarburos como resultado de fugas o descargas accidentales de petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel, así como la disposición de paños contaminados, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, que se han producido dentro y fuera de las instalaciones productoras y almacenándolas. En muchos casos estos derrames han dañado el subsuelo y el agua subterránea y su saneamiento es complejo debido a que los contaminantes se presentan en forma de mezclas.

2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta que el problema de los derrames ocasionados en suelos cercanos a plantas o torres de extracción de petróleo, ya sea por falta de control o ataques de grupos armados, produciendo no solo daños a las instalaciones si no que generan daños al suelo y al ecosistema, por el derrame de hidrocarburos los cuales pueden penetrar el suelo y llegar a fuentes de agua potable, impidiendo el flujo de oxígeno y destruyendo la flora y fauna de la región, se busca encontrar un método que ayude a la recuperación de los suelos mediante el uso de agentes naturales y así reducir el uso de químicos.

El impacto ambiental de los derrames de crudo en Colombia ha dejado miles de hectáreas afectadas, sin dejar a un lado los kilómetros de ríos y quebradas. Estos daños a las fuentes hídricas, suelos, aire, fauna y vegetación, causados por actos terroristas a la infraestructura petrolera o como resultado de la actividad de la extracción del petróleo, son prácticamente irremediables, ya que los procesos de descontaminación no alcanzan a cubrir todas las áreas afectadas y se realizan mucho tiempo después de que el crudo ha penetrado al ecosistema.

Los derrames de petróleo y sus derivados en el ámbito mundial, han provocado una severa contaminación del suelo y de los cuerpos de agua. Estos compuestos son tóxicos para los seres vivos ya que son mutagénicos y carcinogénicos

La contaminación por petróleo se caracteriza por su persistencia en el ecosistema, a pesar de los procesos de degradación natural y/o antrópica a que puedan ser sometidos.

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 más o menos lentos, lo que ocasiona una mayor toxicidad. Además de tener una moderada, alta o extrema salinidad, 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. (VIÑAS, 2005)

Las técnicas de tratamiento de residuos sólidos consisten en la aplicación de procesos químicos, biológicos o físicos a desechos peligrosos o materiales contaminados a fin de cambiar su estado en forma permanente. Estas técnicas destruyen contaminantes o los modifican a fin de que dejen de ser peligrosos, además pueden reducir la cantidad del material contaminado presente en un lugar, retirar el componente de los desechos que los hace peligrosos o inmovilizar el contaminante en los desechos.

Las tecnologías se clasifican en dos grandes grupos que se pueden apreciar en el siguiente Cuadro.

Cuadro 1. Listado de técnicas tradicionales e innovadoras

Técnicas tradicionales o establecidas	Técnicas innovadoras
Incineración	Extracción de vapores del suelo
Mezclar, enterrar y cubrir	Aspersión de aire
Dispersión sobre el terreno	Desorción térmica
Solidificación	Deshalogenación química
Re-uso y Reciclado	Enjuague del suelo in situ
	Extracción con solvente
	Lavado del suelo
	Medidas Fitocorrectivas
	Biorremediación

Entre las técnicas con menos impacto ambiental cabe destacar aquellas que no requieren excavación y transporte del suelo, es decir, que el tratamiento se realiza in situ, dentro del mismo emplazamiento. La tecnología a utilizar depende entre otros muchos factores, del tipo de contaminante, tipo de terreno, afectación de las aguas subterráneas, del tiempo necesario para descontaminar, del costo de la actuación, etc.

En el caso de no ser viable el tratamiento *in situ*, existen alternativas al vertedero para el tratamiento fuera del emplazamiento o *ex situ*, mediante plantas centralizadas de tratamiento de suelos. Por ejemplo, en Europa existen numerosas experiencias de plantas a pleno rendimiento que combinan diversos tipos de tratamiento, siendo generalmente el núcleo central el tratamiento mediante landfarming o Biopilas, que utilizan los agentes biológicos propios del suelo para la descontaminación, acelerando el proceso mediante control del aporte de nutrientes, humedad y aireación.

3 JUSTIFICACIÓN.

Las necesidades de una sociedad cada vez más consumista, han llevado a un crecimiento de la industria petroquímica con un fuerte impacto sobre la calidad del ambiente, por los procesos de producción que generan una gran cantidad de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) que pueden ser desechos del proceso o productos de uso.

La contaminación por petróleo suelen tener gran repercusión sociológica cuando es de carácter masivo como los derrames en el mar que son representativos para todo el planeta, pero también se ven afectados lugares apartados que llegan a afectar a una población menor no solo en lugares de torres de refinación si no que también se presentan derrames durante el proceso de transporte.

Siendo más frecuentes las actividades para descontaminar ambientes desconocidos por la opinión pública, que aquellos contaminados en episodios de mayor significación

Nuestro uso energético cotidiano, las redes de almacenaje y distribución de los productos energéticos, probablemente nos sitúan ante riesgos ambientales pues generan contaminación tan aérea como de suelo reduciendo la población de microorganismos y plantas en estos lugares. (DIAZ,1999)

La degradación microbiana del petróleo en los trópicos ocurre más rápido que en ambientes árticos y atemperados, aunque se conoce poco de la descomposición en zona anaeróbica o cuando hay limitación severa de nutrientes.

La Biorremediación es una técnica innovadora que se ha desarrollado en la década de los 80 y 90, la cual ha sido aplicada exitosamente en el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos. Se caracterizan por ser una técnica de bajos costos de operación. La aplicación de este tipo de técnica ha encontrado cierta resistencia de aplicación por el tiempo que demanda completa un proceso hasta obtener las metas de limpieza deseadas.

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. (RODRIGUEZ, 2005)

Las técnicas de Biorremediación in situ 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. La Biorremediación in situ 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 afectados 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. Los métodos, mas empleados en Biorremediación son: Fitorremediación, Biofiltración, Bioventing, Biosparging, Biopilas, Bioestimulación, Bioaumentación.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un sistema de selección de método de Biorremediación basado en la revisión bibliográfica de los métodos más conocidos de dicha técnica para la recuperación de suelos por derrame de crudo.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar los métodos de Biorremediación aplicados en recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos.
- Comparar y conocer las posibilidades, requerimientos y dificultades de la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos en los diferentes métodos de Biorremediación.
- Realizar una comparación de las normativas nacionales e internacionales sobre el manejo de hidrocarburos en suelos.
- Diseñar un sistema de valoración de los métodos de Biorremediación para identificar el más apropiado a cada tipo de contaminante y suelo.

5 MARCOS REFERENCIALES

5.1 MARCO TEORICO

Antecedentes de la Biorremediación

A mediados del siglo XX se desarrollaron las primeras investigaciones encaminadas a estudiar el potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes, este "uso" intencionado recibió entonces el nombre de Biorremediación. Las primeras técnicas que se aplicaron fueron similares al "Landfarming" y sus actores, lógicamente, compañías petrolíferas. Las primeras patentes, fundamentalmente para remediación de vertidos de gasolina, aparecen en los años 70. En los años 80 se generalizó el uso del aire y peróxidos para suministrar oxígeno a las zonas contaminadas mejorando la eficiencia de los procesos degradativos. Durante los años 90 el desarrollo de las técnicas hizo posible la Biorremediación en zonas por debajo del nivel freático. Al mismo tiempo, la implementación en la práctica de aproximaciones experimentales en el laboratorio permitió el tratamiento de hidrocarburos clorados, los primeros intentos con metales pesados, el trabajo en ambientes anaerobios, etc.

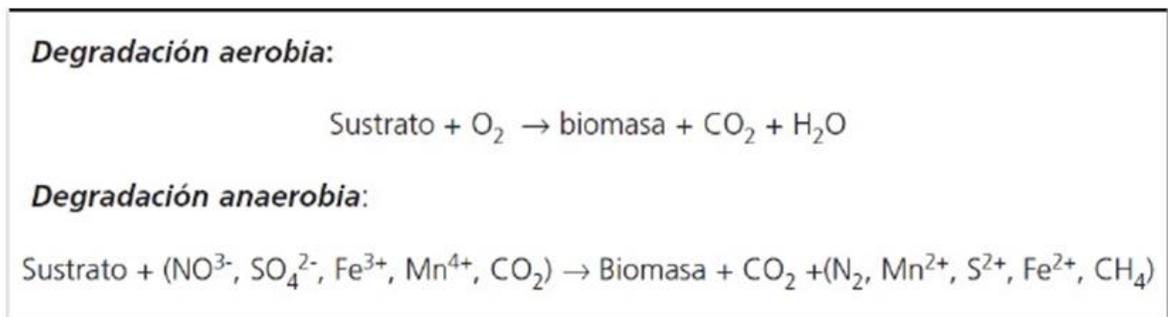
En la actualidad, la Biorremediación enfrenta un nuevo reto, el de convencer a las compañías y a los organismos oficiales de su alto potencial. En algunos países, la Biorremediación fue una técnica poco reconocida y marginada, hoy en día se ha convertido en una verdadera industria.

La bioquímica y la Biorremediación

El fundamento bioquímico de la Biorremediación se basa, principalmente, en la serie de reacciones de óxido-reducción (cuyo fin es la obtención de energía) que se producen en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células. La cadena la inicia un sustrato orgánico (compuestos hidrocarburoados) 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.

Cuadro 2. Esquema de las reacciones



Factores que afectan la Biorremediación

La biodegradabilidad de una mezcla de hidrocarburos presente en un suelo contaminado depende de diversos factores, los cuales como pueden clasificarse en cuatro grupos: Medio ambientales. Físicos. Químicos. Microbiológicos.

Factores medio ambientales

Los factores medio ambientales son aquellos necesarios a la hora de proporcionar las condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos que llevan a cabo la recuperación. Los microorganismos son muy sensibles a los cambios de temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes, oxígeno y humedad. (Colin,2001)

El pH.

Afecta significativamente la actividad microbiana. En consecuencia, cuanto mayor sea la diversidad de microorganismos existentes, potencialmente mayor será el rango de tolerancia. No existen unas condiciones preestablecidas que sean óptimas en todos los casos, pero en términos generales el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos es máximo dentro de un intervalo de pH situado entre (6 – 8) para las bacterias heterótrofas, mientras que es más ácido para los hongos (pH 4 - 5).

Temperatura

Es uno de los factores ambientales más importantes que afecta la actividad metabólica de los microorganismos y la tasa de biodegradación. Generalmente, las especies bacterianas crecen a intervalos de temperatura bastante reducidos, entre 20 y 30 °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, la humedad del suelo puede limitar de forma severa la biodegradación, fundamentalmente en suelos superficiales afectados por oscilaciones importantes en el contenido de agua.

El oxígeno

El oxígeno es el aceptor final de electrones generalmente empleado en procesos biológicos y también es necesario en determinados tipos de reacciones de oxidoreducción catalizada por enzimas. Los microorganismos, oxidan compuestos

orgánicos o inorgánicos, obteniendo así la energía necesaria para su crecimiento. El proceso de oxidación da lugar a electrones que intervienen una cadena de reacciones en el interior de la célula y, al final, deben ser vertidos en el entorno.

Necesidad de nutrientes inorgánicos.

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 tanto, las concentraciones asimilables de dichos elementos presentes en el suelo, suelen ser limitantes para un incremento y activación de la población microbiana. La adición de fuentes de N y P inorgánicas, generalmente tiene un efecto positivo incrementando las poblaciones microbianas y las tasas de biodegradación de hidrocarburos en suelos contaminados. Las proporciones molares normales de C:N:P, depende del sistema de tratamiento a emplear, siendo de modo habitual 100:10:1.

Factores físicos

Los factores físicos de mayor importancia en la Biorremediación son la biodisponibilidad, la presencia de agua y la provisión de un aceptor de electrones.

Biodisponibilidad

La tasa de degradación depende tanto de la capacidad de transporte y del metabolismo microbiano, como de la transferencia de masas del compuesto. La relación entre estos factores se conoce como biodisponibilidad. En los suelos uno de los factores limitantes para la biodegradación es la transferencia de masas, ya que los microorganismos de los suelos contaminados, suelen tener amplias capacidades biodegradativas al estar expuestos a una gran variedad de compuestos orgánicos diferentes. Por lo tanto la adsorción, la absorción,

desadsorción, disolución y la difusión son fenómenos, propios de la transferencia de masas, que condicionan la biodisponibilidad de los contaminantes.

Presencia de agua.

Ésta es necesaria ya que, como se ha visto con anterioridad, los microorganismos toman en carbono orgánico, los nutrientes inorgánicos y los aceptores de electrones, necesarios para el crecimiento microbiano, de la fase líquida. Por lo tanto, el agua debe estar en contacto con los contaminantes estar presente en cantidades que permitan el desarrollo de las comunidades microbianas. Sin embargo, el agua puede llegar a inhibir el flujo de aire y reducir el suministro de oxígeno necesario para la respiración microbiana. Existen valores de humedad óptima para Biorremediación de terrenos no saturados, que habitualmente están entre 150 y 250 grados de agua por kg de terreno seco.(Ercoli, 1999)

Factores químicos

El factor químico más importante en la Biorremediación es la estructura molecular del contaminante, cómo ésta afecta a sus propiedades químicas y físicas y su capacidad para ser biodegradado. La capacidad para ser biodegradado está relacionada con factores tales como la solubilidad, el grado de ramificación, el grado de saturación y la naturaleza y el efecto de los sustituyentes.

Estructura química.

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. De las distintas familias de hidrocarburos del petróleo, los n-alcenos y los alcanos ramificados (isoprenoides) de cadena intermedia (C10-C20) son los sustratos más fácilmente degradables por los microorganismos del suelo, y que por lo tanto tienden a ser eficazmente biodegradados. Sin embargo,

los alcanos de cadena larga (>C₂₀) son más difíciles de degradar debido a su (elevado peso molecular) y su baja solubilidad en agua. Los cicloalcanos, por norma general, se degradan más lentamente que los n-alcanos y alcanos ramificados. De igual forma, los HAPs que contienen de 2 a 3 anillos aromáticos pueden ser biodegradados eficazmente en el suelo en condiciones ambientales óptimas, mientras que los HAP de 4 anillos, y especialmente, los de 5 o más anillos bencénicos presentan una mayor recalcitrancia inherente y una baja solubilidad. Las fracciones de resinas y asfaltenos son las que presentan una menor degradabilidad debido a las complejas estructuras químicas y al elevado peso molecular de sus moléculas.

Factores microbiológicos

El factor microbiológico más importante en la Biorremediación es la transformación biológica de compuestos orgánicos, catalizada por acción de las enzimas. La biodegradación de un compuesto específico es frecuentemente un proceso que se realiza paso a paso en el cual se involucran muchas enzimas y muchos organismos. Las enzimas son específicas en términos de los compuestos que atacan y las reacciones que catalizan. Más de una enzima es normalmente requerida para romper una sustancia orgánica. Frecuentemente, los organismos que tienen las enzimas para degradar están presentes en el suelo.

5.1.1 ETAPAS DE UNA BIORREMEDIACIÓN EFICAZ

Análisis y elección de las medidas biocorrectivas

a) 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, densidad y grado de solubilidad.

b) 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 tales como presencia de microorganismos y aclimatación de las poblaciones microbianas.

c) Designar las medidas biocorrectivas. En función de los factores anteriormente expuestos, se debe elegir el sistema de biotratamiento más adecuado

Diseño y evaluación del sistema

a) *Evaluación de la viabilidad de la técnica.*

Se deben estudiar los parámetros de evaluación que definen el sistema elegido, así como se deben evaluar las condiciones de biotratabilidad, los objetivos de limpieza exigidos y los costes de tratamiento necesarios.

b) *Evaluación del diseño.*

Se deben estudiar los factores que afectan la eficacia de la técnica y las posibles mejoras o acondicionamientos a aplicar.

c) *Evaluación del 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 las siguientes condiciones de degradación y biodegradación como la variación de concentración de TPH, BTEX, CO₂ desprendido y Oxígeno disuelto, variación de nutrientes (N, P, etc), parámetros que afectan el funcionamiento del sistema.

Análisis e interpretación de resultados

En esta última etapa se deben analizar los resultados obtenidos, haciendo un balance de los objetivos alcanzados y los marcados inicialmente. En este punto, si

fuese necesario, se deben proponer y estudiar aquellas mejoras o modificaciones necesarias para la optimización del sistema.

5.1.2 LA BIORREMEDIACIÓN

- Ventajas

Mientras que los tratamientos físicos y buena parte de los químicos están basados en transferir la contaminación entre medios gaseoso, líquido y sólido, en la Biorremediación se transfiere poca contaminación de un medio a otro. Es una tecnología poco invasiva y generalmente no requiere componentes estructurales o mecánicos que signifiquen una amenaza para el medio. Comparativamente, es económica viable y al tratarse de un proceso natural, suele tener aceptación por parte de la opinión pública.

- Desventajas

La biodegradación incompleta puede generar intermediarios metabólicos inaceptables, con un poder contaminante similar o incluso superior al producto de partida y algunos compuestos contaminantes son tan resistentes que pueden incluso inhibir la Biorremediación. Es difícil predecir el tiempo de requerido para un proceso adecuado y el seguimiento y control de la velocidad y/o extensión del proceso es dispendioso. (King, 1997)

5.1.2.1 MÉTODOS DE BIORREMEDIACIÓN

El término Biorremediación se aplica a cualquier sistema o proceso en el que se empleen métodos biológicos para transformar contaminantes en el suelo o en las aguas. La biorrecuperación en suelos contaminados puede llevarse a cabo:

In Situ: excavando el terreno y tratándolo a pie de excavación.

Ex Situ: En instalaciones aparte donde este proceso, debe ser el resultado de la valoración de una serie de variables y de características del sitio o del contaminante a tratar.

5.1.2.1.1 BIORREMEDIACIÓN “IN SITU”

Este tipo de tratamiento normalmente es la opción más adecuada para la recuperación de suelos, ya que no es necesaria la preparación y excavación del material contaminado pero deben valorarse numerosos factores entre los que se destacan: Impacto ambiental en la zona. Actividades industriales que pueden verse afectadas. Costos comparativos con otros tratamientos. La dificultad de acceso a la zona contaminada para proveer de oxígeno y nutrientes. La determinación del porcentaje de tratamiento. La velocidad del proceso. El potencial peligro de extensión de la contaminación. La Biorremediación “In Situ” de suelos se puede dividir en dos tipos: tratamiento de compuestos volátiles y tratamiento de compuestos semi-volátiles y no volátiles. (Korda,1997)

Bioventeo

Consiste en suministrar aire al terreno contaminado para promover la actividad de los microorganismos presentes en el subsuelo y biodegradar los hidrocarburos. Para diseñar estos sistemas es necesario conocer la permeabilidad del suelo a los gases, con el fin de determinar el radio de influencia de los pozos de venteo, la distancia entre pozos y las dimensiones de los equipos de inyección. Una característica determinante en la selección de esta técnica es el tipo de contaminante, puesto que es de mayor efectividad donde los contaminantes tienen baja volatilidad. Además se deben tener en cuenta las características físicas del suelo, la profundidad de la zona contaminada y el potencial para transportar contaminantes fuera de la zona.

- Ventajas.

Es una técnica altamente efectiva para tratar contaminaciones con compuestos con baja presión de vapor (menos de 1 mmHg), ya que su tasa de degradación es mucho mayor que la de volatilización (Matthews, 1993).

Como todos los tratamientos “In Situ”, cuando los costos de excavación son altos el bioventeado puede ser una alternativa económicamente interesante. No requiere área adicional para llevar a cabo el tratamiento, ni el uso de maquinaria pesada.

- Desventajas.

Tipo y concentración del contaminante.

Perdida de nutrientes en el subsuelo.

Bajo contenido de humedad del suelo y la dificultad de lograr el caudal de aire a través de la zona contaminada; por ello requiere características especiales del suelo en cuanto a humedad, porosidad, conductividad hidráulica, etc.

Requiere largos períodos de tiempo para obtener la concentración final de hidrocarburo deseada. Los tiempos de limpieza pueden durar de meses a años.

La descontaminación puede llevarse a cabo por efecto de la volatilización de compuestos más que por su biodegradación.

Inyección de aire a presión

Consiste en inyectar aire a presión en la parte inferior para deslazar el agua de los espacios intersticiales de la matriz del suelo. Con la inyección de aire a presión se llevan a cabo dos mecanismos de remoción del contaminante, la volatilización de compuestos de la zona insaturada y la fase acuosa y la biodegradación. El mecanismo gobernante depende de las características de los contaminantes. Las características determinantes en la selección de esta técnica son:

El tipo de contaminante, las moléculas pequeñas (hasta C₂₀), siendo más biodegradables los compuestos parafinados o de cadena lineal, 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 cm²). Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 a 8), de humedad (12 a

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. (Matthews, 1993).

- Ventajas.

Es un proceso excelente para casos donde los compuestos volátiles son los contaminantes principales.

Necesidad de tiempos de actuación cortos (meses).

No requiere área adicional para llevar a cabo el tratamiento, ni el uso de maquinaria pesada.

- Desventajas.

El principal problema es la biodisponibilidad de los microorganismos. Cuanto menor es la solubilidad de los contaminantes menor será la biodisponibilidad.

En este sistema hay poco control del movimiento del agua subterránea y los contaminantes, lo cual puede acelerar y agravar la extensión de la contaminación.

En cuanto a las profundidades, la literatura recomienda profundidades mínimas aproximadas de 1,2 metros, necesarias para confinar adecuadamente el aire inyectado; y máximas aproximadas de 9 metros, por debajo de las cuales sería muy difícil controlar la dirección del desplazamiento del aire.

Los cambios en la litología del suelo pueden afectar la dirección y la velocidad del flujo, más aún si se tiene en cuenta que el aire a presión viaja aceleradamente.

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". Su característica principal es la utilización de los procesos fisicoquímicos 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 y que contribuyen de alguna forma a la disminución de la contaminación. Esta técnica se aplica en aquellos casos en los que exista contaminación producida por hidrocarburos de tipo halogenado o nohalogenado. La atenuación natural puede darse en presencia o ausencia de oxígeno. Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 a 8), de humedad (12a 30% en peso), temperatura entre 0 y 40 °C, potencial redox debe estar situado entre un rango de -400 y 800 mV y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.

- Ventajas.

Es una técnica de Biorremediación "In Situ" de muy bajo costo.

Puede darse en presencia o ausencia de oxígeno, por tanto no se hace necesario adicionar oxígeno al medio contaminado.

- Desventajas.

La exigencia de protección y el riesgo de los potenciales receptores durante el tiempo que dura la atenuación.

Producción y conservación en el medio de subproductos de carácter persistente o más tóxico que los iniciales, durante y después de la atenuación natural.

Bioestimulación

En este sistema, el agua subterránea es conducida a la superficie por medio de un sistema de pozos de extracción, se acondiciona en un reactor para volverla a inyectar y estimular la degradación bacteriana de los contaminantes del subsuelo y del acuífero. En el reactor en superficie se agregan al agua: nutrientes, oxígeno, microorganismos previamente seleccionados y adaptados, y el efluente se retorna al subsuelo por medio de pozos de inyección, aspersores superficiales o galerías de infiltración distribuidas a lo largo y ancho del sitio que se requiere remediar.

Algunas veces esta técnica utiliza biosurfactantes para ayudar al lavado de contaminantes del suelo. Los suelos deben ser lo más homogéneos posible, con un valor de porosidad y permeabilidad al aire adecuado ($> 10^{-10}$ cm²). Deben existir unas condiciones óptimas de pH (6 y 8), de humedad (12-30% en peso), temperatura entre 0 y 40 °C y los nutrientes del suelo en relación N:P de 10:1.

- Ventajas.

Esta técnica es muy útil en el tratamiento de extensas zonas contaminadas de centros industriales donde no es posible o conveniente parar el proceso operativo para realizar el tratamiento requerido. (CUNNINGHAM, 2000)

Bioaumentación

Otras líneas de investigación han llevado a la introducción de microorganismos aclimatados o incluso modificados genéticamente en el medio, con el fin de mejorar la biodegradación. Esta técnica funciona en condiciones de laboratorio o biorreactor, pero en ambientes externos (suelo o agua) su implantación depende de una serie de factores. Presencia de toxinas, nutrientes y condiciones ambientales, movilidad y/o distribución de los microorganismos y la presencia de abundante materia orgánica. Los microorganismos añadidos deben sobrevivir a los depredadores y competir con éxito con la población autóctona antes de ocupar los nichos potenciales. En general, los ambientes más selectivos y la utilización de consorcios microbianos favorecen la bioaumentación.

- Ventajas.

No requiere área adicional para llevar a cabo el tratamiento, ni el uso de maquinaria pesada.

- Desventajas.

El tamaño de la población de microorganismos degradadores crece rápidamente como respuesta a la contaminación del medio y es muy difícil, si no imposible, incrementar la población microbiana más allá de esos valores.

5.1.2.1.2 BIORREMEDIACIÓN “EX SITU”

Tres son los tratamientos que se distinguen cuando el procedimiento se realiza fuera del lugar donde está la contaminación: Landfarming, Biopilas y Biorreactor. Los métodos de Landfarming y Biopilas son biorrecuperación vía sólida. La diferencia fundamental entre ambos es el sistema de aireación, mientras que en el Landfarming sólo se pueden tratar las capas de suelo menos profundas, en las Biopilas se requiere la formación de grandes apilamientos de material degradable. En el tratamiento Biorreactor se excava el material contaminado y se traslada a un reactor. La característica de este método es la suspensión en un medio acuoso del suelo contaminado, es decir, el tratamiento se lleva a cabo bajo condiciones de saturación de agua. (VINAS,2002)

Landfarming

Esta es la técnica más usada para la Biorremediación de los lodos contaminados con hidrocarburos y de otros desechos de la industria petrolera. Esta técnica consiste en excavar los suelos contaminados, extenderlos sobre un área suficientemente amplia y estimular las variables de incidencia en el proceso para promover la actividad de los microorganismos encargados de degradar los hidrocarburos. Antes de extender el suelo contaminado se deben adecuar las condiciones de la superficie para controlar los lixiviados y las aguas lluvias. En áreas de riesgo de contaminación de acuíferos, se debe impermeabilizar la zona de tratamiento con sellos de arcilla o geomembranas para evitar el arrastre de hidrocarburos solubles de las lluvias hacia las aguas subterráneas. Una vez extendido el suelo contaminado se irriga con las soluciones de nutrientes, los microorganismos y los aditivos químicos en el caso que sean necesarios. Periódicamente se debe airear el suelo para suministrarle oxígeno, con la ayuda de tractores y retroexcavadoras (aireación mecánica) o sistemas de inyección de aire comprimido. Para empezar el procedimiento, se hace una búsqueda y selección de bacterias nativas aisladas de las muestras de suelos que se

encuentran contaminados, ya que estas tienen la capacidad catabólica para crecer bajo las condiciones físico-químicas y de estrés a las que están sometidas, y tendrán un mejor desempeño a la hora de la Biorremediación.

- Ventajas.

Es económico con respecto a otras técnicas de Biorremediación.

Es un proceso considerado de bajo nivel tecnológico que no requiere exigentes consideraciones de ingeniería, y a la vez permite una fácil manipulación y control de las variables de diseño y operación.

- Desventajas

Requiere grandes extensiones de terreno para disposición de suelos y no es viable si no se cuenta con suficiente área.

Cuando los contaminantes son hidrocarburos livianos la remediación puede ser acelerada por su volatilización, lo cual generaría problemas con las autoridades ambientales donde las regulaciones de emisiones atmosféricas son exigentes.

Cuando la contaminación es profunda los costos de excavación y movimiento de tierras pueden ser altos

Biopilas

La técnica conocida como bioceldas o biopilas es un tratamiento de biorrecuperación en condiciones no saturadas, que consiste en la reducción de la concentración de contaminantes derivados del petróleo en suelos excavados mediante el uso de la biodegradación a partir de la construcción de un sistema cerrado que permita controlar lixiviados, hidrocarburos volátiles y algunas variables de diseño mediante el suministro de nutrientes y oxígeno a través de la pila del suelo. 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. En el fondo de la pila el

sistema cuenta con un aislante que generalmente son geomembranas o canales plásticos para el control de lixiviados. Estas pilas de compost pueden ser aireadas de forma activa, volteando la pila, o bien de forma pasiva, mediante tubos perforados de aireación, con distribución permanente de nutrientes, microorganismos y aire. En principio, las biopilas se pueden aplicar a la mayoría de los compuestos orgánicos, siendo más eficaz en los compuestos de carácter más ligero. Necesidad de una densidad de poblaciones microbianas (>1.000CFU/gramo de suelo), condiciones de humedad (40 a 85% de capacidad decampo), temperatura (10 a 45°C), textura (baja proporción de arcillas), pH del suelo adecuadas (6 a 8) y baja presencia de metales pesados (< 2.500ppm). La concentración de nutrientes en el suelo cuyo rango normal de C:N:P sea de 100:10:1.

- Ventajas.

Esta técnica es muy eficiente en el tratamiento de residuos con bajas concentraciones de hidrocarburos.

Por ser un sistema cerrado permite un mayor control de las variables del proceso, como el control de condiciones climatológicas adversas (baja temperatura o alto régimen pluviométrico).

Cuando no se dispone de espacio suficiente para extender el suelo, este sistema permite construir pilas de suelo cuatro o cinco veces más altas que en una disposición sobre el suelo (ocupa diez veces menos área)

- Desventajas.

Si en el proceso se generan gases o vapores de hidrocarburos volátiles regulados por la autoridad ambiental, o las condiciones climatológicas de la zona pueden afectar negativamente la eficiencia del proceso, la pila del suelo se debe cubrir con membranas o poner techo de forma similar a los invernaderos.

Los vapores generados en el proceso se deben coleccionar y tratar antes de ser emitidos a la atmósfera. Lo que incurre a costos adicionales.

Como todos los tratamientos “Ex Situ”, cuando la contaminación es muy profunda, el movimiento de tierra puede requerir costos más altos.

Los hidrocarburos deben ser no halogenados y deben encontrarse en el suelo en concentraciones menores a 50.000 ppm.

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.

Biorreactor

El procedimiento consiste en excavar el suelo contaminado y luego introducirlo en un reactor añadiendo nutrientes, agua, y los cultivos microbianos adecuados para que se lleve a cabo la degradación. Se mezcla bien y se airea la suspensión hasta que las transformaciones de los compuestos seleccionados para su eliminación alcanzan el nivel deseado. A continuación se detienen el mezclado y la aireación, y se deja a los sólidos separarse de los fluidos por sedimentación. El sedimento es retirado y, si la transformación ha tenido éxito, el suelo se devuelve a su lugar de origen, mientras que los líquidos se tratan como aguas residuales. El suministro de oxígeno puede realizarse mediante aireación difusa, turbina difusora y aireación superficial. La tasa de transferencia de oxígeno necesaria es función de la tasa de degradación de los compuestos orgánicos y de la tasa de crecimiento microbiano. Su determinación no es fácil de hacer, sin embargo, las tasas de transferencia disminuyen al aumentar la concentración de sólidos suspendidos. El mezclado y el suministro de nutrientes también son fundamentales, ya que por el primero se incrementa el contacto entre los microorganismos y los componentes contaminantes, dando como resultado un incremento de las velocidades de transferencia de masa y de reacción. Los nutrientes normalmente optimizan la biorrecuperación por favorecer el crecimiento de los microorganismos. Por otro lado, el mezclado y la aireación ayudan a romper los flóculos de tierra y a disolver los contaminantes. (Mishra, 2001)

- Ventajas.

En comparación con otros procesos de tratamiento, los reactores vía suspensión proporcionan el mayor contacto entre los contaminantes, los microorganismos, el oxígeno, el agua y los nutrientes.

La capacidad de controlar los sistemas del tratamiento vía suspensión es mucho mayor y por tanto puede ser la tecnología más efectiva.

Es más rápido y requiere menos superficie que otros sistemas.

El tratamiento vía suspensión puede aplicarse en particular a los suelos contaminados con residuos oleosos de consistencia alquitranada.

- Desventajas.

Debido al energético mezclado y a la aireación forzada se favorece el escape de emisiones de aire, por ello la suspensión no es una buena elección para suelos donde los compuestos volátiles sean mayoría.

Esta técnica demanda mayor cantidad de dinero a comparación de otras técnicas de biodegradación.

La Fitorremediación

Constituye una variación de las técnicas de Biorremediación, que se basa en el uso de plantas verdes y los microorganismos asociados a ellas así como las enmiendas del suelo y técnicas agronómicas dirigidas a liberar, contener, o transformar en compuestos inocuos a los contaminantes del suelo. Inicialmente, el término de fitorremediación se asoció al uso de plantas capaces de bioconcentrar niveles inusuales de metales en sus tejidos. La mayor parte de ellas están constituidas por pequeñas plantas herbáceas que se desarrollan en zonas metalúrgicas naturales o en depósitos. La fitorremediación comprende tanto los procesos dirigidos a liberar el contaminante de la matriz del suelo (descontaminación), como los encargados de secuestrarlos endicha matriz (estabilización).

5.1.2.2 LA BIORREMEDIACIÓN EN COLOMBIA

El trabajo de Biorremediación, se plantea como objetivo prioritario, incentivar la población autóctona microbiana para realizar el bioproceso de degradación, siguiendo estrategias de bioaumentación, primero agotando las medidas "*in situ*", ya que son menos costosas y pueden generar un menor impacto al suelo.

Biorremediación de Aridisoles y Entisoles

El tratamiento para la recuperación de áreas de este tipo consiste en la aplicación de procesos de Biorremediación y Landfarming in situ, en un trabajo artesanal y manual, efectuando una bioaumentación con bacterias autóctonas, con el objeto de acelerar el proceso de degradación del contaminante. De esa manera se aumentan las posibilidades de mantener las características bióticas de la tierra, y se reducen los tiempos para la resolución del problema. Durante los primeros días se realizan las siguientes actividades: Extracción de muestras para determinar la calidad del hidrocarburo y la concentración presente del mismo. Se retiran las tierras afectadas, impregnadas, tratando las mismas en la cancha de Landfarming de una empresa asentada en el lugar. Se remueve el suelo en forma manual, evitando alterar la flora nativa. Se agrega material granular para asegurar que la porosidad se mantenga, para así crear cámaras de oxígeno indispensables para el metabolismo de las bacterias (aeróbicas). Se controla la humedad hasta obtener la humedad ideal, y se siembran bacterias hidrocarburohílicas y nutrientes en el suelo afectado. Para mantener el proceso degradativo, se remueve el suelo periódicamente y se controla la humedad del mismo. (Schmidt, 2000)

Biorremediación de Alfisoles y Molisoles

Los alfisoles y molisoles son los tipos de suelos con mayor fertilidad natural. La Bioestimulación es una buena alternativa ya que en ella es indispensable el acondicionamiento o ajuste de los principales factores abióticos, tales como pH,

humedad, aireación y nutrientes, entre otros que favorecen o estimulan el desarrollo de poblaciones bacterianas. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en este tipo de suelos y se han demostrado sus bondades en comparación con la bioaumentación en diversos desechos de la industria petrolera, tales como ripios de perforación, suelos contaminados por derrames de productos y crudo, lodos de fondo de tanques y saneamiento de fosas. Su aplicación ha sido realizada como Landfarming, referida a la biodegradación del contaminante en la capa arable del suelo; composting aeróbico, formando pilas de hasta 3 m de altura y 2 m de ancho con incorporación de mejoradores orgánicos y tratamiento *"in situ"*, como en el caso de fosas, en las cuales se aplica el biotratamiento o Biorremediación dentro de la misma, sin necesidad de remover y extraer el desecho para tratarlo en otra área.

Biorremediación de Andisoles

A este tipo de suelos se les puede aplicar la técnica llamada bioelectrocinética. Se combina la aplicación de la corriente eléctrica directa con alguna de las técnicas de Biorremediación. Se busca estimular la biodegradación de contaminantes orgánicos al introducir nutrientes y bacterias dentro del suelo, de manera que el campo eléctrico desorbe los contaminantes incrementando su disponibilidad para que los microorganismos los incorporen a su metabolismo, o bien sean estabilizados como resultado de reacciones químicas entre el contaminante y productos metabólicos como el sulfuro y metales divalentes. Esta modificación ha sido probada con moléculas orgánicas sintéticas como TNT, BPC y pesticidas, entre algunos otros y metales pesados como cobre. En este grupo se encuentran los procesos de "lasagna", en los cuales se intercalan estratos de materia orgánica para absorber los contaminantes que se liberaron del suelo y que migran por acción del campo eléctrico. Una vez que los contaminantes (generalmente orgánicos) se encuentran en la zona de materia orgánica, se inicia la biodegradación de los mismos en esta zona. (Maini y Sharman 1999, Gent y Bricka 2001). (Marks et al. 1994)

Biorremediación de Ultisoles

El remediador aplicado consiste en una formulación a base de biomasa vegetal que combina diferentes partes aéreas de plantas en proporciones específicas que suministran nutrientes, particularmente nitrógeno, a los procesos de Biorremediación. Las biomasa vegetal actúan mejorando la estructuración del desecho, al incrementar la porosidad en el desecho y por ello el intercambio de oxígeno. Además de la biodegradación de los componentes saturados y aromáticos, los productos remediadores actúan como un mejorador orgánico, restaurando el equilibrio ecológico del suelo al favorecer el desarrollo de la cobertura vegetal. Una vez aplicado, el producto se mezcla por medio de maquinarias en los primeros horizontes del suelo, ajustando el porcentaje de humedad del suelo a un 60 % de la capacidad de campo. La aplicación del producto remediador también se aplica al manejo de desechos durante la perforación, conocidos como rips base aceite, y a la recuperación de áreas, mediante el tratamiento orgánico, como es el caso de las arenas petrolizadas. Después de las labores de recolección del crudo, siempre queda un remanente de arenas petrolizadas. Éstas son apiladas y tratadas con el remediador al 3%, previa evaluación, a nivel de laboratorio, de su efectividad. El producto remediador es aplicado para mejorar la calidad orgánica. Se observa un incremento del contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo total; así como una disminución de la relación de adsorción de sodio, pH, y contenido de aceites y grasas. Estos cambios, generados por la adición del producto remediador permiten la restauración efectiva de estas áreas.

Biorremediación de Inceptisoles

Los suelos que corresponden al orden Inceptisoles, incluyen suelos de regiones subhúmedas y húmedas, que no han alcanzado a desarrollar caracteres diagnósticos de otros órdenes, pero muestran evidencias de desarrollo progresivo, son suelos inmaduros, con escasa expresión morfológica. Los parámetros

edáficos que determinan y condicionan la elección de un suelo para "landfarming" son: textura, estructura, pH, temperatura, porosidad, velocidad de percolación, capacidad de retención de agua, infiltración, contenido de oxígeno, contenido de macro y micronutrientes, humedad. La textura del suelo incide en la aireación, en su capacidad de retención de agua, porosidad y velocidades de percolación e infiltración. Los suelos dicho orden, pueden ser predominantemente limo-arcillosos en superficie y netamente arcillosos en profundidad, poseen buen drenaje. La temperatura del suelo, recomendada para la biodegradación del petróleo se encuentra entre 20 y 30 °C; si se utiliza la población microbiana autóctona del suelo se puede lograr que los microorganismos involucrados posean estrategias adaptativas de sobrevivencia para soportar la variabilidad climática de su hábitat natural. La estructura, textura y materia orgánica del suelo son factores determinantes de la porosidad del mismo, entonces estos parámetros deber ser determinados antes, durante y luego de finalizado el biotratamiento. El laboreo agrícola debe iniciarse previo a la incorporación del residuo, con el objeto de descompactar, airear y homogeneizar el material de las capas superficiales, de modo que pueda aumentarse mecánicamente el número de poros. Para este tipo de suelos se hace posible utilizar uno o varios métodos a la vez para recuperar la actividad microbológica del suelo, pues es necesario que en las temporadas secas donde se evidencia la compactación del terreno, se haga riego del terreno y en las temporadas de lluvias se realicen calicatas exploratorias y laboreo agrícola con herramientas convencionales. Las celdas Landfarming, la bioaumentación y la fitorremediación son métodos que se pueden utilizar en este tipo de casos, en algunos, se hace necesaria la utilización de los tres métodos, lo que depende del daño (antecedentes del suelo), de las características climáticas de la zona y de la actividad microbológica del suelo, estudiada con anterioridad. (Plaza, 2001)

Biorremediación de Oxisoles

Las alternativas de Biorremediación para suelos de este tipo son variadas. La metodología que se puede aplicar para la descontaminación del suelo

contaminado con petróleo, es el resultado de la observación en campo del comportamiento del contaminante derramado y que se ha distribuido a través del suelo y sedimento en las áreas cenagosas, así como también en el agua superficial existente. Con el fin de un proceso más óptimo se hace necesario que el tratamiento se realice en dos fases. (Dimas, IGAC)

➤ Fase1.

Tratamiento del suelo mediante hidrolavado:

- Al suelo y a los sedimentos se les trata con una solución acuosa de biodesengrasantes compuestos principalmente por aceites de origen vegetal, que logran bajar la tensión superficial y disminuir las fuerzas de capilaridad dentro de las partículas de hidrocarburo y/o minerales de las superficies rocosas, limosas y arcillosas, crear una microemulsión que sea estable y solubilizar las moléculas individuales para que formen micelas o una simple fase de microemulsiones. El hidrocarburo desprendido se recupera utilizando sustratos vegetales oleofílicos en forma de barreras, evitando así que los productos del lavado fluyan por los cuerpos de agua. Si la cantidad de petróleo desprendido es grande justificará el uso de un rodillo para su recuperación y almacenamiento. En el procedimiento de lavado del suelo se separa la tierra fina (limo y arcilla), de la tierra gruesa (arena y grava). Si la arena y grava presentan vestigios de contaminantes, se puede someter el material a otro ciclo de lavado, recogerlo para aplicarle un tratamiento diferente o disponerlo en otro lugar. Si el limo y la arcilla todavía presenta trazas de hidrocarburos, se dispone en forma de biopilas para someterlo a un proceso de degradación mediante la aplicación de nutrientes y bioventilación para que el material en contacto con el oxígeno oxide los hidrocarburos residuales.

➤ Fase 2.

Cualquiera de las siguientes técnicas se podrá aplicar siempre y cuando se haya realizado una primera fase de tratamiento, es decir el lavado de suelos, ya que con este primer tratamiento es posible disminuir la concentración del contaminante en al menos un 60%:

Biorremediación in situ:

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, Se realizan las siguientes tareas:

- a. Se Construye un canal de drenaje en el área de confinamiento del material contaminado a fin de eliminar la mayor cantidad de agua posible del bajo existente; este canal de drenaje deberá atravesar los pantanos.
- b. Remover el suelo y sedimentos de los pantanos con la finalidad de recuperar el hidrocarburo libre, facilitar la homogenización del material y permitir evaporación del exceso de agua presente.
- c. Incorporar material de soporte: Este puede ser residuos vegetales que permitirán una fácil aireación y oxigenación del medio en tratamiento.
- d. Aplicación de fertilizantes: Se usarán fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio necesarios para el incremento y desarrollo de población microbiana con capacidad degradadora de petróleo.
- e. Aplicación de fertilizantes orgánicos: Estos pueden ser gallinazas, estiércoles y otros que a mas de aportar con cepas microbiana con capacidad de degradación de petróleo, proporcionaran fuentes de nutrientes y oligoelementos necesarios para el desarrollo biológico en el suelo en tratamiento.
- f. Aireación mecánica. A fin de incrementar la disponibilidad de oxígeno para el crecimiento microbiano y para el proceso de evapotranspiración del agua existente.

g. Aplicación de caldos y medios de cultivo provistos de cepas endémicas de organismos degradadores de petróleo, aisladas del sitio de remediación, clasificadas, potenciadas y bioaumentadas.

Esta técnica de Biorremediación in situ se puede aplicar siempre y cuando los niveles de hidrocarburos no sean tan altos y no haya presencia de hidrocarburo intemperizado.

5.1.2.3 PRINCIPALES OLEODUCTOS DEL PAÍS

Los oleoductos más importantes son:

- Oleoducto Caño Limón – Coveñas. Tiene 770 kilómetros de longitud y a través de él se transportan los crudos producidos en el campo Caño Limón (Arauca).
- Oleoducto de Alto Magdalena. Transporta los crudos que se obtienen en el Valle Superior del Magdalena.
- Oleoducto Central de los Llanos.
- Oleoducto Central S.A. (Ocensa). Con 790 kilómetros de longitud, transporta fundamentalmente los crudos del piedemonte llanero (Cusiana – Cupiagua) hasta el terminal marítimo de Coveñas.
- Oleoducto de Colombia. Tiene 481 kilómetros y conecta la estación de Vasconia con el puerto de Coveñas. (Ministerio, 1999)

5.2 MARCO LEGAL

La legislación sobre contaminación del suelo no se encuentra de forma específica en una Ley o Decreto de orden nacional, se tienen normas de ámbito regional o local (Resoluciones por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales), esto se debe principalmente a que el recurso del suelo necesariamente hace parte fundamental de los ecosistema terrestres, por lo tanto no se hace referencia exclusiva a la contaminación del suelo como tal, sino que generaliza a la protección de los recursos naturales.

En la Constitución Nacional de 1991 se presentan 17 artículos relacionados con la protección, conservación, control y mejoramiento de los recursos naturales. De forma específica sobre el suelo se menciona en los artículos 360, 361 y 366, a los cuales se refiere la corte constitucional. El código penal sanciona los delitos en contra de los recursos naturales en los artículos 242 al 247. Específicamente el artículo 247 se refiere a la sanción que se aplica a quien por contaminación ambiental ilícitamente, incurrirá, sin perjuicio de las sanciones administrativas a que hubiere lugar y siempre que el hecho no constituya otro delito, en prisión de uno a seis años y multa de cincuenta mil a dos millones de pesos.

En el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto 2811 de 1974), en sus artículos relacionados con el medioambiente, específicamente con el recurso suelo, se tienen los siguientes artículos:

Artículo 8º. Se consideran factores que deterioran el ambiente, entre otros: La degradación, la erosión, el revenimiento de suelos y Las alteraciones nocivas de la topografía

Artículos 182º al 186º. Relacionado con el uso y conservación de los suelos

Artículos 324º al 326º Relacionados con los distritos de conservación de suelos.

Decreto 4741 de 2005 donde se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos, donde se encuentran mencionados los hidrocarburos en los artículos:

Artículo 10 numeral (h): de las Obligaciones del Generador

Artículo 16 numeral (e): de las Obligaciones del Transportador

Artículo 17 numeral (g): de las Obligaciones del Receptor

Decreto 321 de 1999 Por el cual se adopta el Plan Nacional de Contingencia contra derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas.

Estos decretos y artículos sin determinar en ningún momento niveles y valores mínimos de los diferentes contaminantes como se pueden encontrar en las diferentes legislaciones internacionales:

México: NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y LAS ESPECIFICACIONES PARA SU CARACTERIZACIÓN Y REMEDIACIÓN.

Cuadro 3. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo México

Hidrocarburos específicos	Uso de suelo predominante ¹ (mg/kg base seca)			Método analítico
	Agrícola ²	Residencial ³	Industrial	
Benceno	6	6	15	Anexo A.4
Tolueno	40	40	100	Anexo A.4
Etilbenceno	10	10	25	Anexo A.4
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	Anexo A.4
Benzo[a]pireno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Dibenzo[a,h]antraceno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Benzo[a]antraceno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Benzo[b]fluoranteno ⁴	2	2	10	Anexo A.5
Benzo[k]fluoranteno ⁴	8	8	80	Anexo A.5
Indeno (1,2,3-cd)pireno ⁴	2	2	10	Anexo A.5

Canada: Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health Update 7.0 September 2007.

Cuadro 4. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo Canadá

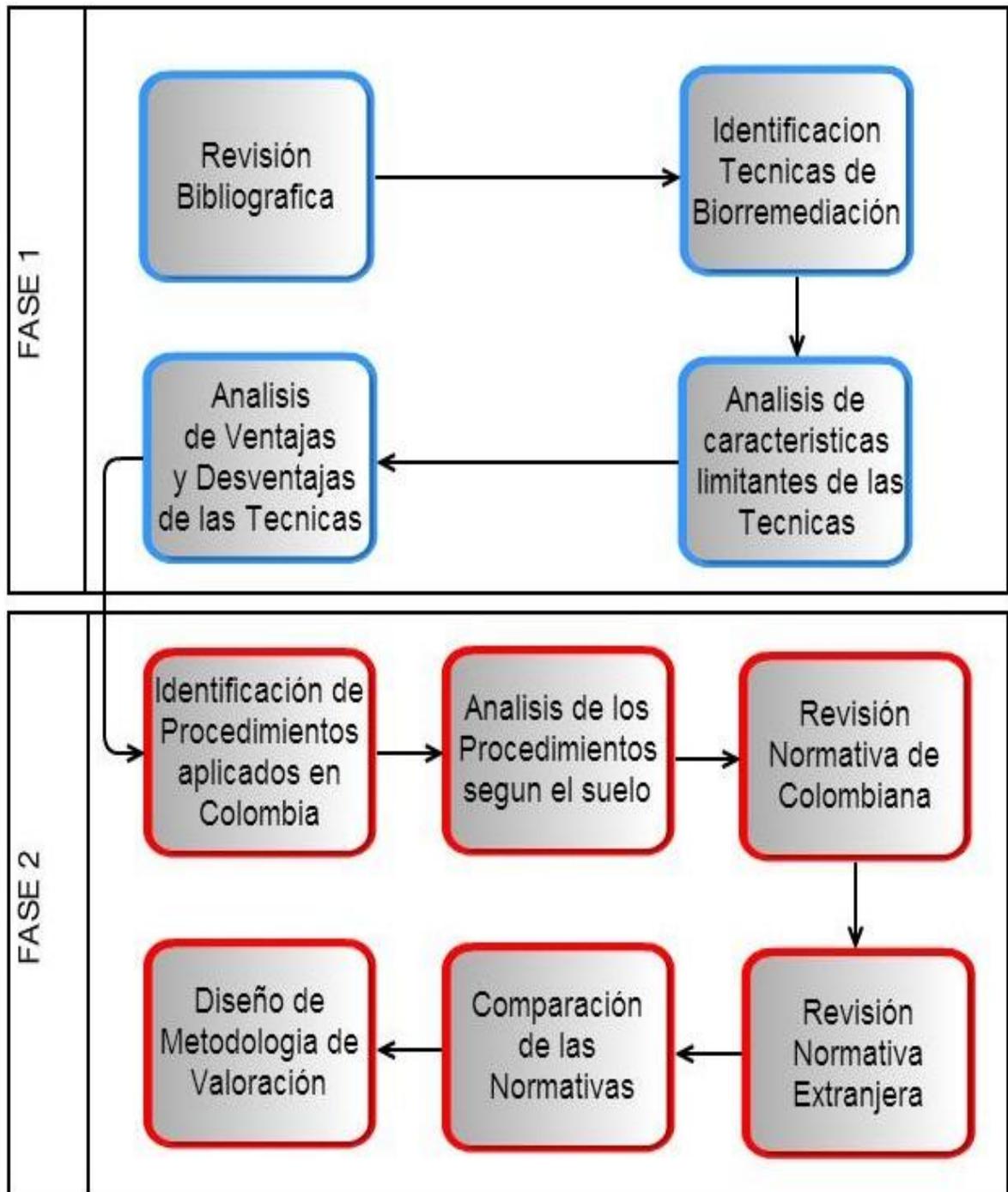
Parameter	Year released	Land use			
		Agricultural	Residential/ parkland	Commercial	Industrial
General Parameters					
Conductivity [dS/m]	1991	2	2	4	4
pH	1991	6 to 8	6 to 8	6 to 8	6 to 8
Sodium adsorption ratio	1991	5	5	12	12
Inorganic Parameters					
Antimony	1991	20	20	40	40
Beryllium	1991	4	4	8	8
Boron (hot water soluble)	1991	2	—	—	—
Cobalt	1991	40	50	300	300
Fluoride (total)	1991	200	400	2000	2000
Molybdenum	1991	5	10	40	40
Silver	1991	20	20	40	40
Sulphur (elemental)	1991	500	—	—	—
Tin	1991	5	50	300	300
Monocyclic Aromatic Hydrocarbons					
Chlorobenzene	1991	0.1	1	10	10
1,2-Dichlorobenzene	1991	0.1	1	10	10
1,3-Dichlorobenzene	1991	0.1	1	10	10
1,4-Dichlorobenzene	1991	0.1	1	10	10
Styrene	1991	0.1	5	50	50
Phenolic Compounds					
Chlorophenols ^a (each)	1991	0.05	0.5	5	5
Nonchlorinated ^b (each)	1991	0.1	1	10	10
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)					
Benzo(<i>a</i>)anthracene	1991	0.1	1	10	10
Benzo(<i>b</i>)fluoranthene	1991	0.1	1	10	10
Benzo(<i>k</i>)fluoranthene	1991	0.1	1	10	10
Dibenz(<i>a,h</i>)anthracene	1991	0.1	1	10	10
Indeno(1,2,3- <i>c,d</i>)pyrene	1991	0.1	1	10	10
Phenanthrene	1991	0.1	5	50	50
Pyrene	1991	0.1	10	100	100
Chlorinated Hydrocarbons					
Chlorinated aliphatics ^c (each)	1991	0.1	5	50	50
Chlorobenzenes ^d (each)	1991	0.05	2	10	10
Hexachlorobenzene	1991	0.05	2	10	10
Hexachlorocyclohexane	1991	0.01	—	—	—
Miscellaneous Organic Parameters					
Nonchlorinated aliphatics (each)	1991	0.3	—	—	—
Phthalic acid esters (each)	1991	30	—	—	—
Quinoline	1991	0.1	—	—	—
Thiophene	1991	0.1	—	—	—

Ecuador: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados. (Anexo 2, Libro VI, De la Calidad Ambiental).

Cuadro 5. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo Ecuador

Sustancia	Unidades (Concentración en Peso Seco)	USO DEL SUELO			
		Agrícola	Residencial	Comercial	Industrial
Parámetros Generales					
Conductividad	mmhos/cm.	2	2	4	4
pH		6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8
Parámetros Inorgánicos					
Arsénico (inorgánico)	mg/kg	12	15	15	15
Azufre (elemental)	mg/kg	500	-	-	-
Bario	mg/kg	750	500	2000	2000
Boro (soluble en agua caliente)	mg/kg	2	-	-	-
Cadmio	mg/kg	2	5	10	10
Cobalto	mg/kg	40	50	300	300
Cobre	mg/kg	63	63	91	91
Cromo Total	mg/kg	65	65	90	90
Cromo VI	mg/kg	0.4	0.4	1.4	1.4
Cianuro (libre)	mg/kg	0.9	0.9	8.0	8.0
Estaño	mg/kg	5	50	300	300

6 METODOLOGÍA



7 RESULTADOS

- Identificaron los métodos más comunes de Biorremediación aplicados en Colombia diferenciándolos según el tipo (“in Situ”) y (“ex Situ”) mediante el análisis de artículos de investigación, realizándoles un análisis de ventajas y desventajas de cada método, los diferentes tipos de suelo y las condiciones que favorecen al desempeño de los métodos, para poder establecer la viabilidad del uso de estos.
- Se realizó la revisión de las normativas internacionales, encontrando parámetros específicos para los casos de contaminación de hidrocarburos, en las normas nacionales no se encuentra ningún tipo de control en parámetros de contaminantes para estos casos, se sugiere la implementación de parámetros para realizar un control completo de los diferentes procesos de Biorremediación y así poder determinar un cumplimiento por parte de las empresas encargadas del proceso de descontaminación.

Este cuadro presenta las ventajas y desventajas que tiene cada uno de los métodos de Biorremediación ya sean por condiciones ambientales o por características del contaminante.

Cuadro 6. Ventajas y Desventajas de los Métodos

METODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	
"EX SITU"	BIOPILAS	<p>Los contaminantes absorbidos en el suelo (hidrocarburos) son biodegradados en vez de pasar a otra condición</p> <p>El diseño y construcción de la infraestructura necesaria son relativamente fáciles de ejecutar</p> <p>El saneamiento del suelo se lleva a cabo en un periodo corto de tiempo (3-9 meses)</p> <p>El sistema cerrado permite un mayor control de las condiciones climáticas adversas</p>	<p>Los Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) de cinco y seis anillos son difícilmente biodegradables en biopilas</p> <p>Las biopilas no son efectivas para concentraciones de TPH superiores a 50,000 mg/Kg y para hidrocarburos halogenos</p> <p>La presencia de metales pesados pueden inhibir el crecimiento de microorganismos (< 2,500 ppm)</p> <p>El movimiento de suelo y el control de vapores pueden requerir costos mas altos.</p>
	LANDFARMING	<p>Sistema relativamente simple desde el punto de vista de implementación y diseño en obra</p> <p>Cortos periodos de tratamiento, entre 6 meses y 2 años, para condiciones optimas</p> <p>Coste de tratamiento competitivo, respecto a otras tecnicas de Biorremediación</p> <p>Sistema efectivo para suelos contaminados por hidrocarburos con bajas tasas de biodegradación</p>	<p>Los rendimientos de remediación por encima del 95% y por debajo de 0,1 ppm, son difíciles de conseguir.</p> <p>No es muy efectivo para suelos contaminados por hidrocarburos con concentraciones superiores a 50,000 ppm.</p> <p>La presencia de metales pesados (< 2,500 ppm) limita procesos de Biorremediación y crecimiento microbiano</p> <p>Necesidad de una gran extensión de espacio para el extendido del suelo contaminado para el arado</p> <p>Necesidad de una lamina de impermeabilización (PEAD) para el control de lixiviados</p> <p>Tendencia de los compuestos mas ligeros a la volatilización durante el tratamiento</p>
	BIORREACTOR	<p>Se logra el mayor contacto entre los contaminantes, los microorganismos, el oxígeno, el agua y los nutrientes.</p> <p>Es más rápido y requiere menos superficie que otros sistemas.</p> <p>El control de los sistemas del tratamiento vía suspensión es mucho mayor y puede ser la tecnología más efectiva.</p> <p>El tratamiento puede aplicarse a los suelos contaminados con residuos oleosos de consistencia alquitrana</p>	<p>El mezclado y la aireación favorece el escape de vapores.</p> <p>Esta técnica demanda mayor cantidad de dinero a comparación de otras técnicas de biodegradación.</p>
"IN SITU"	BIOVENTEO	<p>Sistema de remediación relativamente facil de instalar con equipos disponibles en el mercado.</p> <p>Minima alteración del emplazamiento contaminado.</p> <p>Cortos periodos de remediación entre 6 meses y 2 años para condiciones optimas.</p> <p>Costes competitivos de aplicación.</p> <p>Facilmente combinable con otras tecnicas de remediación.</p> <p>Puede realizarse por debajo de edificios sin necesidad de excavar los terrenos.</p> <p>Puede no requerir costosos tratamientos de gases.</p>	<p>La reducción por encima del 90% es difícil de conseguir.</p> <p>Altas concentraciones de contaminantes, pueden convertir el suelo en toxico, por lo que el metodo es no viable</p> <p>La efectividad del metodo puede verse reducida por la permeabilidad del suelo.</p> <p>Los costos pueden incrementarse por la necesidad de tratar los vapores emitidos.</p> <p>Puede ser necesaria un permiso para emisión de vapores e inyección de nutrientes según las normas.</p> <p>Unicamente efectiva en la zona no saturada del suelo, posible combinación con otras tecnicas.</p>
	INYECCIÓN DE AIRE	<p>Necesidad de tiempos de actuación cortos (meses).</p> <p>Es un proceso excelente para casos donde los compuestos volátiles son los contaminantes principales.</p> <p>No requiere área adicional para llevar a cabo el tratamiento, ni el uso de maquinaria pesada.</p>	<p>El principal problema es la biodisponibilidad de los microorganismos.</p> <p>En este sistema hay poco control del movimiento del agua subterránea y los contaminantes.</p> <p>Los cambios en la litología del suelo pueden afectar la dirección y la velocidad del flujo de aire</p> <p>Se recomienda profundidades mínimas aproximadas de 1,2 metros, necesarias para confinar adecuadamente el aire inyectado; y máximas aproximadas de 9 metros.</p>
	ATENUACIÓN NATURAL	<p>Es una técnica de Biorremediación "In Situ" de muy bajo costo</p> <p>Puede darse en presencia o ausencia de oxígeno, por tanto no se hace necesario adicionarlo</p>	<p>La exigencia de protección y el riesgo de los potenciales receptores durante el tiempo que dura la atenuación.</p> <p>Producción y conservación en el medio de subproductos de carácter persistente o más tóxico que los iniciales, durante y después de la atenuación natural.</p>
	BIOESTIMULACIÓN	<p>Esta técnica es muy útil en el tratamiento de extensas zonas contaminadas de centros industriales donde no es posible o conveniente parar el proceso operativo para realizar el tratamiento requerido.</p>	
	BIOAUMENTACIÓN	<p>No requiere área adicional para llevar a cabo el tratamiento, ni el uso de maquinaria pesada</p>	<p>El tamaño de la población de microorganismos degradadores crece rápidamente como respuesta a la contaminación del medio y es muy difícil, si no imposible, incrementar la población microbiana más allá de esos valores.</p>

En este cuadro se mencionan las características químicas y físicas que se deben dar en el suelo para poder realizar los métodos con una mayor efectividad y eficacia

Cuadro 7. Características determinantes para Métodos

CARACTERISTICAS	METODOS							
	Bioventeo	Inyeccion de aire a presion	Atenuación Natural	Bioestimulación	Bioaumentación	Landfarming	Biopilas	Biorreactor
Tipo Contaminante		< C 20	Halogenados y no Halogenados				No Halogenado	
[] Contaminante							< 50000 ppm	
Volatilidad	< 1 mmHg	> 10 mmHg						
pH		6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8	Controlado
Humedad	12-30% peso	12-30% peso	12-30% peso	12-30% peso	12-30% peso	12-30% peso	40 - 85% peso	Controlado
Redox		> -50 mV	-400 y 800 mV					
Temperatura		0 y 40 °C	0 y 40 °C	0 y 40 °C	0 y 40 °C	0 y 40 °C	10 y 45 °C	Controlado
Nutrientes		N:P 10:1	N:P 10:1	N:P 10:1			C:N:P 100:10:1	Controlado
Tiempo	meses-años	meses	meses-años	meses-años	meses-años	meses	meses	meses
Permeabilidad		> 10 ⁻¹⁰ cm ²		> 10 ⁻¹⁰ cm ²				
Espesor Suelo						70 - 80 cm		
Población Microbiana							> 1000 UFC/g suelo	Controlado
Textura suelo	Bajo arcillas	Bajo arcillas		Homogeneos	Homogeneos		Bajo acillas	

Con este cuadro se determinan los mejores métodos que se pueden llegar a realizar en cada tipo de suelo, debido al tipo de suelo y la presencia de diferentes componentes que pueden llegar a alterar el tiempo y los resultados.

Cuadro 8. Método a usar según el Tipo de suelo

METODOS	TIPOS DE SUELO					
	Aridisoles y Entisoles	Alfisoles y Molisoles	Andisoles	Ultisoles	Inceptisoles	Oxisoles
Landfarming	x	x			x	
Bioaumentación						
Bioestimulación						
Bioelectrocinetica			x			
Biopilas				x		x
Bioventeo						
Fitorremediación						
Hidrolavado						x

7.1 DISEÑO DE SISTEMA DE SELECCIÓN DE METODO DE BIORREMEDIACIÓN A UTILIZAR

1. Determinación de tipo de Suelo
2. Determinación de textura de Suelo
3. Valoración de Área accesible o no accesible
(Elección de método “ex situ” o “in situ”)
4. Identificación de contaminante y su concentración
5. Revisión variables del proceso y condiciones de la muestra
(Valoración en cuadro)

Cuadro 9. Valoración

DISEÑO DE SELECCIÓN									
CARACTERISTICAS	Bioventeo	Inyección de aire a presión	Atenuación Natural	Bioestimulación	Bioaumentación	Landfarming	Biopilas	Biorreactor	Valoración
Tiempo									10%
Area Terreno									10%
Costo									20%
Residuos									10%
Impacto Entorno									5%
Maquinaria									3%
Complejidad									3%
Uso energía									6%
Uso Surfactantes									3%
Humedad									10%
Temperatura									10%
Nutrientes									5%
pH									5%
Valor Final									

1	Mejor
2	-
3	-
4	-
5	Peor

7.2 DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE SISTEMA DE SELECCIÓN DE METODO DE BIORREMEDIACIÓN



7.3 APLICACIÓN DEL SISTEMA DE SELECCIÓN DE METODO DE BIORREMEDIACIÓN.

- 1) Suelo Aridisol
- 2) Suelo Franco
- 3) Area accesible
- 4) Halogenado, [< 40000 ppm]
- 5) Cuadro

Cuadro 10. Ejemplo de valoración

DISEÑO DE SELECCIÓN										
CARACTERISTICAS	Bioventeo	Inyeccion de aire a presion	Atenuación Natural	Bioestimulación	Bioaumentación	Landfarming	Biopilas	Biorreactor	Valoración	
Tiempo	1 0,1	0	0	0	4 0,4	2 0,2	0	5 0,5	0,10	10%
Area Terreno	1 0,1	0	0	0	1 0,1	5 0,5	0	5 0,5	0,10	10%
Costo	1 0,2	0	0	0	2 0,4	4 0,8	0	5 1	0,20	20%
Residuos	1 0,1	0	0	0	1 0,1	4 0,4	0	5 0,5	0,10	10%
Impacto Entorno	1 0,05	0	0	0	2 0,1	5 0,25	0	5 0,25	0,05	5%
Maquinaria	1 0,03	0	0	0	2 0,06	5 0,15	0	5 0,15	0,03	3%
Complejidad	1 0,03	0	0	0	2 0,06	4 0,12	0	5 0,15	0,03	3%
Uso energia	1 0,06	0	0	0	1 0,06	4 0,24	0	5 0,3	0,06	6%
Uso Surfactantes	1 0,03	0	0	0	3 0,09	3 0,09	0	5 0,15	0,03	3%
Humedad	1 0,1	0	0	0	3 0,3	2 0,2	0	5 0,5	0,10	10%
Temperatura	1 0,1	0	0	0	2 0,2	4 0,4	0	5 0,5	0,10	10%
Nutrientes	1 0,05	0	0	0	2 0,1	3 0,15	0	5 0,25	0,05	5%
pH	1 0,05	0	0	0	2 0,1	3 0,15	0	5 0,25	0,05	5%
Valor Final	1	0	0	0	2,07	3,65	0	5		

1	Mejor
2	-
3	-
4	-
5	Peor

Bajo el ejemplo de identificación podemos determinar que en este tipo de muestra podemos realizar preferiblemente dos tipos de métodos los cuales son Bioaumentación y Landfarming llevándolos al análisis de selección determinamos que el proceso de Bioaumentación es el mejor porque implica menores niveles de impacto ambiental pues es el valor más cercano a 1.

8 CONCLUSIONES

- Identificaron los métodos más comunes de Biorremediación diferenciándolos según el tipo (“in Situ”) y (“ex Situ”) para poder establecer la viabilidad de uso de estos métodos en zonas alejadas o vírgenes en oleoductos que puedan afectar estas tierras.
- Se compararon las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de Biorremediación para realizar una diferenciación de procesos según el caso de tipo de hidrocarburo, tipo de suelo y analizar los posibles impactos que el método puede llegar a generar en el medio ambiente y así determinar cuál es más efectivo para cada caso.
- Se realizó una revisión y comparación de las normativas actuales en el país y las normativas actuales en otros países (México, Canadá, Ecuador), identificando así cuáles podrían ser las deficiencias presentes en las normativas nacionales como el caso de no estar establecido los valores mínimos de los contaminantes para así determinar cuando un proceso de Biorremediación está por concluido sin afectar a el medio ambiente.
- Se diseñó un sistema de valoración de métodos de Biorremediación basado en las condiciones que tienen los lugares donde se genera la contaminación, las condiciones que exige un método y algunos valores que puede determinar la empresa y las normas ambientales.

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda valorar los impactos de la mano de obra en los procedimientos de extracción del suelo para mitigar impactos ambientales.
- Se recomienda la completa identificación de los contaminantes de un derrame para evitar contaminaciones de mayor impacto como subproductos del proceso.
- Se recomienda mantener un cultivo activo de microorganismos utilizado en derrames anteriores de microorganismos autóctonos de cada región de los oleoductos para una fácil y rápida respuesta a los derrames.
- Se recomienda realizar un estudio completo de suelos y contaminantes antes de realizar cualquier tipo de proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alexander, M. (1999). Biodegradation and Bioremediation 2nd ed. Academic Press, London.
2. ARAUJO,Ismenia; MONTILLA,Manuel; CARDENAS,Carmen. Lodos estabilizados y cepas bacterianas en la Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Interciencia; Apr 2006
3. ARAUJO,Ismenia; GOMEZ,Antonio; BARRERA,Magleidy; ANGULO,Nancy; MORILLO,Gustavo. Surfactantes biológicos en la biorremediación de aguas contaminadas con crudo liviano. Interciencia; Apr 2008
4. Atlas R.M. y Unterman, R. (1999). Bioremediation. In: Demain AL & Davies JE (Eds) Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology 2nd ed (pp 666-681), ASM Press, Washington D.C.
5. BENAVIDES LÓPEZ DE MESA,Joaquin Msc; QUINTERO,Gladis Msc; GUEVARA VIZCAÍNO,Andrea Liliana; JAIMES CÁCERES,Diana Carolina; GUTIÉRREZ RIAÑO,Sandra Milena; GARCÍA,Johanna Miranda; Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. Universidad de La Salle. 2006
6. CASTRO-CARRILLO,Luis; DELGADILLO-MARTINEZ,Julian; FERRERA-CERRATO,Ronald. Remoción de fenantreno por *Azolla caroliniana* utilizando Bioaumentación con microorganismos hidrocarbonoclastas. Interciencia; Apr 2008
7. Colin Baird. (2001) Química Ambiental. Editorial Reverte S.A. Barcelona.
8. CUNNINGHAM C, Philp J. Comparison of Bioaumentation and Bioestimulation in ex situ treatment of Diesel Contaminated Soil. Land Contamination and Reclamation. 2000; 8 (4): 261-269.
9. DIAZ CONSUEGRA,Marving. "Revisión de los procesos de Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, aplicados en Colombia" Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Santa Fe de Bogotá. 1999

10. DIMAS MALAGÓN CASTRO. Agrólogo, Subdirector de Agrología IGAC. Los Suelos de Colombia
11. E. ORTIZ; R. NÚÑEZ.; E. FONSECA; J. ORAMAS; V ALMAZÁN; Y. CABRANES; A. MIRANDA; O .BARBÁN, C. MARTÍNEZ; Y. DÍAZ; Y G. BORGES. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Centro de Bioproductos Marinos (CEBIMAR).CUBA 2005
12. Ercoli, E.; Gálvez, J; Videla, C.; Cursi, E y Calleja, C. (1999). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. INGEPET 99. Lima. Perú.
13. EWEIS, Juana B; ERGAS, Sarina J; CHANG, Daniel P; SCHROEDER, Edward D. Principios de Biorrecuperación (Biorremediación). Mc Graw Hill (1999)
14. FERRERA-CERRATO, Ronald; ROJAS-AVELIZAPA, Norma; POGGI-VARALDO, Hector; ALARCÓN, Alejandro; CAÑIZARES-VILLANUEVA, Rosa. Procesos de Biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. Abril 2006
15. GENT D. Y BRICKA M. (2001). Electrokinetic movement of biological amendments through natural soils to enhance in-situ bioremediation. En: Bioremediation of Inorganic Compounds. (A. Leeson, B.M. Peyton, y J.L. Means, Eds.) The Sixth International inSitu and On-Site Bioremediation Symposium. San Diego, California. pp: 241–248.
16. Glazer, A.N. y Nikaido, H. (1995). Microbial Biotechnology: Fundamentals of Applied Microbiology. W.H. Freeman and Company, New York.
17. King R.B.; Long, G.M. y Sheldon, J.K. (1997). Practical environmental bioremediation, the field guide. Lewis publishers, NY.
18. Korda, A.; Santas, P.; Tenente, A. y Santas, R. (1997). Petroleum hydrocarbon bioremediation: sampling and analytical techniques, in situ treatments and commercial microorganisms currently used. Appl. Microbiol. Biotechnol. 48: 677-686.

19. MAINI G. Y SHARMAN A.K. (1999). Enhanced removal of copper from contaminated silt soil using bioelectrokinesis. En: Bioremediation of metals and inorganic compounds.(A. Leeson y B.C. Alleman, Eds.). Battelle press, EUA, Columbus. pp. 127–137
20. MARKS R.E., ACAR Y.B. Y GALE R.J. (1994). In situ remediation of contaminated soils containing hazardous mixed wastes by bio–electrokinetic remediation and other competitive technologies. En: Remediation of hazardous waste contaminated soil. (D.LWise y D. Trantolo, Eds.) Marcel Dekker, Nueva York. pp. 405–436.
21. MATTHEWS, Jhon E. et al. Handbook of bioremediation. Oklahoma: Lewispublishers.1993
22. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. GUIA DE MANEJO AMBIENTAL PARA PROYECTOS DE PERFORACION DE POZOS DE PETROLEO Y GAS. VERSIONNº1 Agosto/99
23. Mishra, S.; Jyot, J.; Kuhad, R.C. y Banwari, L. (2001). Evaluation of Inoculum Addition To Stimulate In Situ Bioremediation of Oily-Sludge-Contaminated Soil. Appl. Microbiol. Biotechnol. 67: 1675-1681.
24. MORENO, Carmen; GONZALES, Aldo; BLANCO, Maria Jose. Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamientos de Biorremediación. Madrid. 2004
25. Plaza G. Otero M. y Torres N.(2001) “Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburo”. AVERMA. Vol. 5 Pag. 63-67. 2001. ISSN 0329-5184
26. Prince R. (1993). petroleum spill bioremediation in marine environments. Crit. Rev. Microbil. 19. 217-242.
27. RODRÍGUEZ GALLEGO, Jose Luis; SÁNCHEZ MARTÍN, Jesus. Biorremediación. Artículo: Fundamentos y aspectos microbiológicos 2005
28. Ron, E.Z. y Rosenberg, E. (2001). Natural roles of biosurfactants. Environmental Microbiology 3(4), 229-236.

29. Schmidt w. (2000). Suelos contaminados con hidrocarburos: la biorremediación como una solución ecológicamente compatible. proyectos de sitios contaminados GTZ .SEMARNAT
30. SOLANAS,Anna Maria. La biodegradación de hidrocarburos y su aplicación en la Biorremediación de suelos. Barcelona. 2009
31. Vinas, M.; Grifoll, M.; Sabate, J. y Solanas, A.M. (2002). Biodegradation of a crude oil by three microbial consortia of different origins and metabolic capabilities. J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 28: 252-260.
32. VIÑAS CANALS,Marc. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica. Universidad de Barcelona. 2005
33. <http://explotacionpetrolera.wikispaces.com/petroleo.+impacto+ambiental>